

39179

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KÜTÜPHANE

**ALTERNATİF AKIM - DOĞRU AKIM SİSTEMİNDE AYRIK YÖNTEM KULLANIMI İLE
OPTİMAL GÜÇ DAĞILIMI HESABI İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM**

39179

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Uğur ARİFOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Eylül 1993

Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Aralık 1993

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nesrin TARKAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Nusret YÜKSELER

ARALIK - 1993

ÖNSÖZ

Son yıllarda endüstrileşen ülkelerde, iletim şebekelerinin yükü oldukça artmıştır. Bu artış, enerji sistemlerinin kapasitelerini kararlılık sınırlarına kadar yükseltmiştir. Yapılması planlanan iletim hatlarının yüksek yapım maliyetleri, çevre şartları ve uygun iletim hattı yolunun eksikliği sistem planlayıcılarını güç iletim ve kararlılık sınırını arttırmak için yeni çözümler aramaya zorlamaktadır.

Elektrik mühendislerinin literatürüne FACTS' (Flexible Alternating Current Transmission System) olarak isimlendirilen ve kısaca esnek alternatif akım iletim sistemi adı ile kullanılabilecek yeni bir kavram girmiştir. Bu kavram sistem analistlerini çok yakından ilgilendirmektedir. Yüksek gerilimli doğru iletim hatları, statik var kompanseörleri, hızlı kontrol edilebilen faz kaydırıcıları FACTS içinde önemli rol oynarlar. Yukarıda sayılan sistem parçalarının hiç biri yeni tanınan eleman değildir. Ancak burada yeni bir amaçla; alternatif akım sisteminin güç iletim sınırlarını arttırmak için kullanılmaktadırlar.

Son yıllarda yüksek güçlü çevirici istasyonlarının ekonomik olarak üretimine yönelik ciddi adımlar atılmaktadır. Bu gelişme, birleşik alternatif akım-doğru akım enerji sisteminin tüm dünyada yaygın olarak kullanılamayışının önündeki önemli bir engeli de ortadan kaldırmaktadır.

Alternatif akım-doğru akım enerji sisteminin boyutlandırılması, incelenmesi ve kontrol edilmesi güç akışı hesaplama sonuçlarına göre yapılır. Şüphesiz, enerji sisteminin en verimli kullanımı, tüm sistemi her an kontrol ederek yönlendiren bir kumanda merkezi yardımı ile gerçekleştirilebilir. Böyle bir kontrol her an ve sürekli (on line) olarak yapılır. Sistem enerjisinin ekonomik olarak üretim ve iletiminde (optimizasyon) kullanılan hesaplama yöntemi, on-line olarak sistem ile bilgi alışverişinde bulunan bilgisayarın bellek ve hızı için oldukça önemlidir. Sunulan bu tez, böyle bir amaca yönelik olarak yapılan bir çalışmayı içermektedir.

Lisans ve yüksek lisans tez çalışmalarında olduğu gibi doktora çalışmamda da bana her türlü desteği veren değerli hocam sayın Prof.Dr.Nesrin TARKAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa_no

NOTASYON LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 Alternatif Akım-Doğru Akım Enerji Sisteminin Gelişimi.....	1
1.2 Alternatif Akım Sistemi ile Doğru Akım Sisteminin Ekonomik ve Teknik Açılardan Karşılaştırılması.....	2
1.3 Alternatif Akım-Doğru Akım Güç Akışı Yaklaşımları.....	8
BÖLÜM 2. ALTERNATİF AKIM GÜÇ AKIŞI.....	12
2.1 Alternatif Akım Güç Akışı Eşitlikleri.....	13
2.2 Alternatif Akım Güç Akışı Hesaplamaları...	16
BÖLÜM 3. ÖNERİLEN AYRIK DOĞRU AKIM GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMI.	32
3.1 Alternatif Akım-Doğru Akım Sistem Modeli..	34
3.2 Doğru Akım Güç Akışı Eşitlikleri.....	38
3.3 Akım Dengeleme Yöntemi.....	41
3.4 Tek Kutuplu-Çok Uçlu Doğru Akım Sistemlerinde Güç Akışı.....	45
3.5 İki Kutuplu-Çok Uçlu Doğru Akım Sistemi...	49
3.5.1 Sistem Modeli.....	53
3.5.2 İki Kutuplu Doğru Akım Güç Akışı Algoritması.....	54
3.6 Alternatif Akım-Doğru Akım Güç Akışı Algoritması.....	59

BÖLÜM 4. ALTERNATİF AKIM-DOĞRU AKIM OPTİMAL GÜÇ AKIŞI..	62
4.1 Optimizasyon Hesaplamalarında Kullanılan Dommel-Tinney Yaklaşımı.....	63
4.2 Önerilen Yaklaşım ile Aktif Güç Optimizasyonu.....	70
4.2.1 Yakıt Maliyet Fonksiyonu.....	71
4.2.2 Aktif Güç Optimizasyonu Hesaplamaları.....	72
4.3 Önerilen Yaklaşım ile Reaktif Güç Optimizasyonu.....	81
4.3.1 İletim Hattı Kayıpları.....	83
4.3.2 Reaktif Güç Optimizasyonu Hesaplamaları...	85
BÖLÜM 5. ÖNERİLEN YÖNTEMİN SAYISAL UYGULAMASI.....	91
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	100
KAYNAKLAR.....	104
EK A MATRİS ELEMANLARININ UYGUN FORMDA SIRALANMASINA İLİŞKİN BİLGİSAYAR PROGRAMI.....	111
EK B BÜYÜK BOYUTLU MATRİS TERSİ ALAN BİLGİSAYAR PROGRAMI.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	132

NOTASYON

AA	: Alternatif Akım
AA-DA	: Alternatif Akım-Doğru Akım
ADY	: Akım Dengeleme Yöntemi
A_g	: Üretim Maliyet Katsayı Matrisi
a	: Çevirici Akım Dağılım Katsayısı
a_g	: Üretim Maliyet Katsayısı
B	: Bara Admitans Matris Elemanı Sanal Değeri
B_g	: Üretim Maliyet Katsayı Matrisi
b_g	: Üretim Maliyet Katsayısı
bt	: Kademe Ayarlı Transformatör Admitansı Sanal Değeri
c_g	: Üretim Maliyet Katsayısı
C_g	: Üretim Maliyet Katsayı Matrisi
D	: Rezidü Eşitliği
DA	: Doğru Akım
e	: Çevirici Açık Devre Gerilimi
f	: Amaç Ölçüt Fonksiyonu
f_{p1}	: Serbest Baraya İlişkin Amaç Ölçüt Fonksiyonu
G	: Bara Admitans Matris Elemanı Gerçel Değeri
g	: Kısıtlayıcı Fonksiyon
g_1	: Toprak Akımı Akmayan Çevirici İstasyon Bara Kümesi
gt	: Kademe Ayarlı Transformatörün Admitans Gerçel Değeri
h	: Kısıtlayıcı Fonksiyon
I	: Çevirici Çıkışı Doğru Akım Tahmini Değeri
$I_{aatemel}$	: AA Sistemi Temel Akım Değeri
I_d	: Çevirici Çıkışı Doğru Akım Değeri
$I_{datemel}$	: DA Sistemi Temel Akım Değeri
J	: Jacobien Matrisi
K_b	: Çevirici Çarpım Sabiti
L	: Genişletilmiş Amaç Ölçütü
n	: Çevirici Transformatör Sayısı
n_1	: Seri olarak Bağlı Çevirici Sayısı

n_b : Bara Sayısı
 n_c : Çevirici Sayısı
 n_g : Generatör Sayısı
 n_h : Hat Sayısı
 n_t : Kademe Ayarlı Transformatör Sayısı
 n_v : Generatör Baraları Dışındaki Bara Sayısı
 P : Gerçek Güç
 P_v : Gerilim Kontrollü Bara
 P_Q : Yük Barası
 P_d : Çeviricinin AA Barasından Aldığı veya Verdiği Aktif Güç
 P_{hat} : AA Barasından, AA Hatlarına Verilen Toplam Aktif Güç
 $P_{kayıp}$: İletim Hatlarındaki Toplam Aktif Kayıp Güç
 P_{temel} : AA ve DA Sistemi Temel Güç Değeri
 Q : Sanal Güç
 Q_c : Kapasitif Güç Değeri
 Q_{hat} : AA Barasından, AA Hatlarına Verilen Toplam Reaktif Güç
 R : Doğru Akım Hat Direnci
 $\hat{R}, r$: DA Sistemi Bara Direnç Matrisi ve Elemanı
 R_c : Çevirici Komutasyon Direnci
 R_L : Çevirici Reaktör Direnci
 R_t : Çevirici Topraklama Direnci
 R, r^t : Çevirici Topraklama Direnç Matrisi ve Elemanı
 $\bar{S}$: Sanal Güç
 t : Kademe Ayarlı Transformatör Kademe Ayar Değeri
 t_d : Çevirici Kademe Ayarlı Transformatör Kademe Ayar Değeri
 U : Eleman Değerleri 1 Olan Sütun Matris
 U_1 : Ana Köşegen Üzerindeki Eleman Değerleri 1 Olan Matris
 u : Kontrol Değişkeni
 $V_{aotemel}$: AA Sistemi Temel Gerilim Genlik Değeri
 $V_{datemel}$: DA Sistemi Temel Gerilim Genlik Değeri
 $\bar{V}, v$: AA Bara Gerilim Sanal ve Genlik Değeri
 v_d : Çevirici Çıkışı Doğru Gerilim Değeri

w	: Penaltı Fonksiyonu
X_c	: Komutasyon Empedansı
X_F	: Filtre Empedansı
x	: Durum Değişkeni
$\bar{Y}$	: Bara Admitans Matrisi Kompleks Elemanı
Y_{bara}	: AA Sistemi Bara Admitans Matrisi
Z_{aatemel}	: AA Sistemi Temel Empedans Değeri
Z_{datemel}	: DA Sistemi Temel Empedans Değeri.
α	: Doğrultucu Tetikleme Açısı
β	: İterasyon Yakınsama Toleransı
β_1	: ADY Amaç Ölçüt Fonksiyonu
γ	: Evirici Toparlanma açısı
δ	: AA Bara Gerilim Açısı
∇f	: Maliyet Fonksiyonu Gradyeni
φ	: I_c Akımı Faz Açısı
λ	: Lagrange Çarpanı
μ	: Amaç Ölçüt Fonksiyonu
ρ	: Toprak Akımı Yoğunluk Katsayısı
σ	: Ağırlık (Dağıtım) Katsayısı
ϕ	: Güç Faktörü Açısı

Indisler

aa	: Alternatif Akım
c	: Kapasitif Büyüklüğe Ait
d	: DA Sistemi Büyüklüğüne Ait
da	: Doğru Akım
g, a	: Generatör Büyüklüğüne Ait
p	: Aktif Güç Optimizasyonuna Ait
q	: Reaktif Güç Optimizasyonuna Ait
t	: Evrik (Transpoze)
t	: Transformatöre Ait
tt	: AA Barasına Birden Fazla Transformatör Bağlantısını Gösterir
x, y	: Yük Değerine Ait (Vektör, Değişken)

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u> __	<u>Sayfa no</u>
1.1. Yüksek Gerilimli Doğru Akım Sistemlerinin Güç Kapasitelerinin Yıllara Göre Değişimi.....	2
1.2. Biri Doğrultucu Diğeri Evirici Olarak Çalışan İki Çevirici İstasyon Gösterimi.....	5
1.3. 12 Darbeli Bir Çevirici Şeması.....	6
1.4. Doğru Akım Sistem Modeli.....	7
2.1. AA-DA Enerji Sisteminde Genel Amaçlı Bir Bara..	15
2.2. Kademe Ayarlı Transformatör Modeli.....	19
2.3. Newton Yöntemi ile Güç Akışı Algoritması.....	24
2.4. Şekil 2.3 ile Verilen Bara Güçlerinin Hesaplanmasına Ait İşaret Akış Şeması.....	26
2.5. Şekil 2.3 ile Verilen Jacobien Matris Hesaplanmasına Ait Alt Program İşaret Akış Şeması...	31
3.1. Doğru Akım İletim Hattı, Çevirici ve Transformatör Şeması.....	36
3.2. Çok Uçlu Doğru Akım Sistem Modeli.....	38
3.3. Üç Uçlu DA Enerji İletim Akım Dengeleme Yöntemi Kontrol Şeması.....	44
3.4. Optimal Güç Akışı Hesaplamalarında Kullanılan DA Güç Akışı İşaret Akış Şeması.....	51
3.5. İki Kutuplu, Çok Uçlu, Radyal Beslemeli Doğru Akım İletim Hattı Şeması.....	52
3.6. İki Kutuplu Çevirici Şeması.....	53
3.7. AA-DA Güç Akışı İşaret Akış Şeması.....	60
4.1. Gradient Yöntemi İşaret Akış Şeması.....	65
4.2. P-Q Optimizasyonu İşaret Akış Şeması.....	68
4.3. Durum Değişkenlerine Göre Jacobien Matris Yapısı.....	78
4.4. Aktif Güç Optimizasyonu Kontrol Değişkenlerine Göre Jacobien Matris Yapısı.....	79
4.5. P Optimizasyonu İşaret Akış Şeması.....	80
4.6. Reaktif Güç Optimizasyonu Kontrol Değişkenlerine Göre Jacobien Matris Yapısı.....	89
4.7. Q Optimizasyonu İşaret Akış Şeması.....	90
5.1. Değiştirilmiş IEEE 14 Bara AA-DA Sistemi.....	92
5.2. Tablo 5.7 de Verilen Sonuçlara İlişkin Eğriler.	99

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa no</u>
5.1. IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, AA Empedans Büyüklükleri.....	91
5.2. IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, Generatörlere Ait Üretim Yakıt Maliyet Katsayıları ve Yük Değerleri.....	93
5.3 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, AA Sistem Değişkenleri Sınır Değerleri.....	93
5.4 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, DA Sistemi Hat ve Çevirici Değerleri.....	94
5.5 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, DA Sistem Değişkenleri Sınır Değerleri.....	94
5.6 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, Optimal Güç Akışı Sonuç Değerleri.....	95
5.7 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, Optimal Güç Akışı Yakınsama İterasyon Değerleri.....	97
5.8 IEEE 14 Bara Sistemi Üzerinde Yapılan AA Optimal Güç Akışı Sonuçları ile Tezde Elde Edilen AA-DA Optimal Güç Akışı Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	98

ÖZET

Sunulan bu çalışma ile ilk defa negatif gradient yöntem yardımıyla alternatif akım-doğru akım optimal güç akışı gerçekleştirilmiş ve yine ilk olarak bir ayrık alternatif akım - doğru akım güç akışı yaklaşımı optimizasyon hesaplamalarında kullanılabilir duruma getirilmiştir. Ayrık yöntemden bu amaca uygun olarak faydalanabilmek için, algoritmasında bazı değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada yapılan değişikliklerin, ayrık yöntemi üstün kılan genel yapıya zarar vermediği, yakınsama iterasyon sayısı ile hızında olumsuz yönde bir değişmeye yol açmadığı gösterilmiştir.

Önerilen yaklaşım içinde, çoğu çalışmadan farklı olarak, alternatif akım sistemi içinde yer alan kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değerleri bara admitans matrisine sokulmadan güç akışı hesaplamalarında kullanılmıştır. Böylece kademe ayarının her yeni değerleri için bara admitans matrisi tekrar hesaplanmamaktadır. Ayrıca bu yaklaşım optimizasyon hesaplamalarında da kolaylıklar sağlamaktadır. Doğru akım sistemi değişkenlerinden çevirici aktif güçleri, çevirici transformatörleri kademe ayar değerleri ve referans çevirici çıkışı doğru gerilim değeri kontrol değişkenleri olarak; çeviriciye doğru akan alternatif akım faz açıları, referans çevirici dışındaki diğer çevirici çıkış doğru gerilim değerleri, çevirici çıkışı doğru akım değerleri ve tetikleme açıları ise durum değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Böylece ayrık yöntem yaklaşımı genel hatları ile korunmuştur. Ayrıca, kademe ayar değeri ve referans çevirici çıkışı doğru gerilim değerinin kontrol değişkenleri olarak seçilmesi ile de, algoritma içinde yapılan hesaplamalar optimizasyon sürecine taşınmış, böylece güç akışı hesaplama süresi azaltılmıştır. Hesaplamalar, hem P-aktif hem de Q-reaktif optimal güç akışını aynı algoritma içinde gerçekleştirebilecek bir yaklaşım üzerine bina edilmiştir. Böyle bir yaklaşım ise, kontrol değişkenlerinin optimizasyon türüne göre ayrıma tabi tutulmasını gerektirmiştir. Kontrol değişkenlerinin optimizasyon türü ile ilgisi gözetilerek, çevirici aktif güçleri P, geri kalanlar ise Q optimizasyonu kontrol değişkeni olarak alınmıştır. Ayrık yaklaşıma ait tüm eşitlikler, optimizasyon hesaplamalarına yeni bir Lagrange sabiti yardımı ile taşınmıştır. Çalışma sonunda, yukarıda genel hatları ile açıklanan alternatif akım-doğru akım optimal güç akışı yaklaşımı örnek bir sistem üzerinde test edilmiştir.

SUMMARY

OPTIMAL POWER FLOW USING SEQUENTIAL POWER FLOW APPROACH FOR AN ALTERNATING CURRENT-DIRECT CURRENT POWER SYSTEM

Electric utilities, and many of the manufacturing industries they serve, are on the threshold of revolutionary change brought about by high-power electronics. Over the last two decades the increasingly dense integration of low-voltage low-current circuits on small silicon chips has transformed office equipment and communication networks. During the next two decades the development of semiconductor devices for high-voltage high-current applications will bring about an equally fundamental transformation in major industrial equipment and utility networks.

This power electronics revolution has already begun. Power electronics is now being used to make AC-DC converters for high voltage DC (HVDC) transmission, static VAR compensators, uninterruptible power supplies to protect sensitive equipment, and drives for adjustable-speed motors. In the near future, power semiconductor devices are expected to make the electricity generated by photovoltaic and wind facilities which are more easily compatible with utility transmission networks. Over the longer term, these devices may even replace mechanical switches on distributive power lines. The true impact of power electronics on electric power systems is yet to be realized.

We are sure that you appreciate that, by and large, the AC power system of today is a mechanically controlled system and as a result there is no high-speed control. Also because of mechanical control, it can not be initiated frequently since mechanical devices tend to wear out very quickly compared to static electronic devices. Power semiconductor devices in HVDC and other power applications are switched every cycle with negligible loss of life.

Power flow through an a.c line is a function of the phase angle, the line end voltages, and impedance. There is no high speed control over these parameters. Phase angle control is rarely utilized and, when it is used, the control is by means of slow mechanical phase shifters. Tap changers, reactors, and capacitors are generally

mechanically switched and as a result they are also "slow" methods for controlling the power system. Of course there is no control over the line impedance. Somehow, we arrive at the required steady-state power flow while maintaining voltages within the safe tolerable limits through the use of generation scheduling and the occasional changing of transformer tap changers, and the switching of shunt reactors and capacitors. On top of that, the AC system has the curse of reactive power, which loads up the lines and causes problems in voltage control. Consequences of this lack of precise control are the problems with stability, power flowing through other than the intended lines, higher losses, high or low voltages, cascade tripping, etc.

Now let us look at HVDC transmission. The phase angle does not play a role on the DC side, voltage is controlled at high speed by the converters and the inductance and capacitance of the line are not a liability. True, the line resistance is not controlled but this is not necessary because the voltage is controlled. Thus the freedom from uncontrolled parameters and the high speed control of voltages gives us a transmission system through which the desired power can be controlled in either direction with considerable freedom from the AC frequency, the AC voltage, and the AC system impedance.

We can say in 10, 20, or even 30 years, anticipate to be the trend in power system design based on the use of power semiconductor devices (megawatt electronics). Power semiconductor devices, including the thyristor and its variations with and without turn-off capability, continue to make major strides. We can assume that a single device rated up to 20 kV and a few thousand amperes, with high di/dt and dv/dt capability and lower losses and cost will become a reality. Already silicon-bonded packaging which will cut the device cost by a third has been shown to be a realistic goal. Furthermore, the combined technology of integrated circuits and MOS controlled thyristors (MCT) has resulted in low energy optical turn-on/turn-off capability. These and other advances will provide a significant boost to applications in the electric power system.

Recent years have seen the introduction of a new concept, named FACTS (Flexible AC Transmission Systems), in connection with AC system analysis. The principal reason for the significant increase in the application of HVDC transmission is that HVDC provides a high degree of flexibility in the power system. As mentioned before, power flow can be controlled in either direction with considerable freedom from the system frequency, AC voltage and system impedance. However, the problem with the AC transmission system is that it has no high speed control of the phase angle, the impedance, or the voltage. But advances in power semiconductor applications might

change this.

HVDC, fast controllable phase-shifters, series compensation and static var compensators all play a significant role in FACTS.

Since 1952, when the first modern high voltage direct current transmission system began operating, lots of HVDC system have been built successfully operated. These are mostly two-terminal systems for transmitting bulk power between two points. Because these systems have been so successful, there is much interest in building HVDC systems with more than two terminals. These are known as multiterminal (MT) systems.

Power control in an HVDC system is obtained by controlling the voltages at the inverter and rectifier. The voltage control can be accomplished by using transformer taps to VAR the AC voltage or by varying the ignition angle of the rectifier or inverter. The current in an HVDC system is function of the difference between the DC voltages at the rectifier side and the inverter side. Thus the DC current can be controlled by varying either voltage. The rectifier is normally used for current control, and the inverter establishes the DC system voltage. In modern HVDC systems, the valves are thyristor modules consisting of series/parallel arrays of thyristors to meet system voltage and current requirements. The thyristors are controlled by the AC voltage and gate firing pulses. For a thyristor to turn on, it needs a positive forward anode to cathode voltage and a firing pulse at its gate. The conduction time of the thyristor determines the DC voltage and this conduction interval is controlled by the ignition angle. The ignition angle can vary from 0-90 degrees for a rectifier and from 90-180 degrees for an inverter, but for various operating reasons they are not normally operated at the extremes of these ranges.

HVDC transmission system has the following advantages over AC transmission.

- 1- line losses are lower because there is no reactive power flow,
- 2- power flow is much more controllable,
- 3- stability of connected AC system is increased,
- 4- smaller conductors and transmission corridors are required,
- 5- short circuit currents are limited,

- 6- thermal construction can be stages to coincide with load growth,
- 7- no additional reactive power is required for voltage supported effects or stability,
- 8- connection is asynchronous, so AC systems at different frequencies or systems with stability problems can be connected,
- 9- HVDC systems can continue to operate with one out of service.

The disadvantages of HVDC system are:

- 1- cost of converters is high at the present time,
- 2- converters require reactive power,
- 3- converters generate harmonics, therefore they require filters,
- 4- converters have low overload capability, lack of HVDC circuit breaker hampers multiterminal or network operation.

The Gauss method for the solution of simultaneous equation was the first numerical method used to solve the complex AC load flow equations. This method was superseded by the Gauss-Siedel method, the Newton and the decoupled Newton load flow method. Each development improved the convergence properties and shortened the time required to obtain a solution.

It is envisioned that multiterminal HVDC system will initially be incorporated into the AC system solely as bulk power transmission facilities, in which such the number of DC terminals will be a small fraction of the total number of buses in the power system. In view of this fact, there is a case for solving AC-DC load flow problem with minimal sacrifice in efficiency of the techniques already used for the AC problems. The AC-DC load flow can be obtained by solving the combined system equations simultaneously for by a sequential process iterating back and forth between the AC and DC network equations.

In the simultaneous solution method the DC load flow equations are directly incorporated into the Newton AC load flow equations. The combined set of equations are then solved simultaneously in every iteration of Newton load flow algorithm. On the other hand, in the sequential solution method, the direct current terminals are treated as loads or power sources on the AC system and iteration between AC-DC load flow algorithm are made to match boundary conditions between two systems. This method has the

advantage that there is no need to replace or restructure any existing AC load flow program that may be providing satisfactory performance.

For a DC link with two terminals, the Newton formulation requires 13 residual equations and the corresponding Jacobien expansion to account for all variables involved. equations for just the DC converters and the network are fairly simple, however they are complicated by the variety of controls and constraints on some variables. The DC method used in this thesis presents a Gauss method of solution for the DC system equations which avoids the elaborate representations used in the Newton formulation.

The DC load flow algorithm developed utilizes the Gauss iterative procedure. The algorithm has been proved to possess excellent convergence properties for this particular application. A typical example of a four terminal system converges to a solution in two or three iterations. Given a set of reasonable scheduled powers and AC bus voltages, the algorithm converges on the best possible solution. Best in the sense that it minimizes the mean squared error of the scheduled currents and also satisfies constraints which are imposed on the converter voltages, valve currents, firing angles, and transformer taps.

The ability of the algorithm to arrive either at the required solution which satisfied the set of scheduled powers or that of providing a compromise solution when set of scheduled powers could not be met within the operational and equipment constraints set, is a valuable feature in application where a compromise solution is better than none. This characteristic makes the algorithm suitable for on-line applications.

The real and reactive powers of the converters can be regarded as P and Q loads on the AC system. Neglecting the transformer, the P and Q flows at the primary AC bus will be the same as the real and reactive powers calculated for the converter. But for a three winding transformer with tap changer on the primary side, an iterative solution on the transformer equations will be required to determine the P and Q flows at the primary AC bus. Using the sequential approach, the DC load flow algorithm can be combined with any existing AC load flow algorithm. Since the AC system voltages can be initially approximated closer than the reactive power requirements of converters, to start off, a DC load flow is performed prior to the AC load flow. With updated values of the P and Q flows, the AC load flow routine computes a new set of AC bus voltages which is then used in the next load flow. Iteration

between AC and DC load flow algorithm is performed until the maximum change in P and Q of the converters between successive iterations fall below prescribed tolerances. Experience with this sequential schema has been good.

In this thesis, some of the parameters which are used in monopolar or bipolar multiterminal direct current systems have been chosen as control (superbasic) variables and other ones as dependent (basic) variables. Any of terminals of AC-DC systems have been chosen as slack terminal. Dependent variables of DC system in this thesis are DC terminal current, I_{di} , DC terminal voltage V_{di} (except for slack terminal), triggering angle α_i or γ_i and power factor angle ϕ_i . Control ones are active powers of DC terminals P_{di} , slack terminal voltage V_{d1} , and converter transformer taps t_i .

By using the method proposed above, firstly, sequential approach which can only be used for AC-DC load flow equations, has been changed into the form in which it can be used for the optimization process.

Secondly, advantages of sequential AC-DC load flow, solution time and memory of the computer, apply for any optimization process. In this thesis, serial P-Q dispatch methodology has been used.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

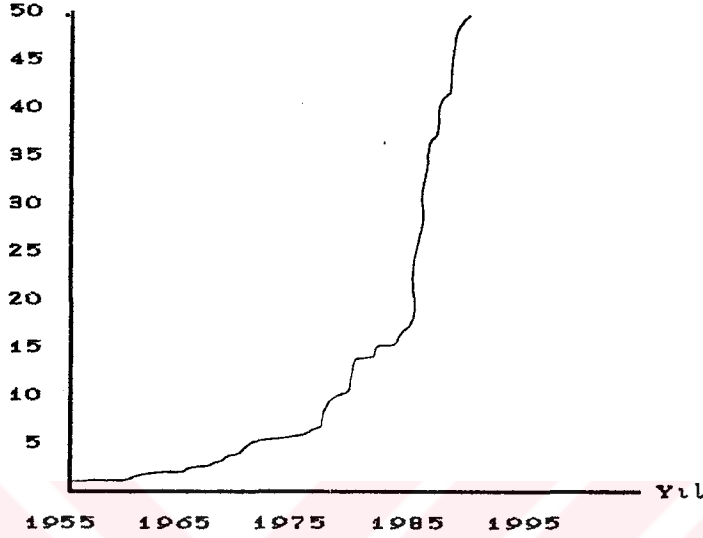
1.1 Alternatif Akım-Doğru Akım Enerji Sisteminin Gelişimi

1950 li yıllara kadar, yüksek gerilim ile ilettime dönük olarak tasarımı yapılan çeviricilerin, endüstride kullanımına sıkca rastlanamamaktadır. Bu yıllara kadar bazı çalışmalar yapılmıştır. Yüksek gerilimli çeviriciler üzerinde yapılan en eski uygulama 1889 yılında Thury tarafından gerçekleştirilen modeldir. Bu model 1890 ile 1937 yılları arasında Avrupa da kullanılmış ve alternatif akım ile doğru akım makinalarının bir arada çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. 1920 ve 1930 lu yıllarda İngiltere ve İsveç'te mekanik açma-kapama ile çalışan çeviriciler kullanılmıştır. Amerika da ise bu yıllarda General Electric tarafından doğru akımla iletimde kullanılacak yüksek gerilim civa arklı çeviriciler üretildi. 1937 ile 1945 yılları arasında kullanılan bu çevirici modeli nisbeten küçük güçlerde imal edilebiliyordu. Ticari rekabet ise, civa arklı çeviricilerin imali ile başlamıştır [1].

1960 li yılların başlarına doğru katı hal yarı iletken teknolojisinin gelişimi ile birlikte bu teknolojinin yüksek gerilimli doğru akım iletiminde kullanılması da gündeme geldi. İlk tiristör donanımlı çeviriciler Gotland-İsveç ve Sokuma-Japonya'da ticari alanda uygulama buldu. Daha sonra, 1972 yılında Kanada'da 360 MW gücünde katı hal yarı iletken teknolojisi ile üretilen çeviriciler işletmeye sokuldu. 1970 ile 1980 li yıllarda dünyanın birçok yerinde yüksek gerilimle doğru akım iletimi (HVDC) yaygınlaştı. Şekil 1.1 de 1955 ile 1995 yılları arasında dünyada inşa edilen, işletmeye sokulan, proje aşamasında olan yüksek gerilimli doğru akım sistemlerinin

kapasitelerinin yıllara göre değişimi verilmiştir [1].

Sistem Kapasitesi (GW)



Şekil 1.1 Yüksek Gerilimli Doğru Akım Sistemlerinin Güç Kapasitelerinin Yıllara Göre Değişimi.

1.2 Alternatif Akım ile Alternatif Akım - Doğru Akım Sisteminin Ekonomik ve Teknik Açından Karşılaştırılması

Ekonomik açıdan bakıldığında, yüksek maliyetli çevirici istasyonları bir dezavantaj olarak gözükmektedir. Fakat uzun mesafelerde hava hatları ile yapılan doğru akım iletiminden doğan ekonomik yarar [2], çevirici maliyetindeki olumsuzluğu dengeleyebilmektedir. Doğru akım iletim hatlarının ekonomik olduğu uzaklığın tesbiti yerel şartların farklılığından dolayı çok zordur. Ancak şimdiye kadar yapılan çalışmalardan elde edilen pratik sonuçlar, bu mesafenin 500 km dolayında olduğunu ortaya koymaktadır. Arazi şartları, yüksek maliyetli hatların yapımını zorunlu kılıyorsa, ekonomik uzaklık daha da azalabilir.

Yer altı kablosu ile iletim için kritik uzaklık 30 km civarındadır. Yüksek gerilimli alternatif akım

kablolarından akan bu kapasitif akımın etkisini azaltmak için iletim hattının ortasına oldukça pahalı şönt reaktörlerin konulması gerekmektedir. Fakat bu çözüm denizaltı kablo sistemleri için hiç de pratik olmayacaktır. Ancak doğru akım ile iletimde böyle bir problem söz konusu olmamaktadır. Alternatif akımla ilettime kıyasla doğru akım ile iletimde ekonomik uzaklığın tesbitinde, izolasyon düzeyinden daha iyi yararlanma, iletken sayılarının azaltılması ve etkin iletken kesitini arttırılması önemli niteliklerdir.

Teknik olarak karşılaştırma yapıldığında ise söylenebilecek çok şey vardır. Doğru akım ile iletimde alternatif akım ile iletimde sağlanamayacak teknik imkanlara kavuşulur. Birbirinden bağımsız iki alternatif akım sistemi, doğru akım hatları ile birbirine bağlanarak senkron olmayan şartlarda çalıştırılabilir. Zayıf bir alternatif akım hattı ile birbirine bağlanan iki alternatif akım sisteminin kontrolü bazen imkansız olabilir. Doğru akım iletim hattı ile yapılan bağlantı ile bu sakınca ortadan kaldırılabılır.

Son yıllarda endüstrileşen ülkelerdeki iletim şebekelerinin yükü oldukça artmıştır. Bu artış, sistemlerin kapasitelerini kararlılık sınırlarına yaklaşan seviyelere kadar yükseltmiştir. Yapılması planlanan iletim hatlarının yüksek yapım maliyetleri, çevre şartları ve uygun bir bir iletim hattı yolu eksikliğinden dolayı, güç iletimini ve kararlılık sınırını arttırmak için, sistem planlayıcıları yeni çözümler aramaya başlamışlardır [3-6].

Elektrik mühendislerinin literatürüne FACTS olarak (Flexible Alternating Current Transmission System) adlandırılan, kısaca esnek alternatif akım iletim sistemi adı ile kullanılabilecek yeni bir kavram girmiştir [7]. Bu kavram sistem analistlerini çok yakından ilgilendirmektedir. Yüksek gerilimli doğru akım iletim hatları, statik

var kompansatörleri, hızlı kontrol edilebilen faz kaydırıcıları FACTS da önemli rol oynarlar [8-14]. Yukarıda sayılan birimlerin hiç biri yeni tanınan eleman olmasa da, burada yeni ve önemli olan konu, bunların alternatif akım sisteminin güç ileme sınırlarını arttırmada kullanıldığıdır.

Son yıllarda gerilim kararlılığına bağlı olarak meydana gelen problemlerin arttığı bilinmektedir. Bunun zorunlu bir sonucu olarak arıza sayılarında da artışlar meydana gelmektedir. Arızaların başlıca nedeni olarak, alternatif akım sisteminin daha ağır yük koşullarında çalıştırılması ve kritik durumlarda hızlı kontrol edilebilen reaktif güç kaynaklarının bulunmayışı gösterilebilir [15].

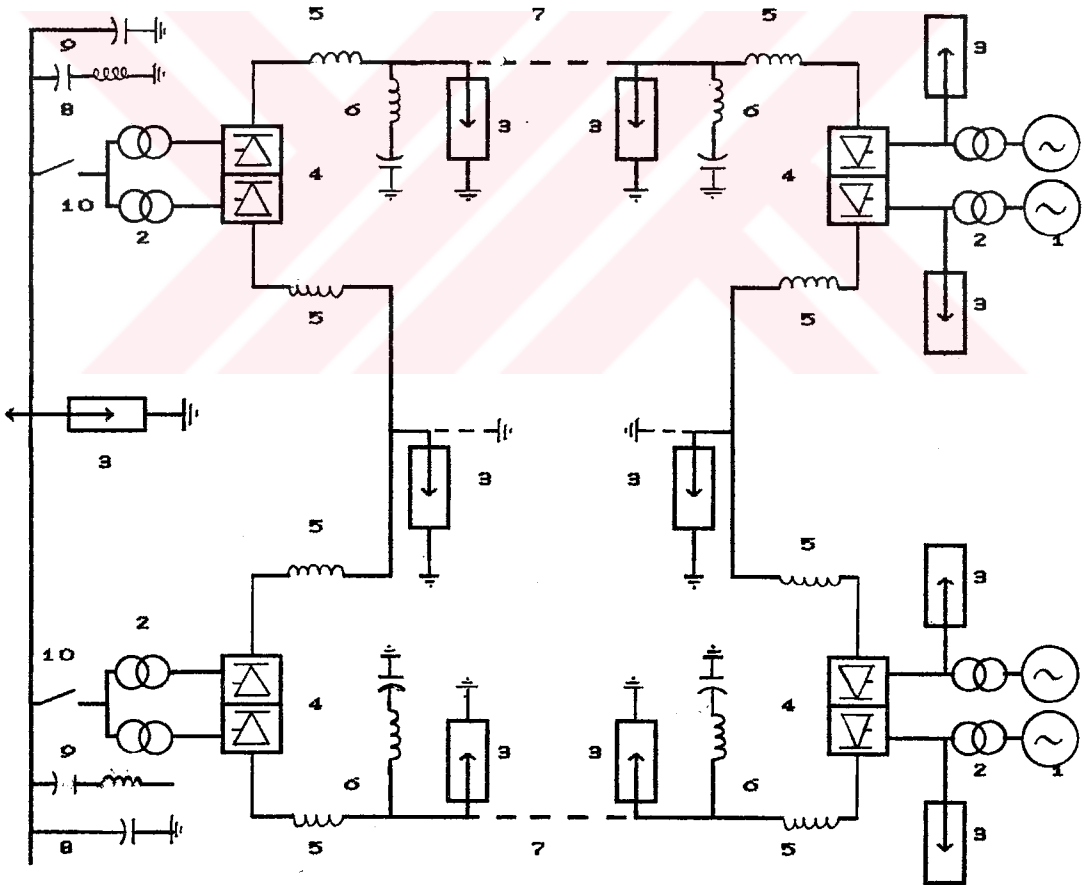
Alternatif akım iletim hatları boyunca akan gücün kontrolü; faz açıları, hat uç gerilim değeri ve hat empedansının değiştirilmesi ile sağlanabilir. Alternatif akım sisteminde bu büyüklüklerin hızlı bir şekilde değiştirilmesi mümkün değildir. Açı kontrol ünitesi nisbeten ağır çalışan bir mekanizmaya sahiptir. Kademeli transformatörler, reaktörler, kapasitörler genellikle mekanik anahtarlama olarak çalışan elemanlardır. Bunların ancak yavaş bir şekilde kontrolü sağlanabilmektedir. Hat empedansının kontrolü kuşkusuz mümkün değildir [7].

Reaktif gücün varlığı alternatif akım sistemi için büyük bir problemdir. Bu güç, hatların yüklenmesinden gerilim değişimlerine kadar bir çok olumsuz etkiye sahiptir. Bu etkinin yok edilmesi için yapılan çalışmalar [12-14], düşük veya yüksek değerlerde gerilimlerin ve büyük mertebede kayıpların oluşması gibi bir takım ilave sorunları da gündeme getirmektedir.

Alternatif akım-doğru akım sistemlerinde, alternatif akım sistemine ait gerilim faz açısı doğru akım tarafında ikinci dereceden bir etkiye sahiptir. Gerilim değeri ise çeviriciler yardımı ile çok hızlı bir şekilde kontrol

edilebilir. Bu sistem üzerinde hattın endüktans ve kapasitesi etkili olmaz. Hat direnci alternatif akım sisteminde olduğu gibi ayarlanamaz, fakat gerilim iyi bir şekilde kontrol edilebildiğinden direncin kontrolüne gerek kalmaz. Böylece alternatif akım sisteminin frekans, gerilim ve empedansından etkilenmeden ve yön bakımından da farklı olabilen bir güç akışı elde edilebilir.

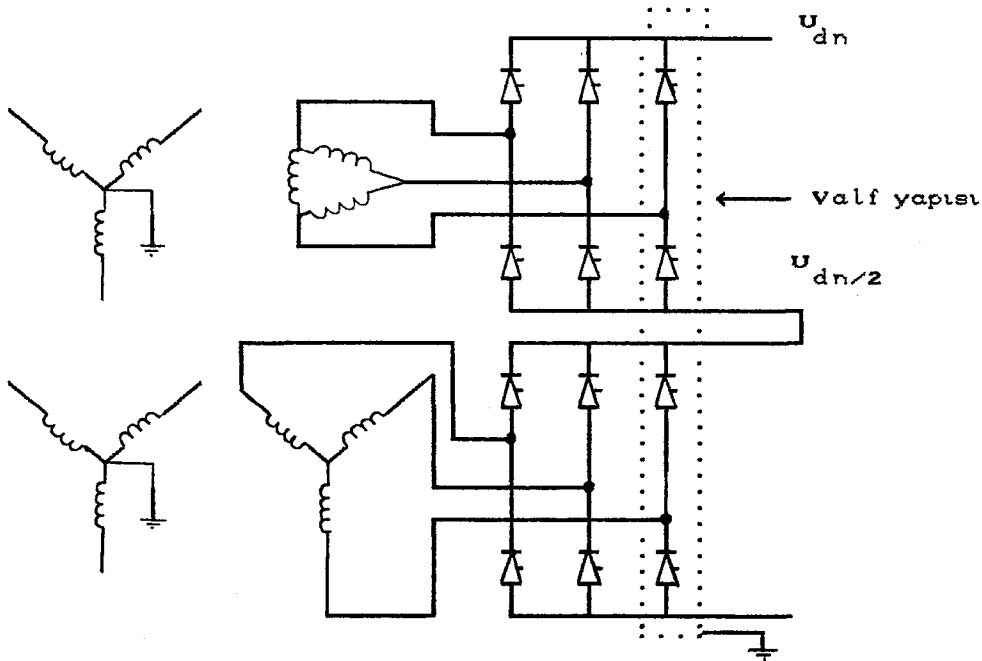
Alternatif akım-doğru akım sisteminin en önemli parçası hiç şüphesiz çevirici istasyonlarıdır. Bu istasyonların en önemli elemanı ise tiristörlerdir. Şekil 1.2 de biri generator barasına bağlı, diğeri tüketici ucuna bağlı iki çevirici istasyon şeması verilmiştir.



Şekil 1.2 Biri Doğrultucu Diğeri Evirici Olarak Çalışan İki Çevirici İstasyon Şeması. 1-Generator. 2-Çevirici Transformörü. 3-Parafudr. 4-Çevirici. 5-Reaktör. 6-Filtre. 7-Doğru Akım Hattı. 8-Şönt Kapasitör. 9-Alternatif Akım Filtresi. 10-Kesici.

Katı hal yarı iletken teknolojisine bağılı olarak sürekli geliştirilen tiristör elemanının büyük güçte, gerilim ve akım dayanımı fazla, daha ekonomik ve kontrolü daha kolay olan bir yapıda üretimi için ciddi adımlar atılmaktadır. Bugün ulaşılan teknolojik seviye ile yakın bir gelecekte 20 kV luk ters gerilime ve birkaç bin amper akıma dayanabilecek özellikle tiristör elemanının üretimi uzak görülmemektedir. Şu anda SBPT (Silicon Banded Packing Thyristor) üretimi ile maliyetleri yüzde otuzlar seviyesine düşürme çalışmaları yapılmaktadır [7], [16].

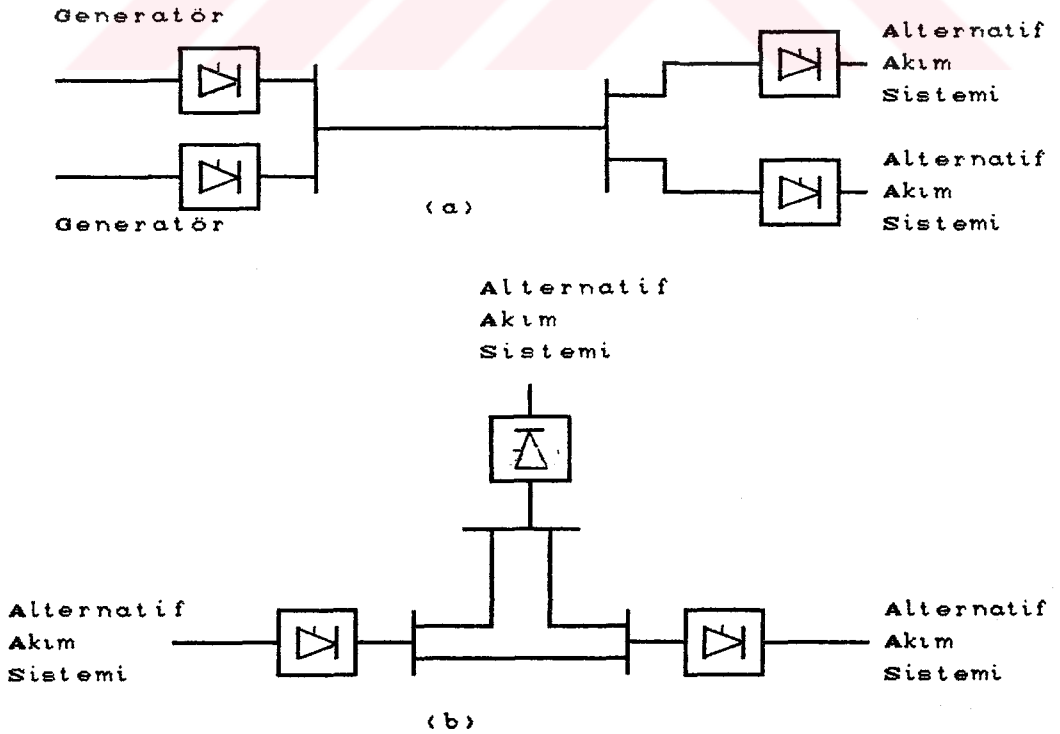
Modern çevirici terminalleri 12 darbeli olarak imal edilirler. 12 darbeli bir çevirici ise 6 darbeli iki adet köprünün birbirlerine seri olarak bağlanması ile meydana gelir. Birbiri ile aynı özellikte olan bu iki köprüyü besleyen transformatörler arasında 30 derecelik faz farkı bulunmaktadır. Şekil 1.3 de verildiği gibi bu fark, bir köprünün yıldız-yıldız diğerinin yıldız-üçgen olarak transformatörler üzerinden alternatif akım sistemine bağlanması ile sağlanabilir. Böyle bir bağlama şekli çevirici çıkışında harmoniklerde önemli bir azalma sağlar [11].



Şekil 1.3 12 Darbeli Bir Çevirici Şeması.

Tiristör valfleri seri ve paralel bağlı tiristörlerden meydana gelir. Bir valfde seri olarak bağlı tiristör sayısı 20 ile 150 arasında değişebilir. Bu sayı valf ve tiristöre uygulanan gerilime bağlıdır. Paralel bağlamada ise bu sayıyı bir tiristörün akım taşıma kapasitesi belirler. Valf devrelerinde doymalı reaktörler tiristörlere seri şekilde bağlıdır. Reaktör, tiristör akımının ilk değişimini kontrol eder ve akım dalgalanmasını en aza indirir. Valf devrelerinde yardımcı düzenler ile valflerdeki gerilim dağılımı düzenlenir, ayrıca tiristörün kesime gitme anında geçici gerilim değerleri kontrol edilir. Tiristör ve yardımcı devreler modüller halinde düzenlenirler. Valf modülü genellikle 2 ile 12 arasında değişen seri bağlı tiristörlerden meydana gelir. Valf modülleri seri bağlanarak valf yapılarını oluştururlar.

Çok uçlu doğru akım sistemleri şekil 1.4 de gösterildiği gibi iki şekilde düzenlenirler.



Şekil 1.4 (a) Radyal, (b) Ağ Şebekelerde Kullanılan Doğru Akım Sistemleri.

Şekil 1.4 (a) da gösterildiği gibi, generatörler tarafından üretilen alternatif akım enerjisi, doğrultucudan geçtikten sonra uzun bir doğru akım hattı üzerinden tüketici merkezlerine ulaştırılır. Burada eviriciler yardımı ile alternatif akıma dönüştürülen enerji tüketicilere dağıtılır. Şekil 1.4 (b) de gösterilen modelde ise doğru akım sistemi alternatif akım şebekesinin içine yerleştirilir. Bu modelde doğru akım gücünün her an yön değiştirebilme özelliği vardır. Dolayısı ile daha esnek bir çalışma imkânı sağlanabilmektedir.

1.3 Alternatif Akım - Doğru Akım* Güç Akışı Yaklaşımları

Enerji sisteminin boyutlandırılması, korunması ve kontrolü güç akışı hesaplamaları ile elde edilen değerlere göre yapılır. Ayrıca, modern enerji sistemleri merkezi kontrol biriminde her an yeni veri okuyan, değerlendiren ve sonuçlandıran bilgisayarların, bu amaç için kullandığı güç akışı algoritmasının verimi çok önemlidir. Bu yüzden, konuya yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bunlar incelendiğinde, öncelikle sistemin modellenmesine dönük yaklaşımlarla karşılaşilmektedir. Modelleme amaçlı çalışmalar, akım ya da gerilim değerleri temel alınarak yapılmıştır [17-21]. Daha sonraki adımda ise çözüme yönelik matematiksel yaklaşımlar göze çarpmaktadır. Enerji sistemlerinde bilgisayar kullanımının yaygınlaşması ile birlikte, gerek sistem modelinin, gerekse çözüme yönelik matematiksel yaklaşımların bazı özellikleri sağlaması şartı gündeme gelmiştir. Sistem çözümünde kullanılacak hesaplama modelinin bilgisayar belleğinde daha az yer kaplayacak ve daha kısa bir sürede işlemleri sonuçlandıracak yapıda olması istenmektedir. Çözüm yöntemlerinde özellikle Newton-Raphson** ve Gauss-Seidel yaklaşımı esas alınarak yapılan çalışmalara yayınlarda daha sık olarak rastlanılmaktadır.

* :Bundan sonra metin içindeki kullanımlarda AA-DA olarak kısaltılacaktır.

** :Bundan sonra metin içindeki kullanımlarda Newton yöntemi olarak kısaltılacaktır.

Newton yönteminin optimizasyon hesaplamalarında kullanılan özellikle Lagrange metod gibi matematiksel yaklaşımlara kolaylıkla uyum sağlaması, AA optimal güç akışı hesaplamalarında da bu yöntemin kullanımını yaygınlaştırmıştır [22-35]. Kuşkusuz başka yaklaşımlarla da çözüm arayışları olmuştur [36-39], fakat yayınlarda Newton yöntemi-ne dayalı çözümler yaygınlığını sürdürmeye devam etmiştir.

Bilgisayar destekli AA-DA güç akışı çalışmaları 1950 li yıllardan beri yapılagelmektedir [40-42]. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde, iki farklı çözüm yaklaşımı ile karşılaşılmaktadır. Bunlardan ilki birleşik [40-43] (simultane), diğeri ayırık [44-45] (sequential) çözümdür.

Eşzamanlı çözüm olarak da adlandırılan birinci yaklaşımda DA sistem değişkenleri AA sistem değişkenleri ile birlikte ele alınıp çözüm yapılır [46]. Bu yaklaşımın en önemli faydası, AA güç akışı hesaplamalarında bir değişiklik yapılmaksızın aynı çözüm yönteminin kullanılabilmesine imkan sağlamasıdır. Sakıncalı yönleri ise, kullanılan matris boyutlarının artması ile birlikte hem yakınsamanın gecikmesi hem de Newton yöntemi gibi ters matris kullanımının gerektiği AA-DA güç akışı işlemlerinde bilgisayar belleğinin ekonomik olarak kullanılamamasıdır. AA-DA sisteminde güç akışı hesaplamalarının Newton yöntemi ile yapılması durumunda, DA sistemine ait olan ilk hat Jacobien matrisin satır ve sütun sayısını 13 arttıracaktır [47]. N boyutlu bir matrisin bilgisayar belleğinde $k.N^2$ hacminde bir yer, hesaplama süresinde ise $k.N^3$ değerinde bir zaman dilimi gerektireceği bilinmektedir [48]. Çok uçlu AA-DA sistemlerinde birden çok DA hattı söz konusu ise, her hat-tan gelen çok sayıda eşitliğin [9-11] Jacobien matrise girmesi ile bellek boyut ve zaman probleminin göz önüne alınması kaçınılmaz olacaktır.

Ayrık çözüm yaklaşımında ise DA hattının AA sisteminde çektiği veya verdiği aktif-reaktif güçler, AA güç hesaplamaları boyunca AA sistemi için sabit bir yük kabul

edilir [49]. AA güç akışı çalışmalarında yakınsama elde edilince, sisteme ait yeni değerler ile DA sistemi güç akışı hesaplamaları yapılır. Her iki sisteme ait ayrı ayrı yapılan güç akışı hesaplamalarına, yakınsama tek bir iterasyon içinde elde edilinceye kadar devam edilir. Ayrık yöntemin AA-DA sistemine ait güç akışı çalışmalarında sağladığı kolaylık iki yönü ile ele alınabilir. Birincisi, sisteme ait yük akışı çalışmalarında AA sisteminde kullanılan güç akışı paket programlarından hiç bir değişikliğe gerek kalmadan faydalanılabilmektedir. İkincisi ise özellikle Newton yöntemi ile yapılan AA-DA güç akışı çalışmalarına göre bilgisayarın daha verimli kullanılabilmektedir. AA-DA sistemlerinde, DA hatlarının özellikle uzun ve bazı şartlarla da orta uzunluktaki mesafeler arasında yer alması sistem içindeki DA hat sayısını sınırlandıracaktır. Ayrıca günümüzde halen işletmede olan AA hatları ile birlikte kullanılması durumunda bu sayı daha da azalacaktır. Doğayısı ile DA hat sayısının az olması, ayrık yöntem ile yapılan DA güç akışının yakınsama süresini birleşik çözüm yaklaşımına oranla çok daha azaltacaktır [44-45].

Yapılan çalışma, bu giriş bölümü dışında dört bölüm içermektedir. 2.Bölümde ayrık AA-DA güç akışı içinde kullanılan AA güç akışına ait gerekli açıklamalar yapılmış ve genel kabul görmüş olan Newton yöntemi tanıtılmıştır. Özellikle optimizasyon hesaplamalarında değişken olarak yer alan kademeli ayar transformatörlerinin etkisi, güç akışı algoritmalarında detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca gerektikçe DA sistemine ait açıklamalar da verilmiştir.

3. Bölümde ayrık yöntem içinde kullanılan, çok uçlu (multi-terminal), iki kutuplu (bipolar) DA sistemlerine uyarlanabilen DA sistem modeli tanıtılmıştır. Bu bölümün sonunda ise optimizasyon hesaplamalarında kullanılan DA güç akışı işaret akış şeması verilmiştir.

4.Bölümde bu çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemi tanıtılmış [50-52], ayrık AA-DA güç akışına ait

kontrol ve durum değişkenleri tesbit edilmiş, gerekli hesaplama ve işaret akış şemaları verilmiştir.

5. bölüm olan son bölümde ise yapılan çalışma örnek sisteme (IEEE değiştirilmiş 14 bara sistemi) uygulanmıştır. Gerekli çıkış değerleri tablolar halinde verilmiş, önerilen yaklaşımın üstünlükleri gösterilmiştir.



BÖLÜM 2

ALTERNATİF AKIM GÜÇ AKIŞI

Belirli bir amaca dönük olarak geliştirilen hesaplama yöntemleri arasından tercih yapılırken göz önüne alınan temel ilke, kullanılacak yöntemin bilgisayar destekli çalışmalarda kolaylık sağlayacak özelliklere sahip olmasıdır. Daha açık bir ifade ile hesaplama yönteminde, bilgisayar belleğinde en az hacim kaplayacak ve en kısa sürede işlemleri sonuçlandırabilecek nitelikler aranmaktadır. Ayrıca kullanıldığı alanda meydana gelen yeni gelişmelere açık olması kullanımının yaygınlaşması bakımından önem taşımaktadır.

Üzerinde çalışılan konunun hem AA, hem de DA güç hesaplamalarını gerektirmesi, ayrıca optimal güç akışı algoritması içinde yakınsama elde edilinceye kadar sürekli olarak tekrarlanma gerekliliği, yöntemin seçimini daha da önemli kılmaktadır. AA güç akışı hesaplamalarında günümüzde kullanımı en yaygın olan Newton yöntemidir. Yaklaşık güç akışı yöntemi, belirli bir hatanın kabul edilmesi şartı ile, bu yöntemi daha da kullanışlı bir hale getirmiştir [53].

Kullanımı yaygın olan AA-DA güç akışı hesaplama yöntemlerinden bazıları Newton yönteminin üstünlüklerinden yararlanılacak şekilde geliştirilmiştir [40,41,42,54,55]. Bu tür bir hesaplama yönteminin en belirgin özelliği, DA devresine ait ifadelerin, AA güç akışı hesaplamalarında kullanılan Jacobien matrisi içine sokularak, Newton yönteminin bilinen şekli ile uygulanmasının sağlanması esasına dayanmasıdır. 3.Bölüm de bu yöntemin bazı olumsuz yönlerine değinilecek ve önerilen yöntem ile karşılaştırılması yapılacaktır.

Bu bölümde, AA güç akışı Newton yöntemi ile yapıldığından bu yöntem hakkında bilgi verilecek ve AA-DA güç akışı hesaplamalarına bir ön hazırlık olması için AA devresine ilişkin eşitliklerin içinde yer alan DA devresinin eşitlik ve kavramları açıklanacaktır.

2.1 Alternatif Akım Güç Akışı Eşitlikleri

Bara sayısı nb adet olan AA-DA enerji iletim sisteminde, doğru akım hatlarından akan gücün, bu hatların bağlandığı AA barasında sabit bir yük olduğu kabulü ile, P_i aktif, Q_i reaktif güç olmak üzere, i. baradan AA hattına verilen kompleks güç,

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{v}_i \sum_{j=1}^{nb} (G_{ij} - jB_{ij}) \bar{v}_j^* \quad (i=1..nb) \quad (2.1)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. (2.1) ifadesindeki $\bar{v}_i$ ve $\bar{v}_j^*$;

$$\bar{v}_i = v_i (\cos\delta_i + j\sin\delta_i) \quad (2.2a)$$

$$\bar{v}_j^* = v_j (\cos\delta_j - j\sin\delta_j) \quad (2.2b)$$

şeklinde olup, $\bar{v}$, $\bar{v}^*$, v sırası ile AA barasına ait gerilimin kompleks, eşlenik ve genlik değeridir. δ , bilinen bir referansa göre gerilimin faz açısını göstermektedir. Kompleks admitans matrisinin (i,j) eleman değeri

$$\bar{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.3)$$

olarak verilmiştir. (2.2) ile (2.3) ifadeleri (2.1) denkleminde yerlerine konulur, çarpımlar yapılır ve düzenlenirse

$$\begin{aligned} \bar{S}_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (G_{ij} \cos\delta_{ij} + B_{ij} \sin\delta_{ij}) + \\ jv_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (G_{ij} \sin\delta_{ij} - B_{ij} \cos\delta_{ij}) \quad (i=1..nb) \end{aligned} \quad (2.4)$$

elde edilir. Yukarıda verilen ifadede kullanılan δ_{ij} , i. ve j. baralar arasındaki faz farkıdır.

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (2.5)$$

(2.4) denkleminin gerçel ve sanal kısımları ayrılırsa, i. baradan AA hattına verilen aktif ve reaktif güçler.

$$P_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.6)$$

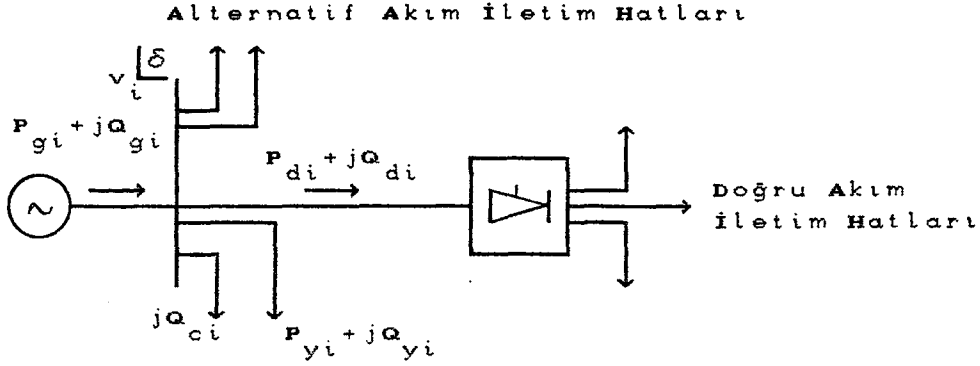
$$Q_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (i=1..nb) \quad (2.7)$$

ifadeleri ile hesaplanabilir. Şekil (2.1) de verilen, i. bara için aktif-reaktif güç dengesi eşitliğini kullanarak

$$P_{gi} = P_{yi} + P_{di} + P_i \quad (2.8)$$

$$Q_{gi} + Q_{ci} = Q_{yi} + Q_{di} + Q_i \quad (i=1, \dots, nb) \quad (2.9)$$

yazılabilir. (2.8), (2.9) denklemlerinde kullanılan g, y, d alt indisleri sırası ile generatör, yük ve doğru akım hattını göstermektedir. Q_c ise i. baraya bağlı kontrol edilebilen şönt reaktif üreteç gücüdür. Bu kaynak, güç katsayısını düzeltici bir kapasite olabileceği gibi senkron bir makine de olabilir. Şekil 2.1 de AA-DA sisteminde genel amaçlı bir bara gösterilmiştir. Yukarıda da bahdildiği gibi, doğru akım hattının üzerine aldığı aktif ve reaktif güçler, bağlı oldukları i.AA barasında, güç hesaplamaları boyunca sabit bir yük gibi kabul edileceği için (2.8) ve (2.9) denklemleri aşağıdaki şekilde de yazılabilir;



Şekil 2.1 AA-DA Sisteminde Genel Amaçlı Bir Bara

$$P_i = P_{gi} - (P_{yi} + P_{di}) = P_{gi} - P'_{yi} \quad (2.10)$$

$$Q_i = Q_{gi} + Q_{ci} - (Q_{yi} + Q_{di}) = Q_{gi} + Q_{ci} - Q'_{yi} \quad (i=1..nb) \quad (2.11)$$

Güç akışı eşitliklerini sağlayan, x durum değişkenleri ve u kontrol değişkenleri için, (2.10) ve (2.11) denklemleri;

$$P_{hati} - P_i = g_{pi}(x, u) = 0 \quad (i=2, \dots, nb) \quad (2.12)$$

$$Q_{hati} - Q_i = g_{qi}(x, u) = 0 \quad (i=ng+1, \dots, nb) \quad (2.13)$$

olarak da ifade edilebilir. Bu ifadelerde, P_{hati} ve Q_{hati} , i .baradan AA hattına verilen aktif ve reaktif güçlerdir.

Enerji iletim sistemlerinde her bir baranın tüm özellikleri dört değişken yardımı ile belirlenir. Bunlar; P_{hati} , Q_{hati} , v_i ve δ_i değerleri olup, bu değişkenlerden iki tanesinin bilindiği kabul edilerek, güç akışı algoritması yardımı ile diğer ikisi elde edilmeye çalışılır. Bu değişkenlere bağlı olarak baraların üç grupta içinde incelenmesi mümkündür;

1. Serbest (slack) bara olarak bilinen bara türünde, v_i ve δ_i değerleri bilinir, diğer bir deyimle bu değerler sabit tutulmaya çalışılır, P_{hati} ve Q_{hati}

değişkenleri hesaplanır. δ_i değeri genellikle sıfır olarak alınır. Bu çalışma süresince 1 numara ile gösterilen bara, serbest (slack) bara olarak kabul edilmiştir.

2. Diğer bara türü, P_{hati} ve v_i değerlerinin bilindiği, Q_{hati} ve δ_i değerlerinin arandığı Pv, gerilim kontrollü bara veya generatör barasıdır. Şayet bu baraya generatörün bağlı ise, P_{hati} değeri türbin karakteristikleri değiştirilerek, v_i değeri ise makinenin uyarmasına etki yapan otomatik gerilim regülatörleri ile ayarlanarak sabit tutulmaya çalışılır. Eğer baraya şönt olarak bir reaktif güç üreticisi bağlı ise, reaktif gücü ayarlayan kontrol devresi yardımı ile v_i sabit tutulabilir. Bu çalışmada Pv bara sayısı, n_v sembolü ile gösterilmiştir. n_v adet baranın içinden (referans bara dahil olmak üzere) n_g adeti generatör barası kabul edilmiştir.
3. Bara türlerinden üçüncüsü ise P_{hati} ve Q_{hati} değerlerinin bilinip, v_i ve δ_i değerlerinin arandığı bara türü olan PQ yük barasıdır. Bu baralar genellikle şehir ve sanayi baralarına karşı düşer.

2.2 Alternatif Akım Güç Akışı Hesaplamaları

Güç akışı hesaplamalarında u kontrol değişkenleri sabit kabul edilerek, bu değişkenler yardımı ile x durum değişkenleri bulunmaya çalışılır. AA sistemine ait durum değişkenleri olarak, tüm baralara ait δ_i gerilim açılarının değerleri (referans bara hariç) ve yük baraları gerilimlerinin v_i genlik değerleri seçilmiştir. Kontrol değişkenleri olarak ise generatörlerin P_{gi} aktif üretim güçleri (referans bara hariç), generatör baralarına ait v_{gi} gerilim genlik değerleri, Q_{ci} ayarlanabilir reaktörlerinin reaktif güç değerleri ve sürekli ayarın yapılabilirdiği

transföörlerin t_i kademe ayar değerleri alınmıştır. Q_{ci} değeri kontrol değişkeni olduğu için, güç akışı hesaplama-
ları boyunca sabit kabul edilebilir. Bu yüzden generatör
barası dışındaki baralar PQ barası olarak alınmıştır. Bu
kabuller ile (2.12) ve (2.13) güç akışı eşitlikleri

$$g_{pi}(x,u) = P_{hati}(x,u) - P_i(x,u) \quad (i=2, \dots, nb) \quad (2.14)$$

$$g_{qi}(x,u) = Q_{hati}(x,u) - Q_i(x,u) \quad (i=ng+1, \dots, nb) \quad (2.15)$$

şeklinde, değişkenlere ait eşitlikler ise

$$x^T = [\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{nb} \quad v_{ng+1}, v_{ng+2}, \dots, v_{nb}] = [\delta^T \quad v_Y^T] \quad (2.16)$$

$$u^T = [P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gng} \quad v_1, v_2, \dots, v_{ng} \quad Q_{ng+1}, Q_{ng+2}, \dots, Q_{nv} \quad t_1, \dots, t_{nt}]$$

$$= [P_G^T \quad v_Y^T \quad Q_C^T \quad t^T] \quad (2.17)$$

vektör matrisleri ile verilebilir. Newton yöntemi kulla-
narak, bilinen u kontrol değişkenleri için $m+1$. iterasyon
sonunda x durum değişkenleri

$$x^{m+1} = x^m + [J(u, x^m)]^{-1} \cdot g(u, x^m) \quad (2.18)$$

denklemleri ile bulunur. (2.18) ifadesi daha açık şekilde ya-
zılacak olursa;

$$\begin{bmatrix} \delta \\ v_Y \end{bmatrix}^{m+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ v_Y \end{bmatrix}^m + [J(u, x^m)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_p(u, x^m) \\ g_q(u, x^m) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

eşitliği elde edilir. (2.19) denkleminde verilen J Jaco-
bien matris yapısı aşağıda gösterilmiştir:

$$J(u, x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial P}{\partial v_Y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial Q}{\partial v_Y} \end{bmatrix} = \begin{matrix} 2 \dots nb & ng+1 \dots nb \\ \begin{matrix} nb \\ ng+1 \\ nb \end{matrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ J_1 & \vdots & J_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_3 & \vdots & J_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

İncelenen sistemlerde bulunan kademeli transformatörlerin (şekil 2.2) bağlı olduğu bara numaraları k ve m ise, çevirme oranı $1:t_{km}$ olmak üzere, bu baralardan enerji iletim hatlarına verilen aktif ve reaktif güçler için aşağıda verilen eşitlikler kullanılmalıdır [56]:

$$P_k = v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j (G_{kj} \cos \delta_{kj} + B_{kj} \sin \delta_{kj}) - v_k v_m t_{km} (gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) + v_k^2 (G_{kk} + t_{km}^2 gt_{km}) \quad (2.21)$$

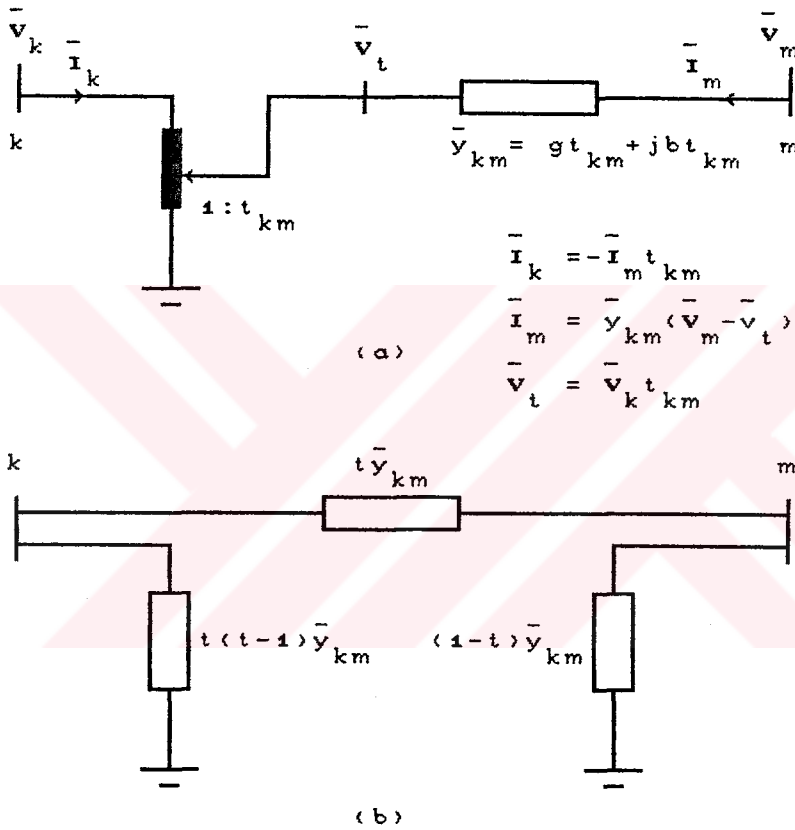
$$Q_k = v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j (G_{kj} \sin \delta_{kj} - B_{kj} \cos \delta_{kj}) - v_k v_m t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} - bt_{km} \cos \delta_{km}) - v_k^2 (B_{kk} + t_{km}^2 bt_{km}) \quad (2.22)$$

$$P_m = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j (G_{mj} \cos \delta_{mj} + B_{mj} \sin \delta_{mj}) - v_k v_m t_{km} (gt_{km} \cos \delta_{mk} + bt_{km} \sin \delta_{mk}) + v_m^2 (G_{mm} + gt_{km}) \quad (2.23)$$

$$Q_m = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j (G_{mj} \sin \delta_{mj} - B_{mj} \cos \delta_{mj}) - v_m v_k t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{mk} - bt_{km} \cos \delta_{mk}) - v_m^2 (B_{mm} + bt_{km}) \quad (2.24)$$

(2.21-24) eşitliklerinde kullanılan $y_{km} = gt_{km} + j \cdot bt_{km}$

ayarlanabilir transformator admitansı, $G_{kk} + jB_{kk}$ ve $G_{mm} + jB_{mm}$ ise sırası ile k ve m baralarına bağlı hatların (transformator admitansı dışında) admitans değerleri toplamıdır. Güç akışı hesaplamaları boyunca transformatorların t kademe ayar değerlerinin değiştirilmesi halinde, sistem admitans matrisinin aynı kalmasının, hesaplamalar açısından kolaylıklar getireceği düşünülerek, Jacobien matris içinde ilave alt matris tanımları yapılmıştır.



Şekil 2.2 (a) Kademeli Transformator Şeması. [56]

(b) Kademeli Transformator Elektriksel Şeması.

J Jacobien matrisinin alt matrisleri olan J_1, J_2, J_3, J_4 matrislerine benzer şekilde, transformatorün bağlı olduğu bara numaralarında tanımlanmak üzere, t alt indisi kullanılarak, J_{1t}, J_{2t}, J_{3t} ve J_{4t} alt matrisleri oluşturulmuş, transformatorün bağlı olmadığı baralarda ise herhangi bir alt indis kullanılmamıştır. Bu işlemler yapılırken transformatorün k ve m adlı baralar arasına bağlı olduğu kabul

edilmiştir. Aşağıda Jacobien matrisi oluşturan alt matrislerin ana köşegen üzerindeki ve ana köşegen dışındaki elemanların değerleri verilmiştir [56]:

$$J_{1i}(i,i) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (-G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.25)$$

$$J_{1i}(i,j) = v_i v_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.26)$$

$$J_{1it}(k,k) = v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (-G_{kj} \sin \delta_{kj} + B_{kj} \cos \delta_{kj}) + v_k v_m t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} - bt_{km} \cos \delta_{km}) \quad (2.27)$$

$$J_{1it}(k,m) = -v_k v_m t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} - bt_{km} \cos \delta_{km}) \quad (2.28)$$

$$J_{1it}(k,j) = v_k v_j (G_{kj} \sin \delta_{kj} - B_{kj} \cos \delta_{kj}) \quad (2.29)$$

$$J_{1it}(m,m) = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (G_{mj} \sin \delta_{mj} - B_{mj} \cos \delta_{mj}) - v_m v_k t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} - bt_{km} \cos \delta_{km}) \quad (2.30)$$

$$J_{1it}(m,k) = v_k v_m t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} + bt_{km} \cos \delta_{km}) \quad (2.31)$$

$$J_{1it}(m,j) = v_m v_j (G_{mj} \sin \delta_{mj} - B_{mj} \cos \delta_{mj}) \quad (2.32)$$

(i, j = 2, 3, ..., nb)*

$$J_2(i,i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2v_i G_{ii} \quad (2.33)$$

* : Salınım barası generatör aktif güç değeri bilinmediği için i satır sayısı 2 den, aynı baranın gerilim faz açısı sabit olduğundan j sütun sayısı 2 den başlar.

$$J_{2t}(i,j) = v_i (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.34)$$

$$J_{2t}(k,m) = -v_k t_{km} (gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) \quad (2.35)$$

$$J_{2t}(k,j) = v_k (G_{kj} \cos \delta_{kj} + B_{kj} \sin \delta_{kj}) \quad (2.36)$$

$$J_{2t}(k,k) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (G_{kj} \cos \delta_{kj} + B_{kj} \sin \delta_{kj}) - \\ v_m t_{km} (gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) + \\ 2v_k (G_{kk} + t_{km}^2 gt_{km}) \quad (2.37)$$

$$J_{2t}(m,m) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (G_{mj} \cos \delta_{mj} + B_{mj} \sin \delta_{mj}) - \\ v_k t_{km} (-gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) + \\ 2v_m (G_{mm} + gt_{km}) \quad (2.38)$$

$$J_{2t}(m,k) = v_m t_{km} (-gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) \quad (2.39)$$

$$J_{2t}(m,j) = v_m (G_{mj} \cos \delta_{mj} + B_{mj} \sin \delta_{mj}) \quad (2.40)$$

(i=2,.....nb) *
(j=ng+1,...nb) **

$$J_g(i,i) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.41)$$

$$J_{gt}(k,k) = v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (G_{kj} \cos \delta_{kj} + B_{kj} \sin \delta_{kj}) - v_m v_m t_{km} \\ (gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) \quad (2.42)$$

*: Salınım barası gerilim faz açısı sabit olduğu için i, satır sayısı 2 den başlamıştır.

** : Generatör baraları gerilim genlik değerleri kontrol değişkeni olduğu için j, sütun sayısı ng+1 den başlamıştır.

$$J_{g,i,j} = -v_i v_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.43)$$

$$J_{g,t,k,m} = v_k v_m t_{km} (gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) \quad (2.44)$$

$$J_{g,t,k,j} = -v_k v_j (G_{kj} \cos \delta_{kj} + B_{kj} \sin \delta_{kj}) \quad (2.45)$$

$$J_{g,t,m,m} = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (G_{mj} \cos \delta_{mj} + B_{mj} \sin \delta_{mj}) + v_m v_k t_{km} (-gt_{km} \cos \delta_{km} + bt_{km} \sin \delta_{km}) \quad (2.46)$$

$$J_{g,t,m,k} = v_k v_m t_{km} (gt_{km} \cos \delta_{km} - bt_{km} \sin \delta_{km}) \quad (2.47)$$

$$J_{g,t,m,j} = -v_m v_j (G_{mj} \cos \delta_{mj} + B_{mj} \sin \delta_{mj}) \quad (2.48)$$

(i=ng+1,...nb) *
(j=2,3,...nb) **

$$J_{4,i,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2v_i B_{ii} \quad (2.49)$$

$$J_{4,i,j} = v_i (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.50)$$

$$J_{4,t,k,m} = -v_k t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} - bt_{km} \cos \delta_{km}) \quad (2.51)$$

$$J_{4,t,k,j} = v_k (G_{kj} \sin \delta_{kj} - B_{kj} \cos \delta_{kj}) \quad (2.52)$$

$$J_{4,t,k,k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (G_{kj} \sin \delta_{kj} - B_{kj} \cos \delta_{kj}) - v_m t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} - bt_{km} \cos \delta_{km}) - 2v_k (B_{kk} + t_{km}^2 bt_{km}) \quad (2.53)$$

* : Güç akışı eşitliklerinde generatör barası reaktif güç değerleri göz önüne alınmadığından, i satır sayısı ng+1 den başlamıştır.

** : Salınım barası gerilim faz açısı sabit olduğundan j sütun sayısı 2 den başlar.

$$J_{4t}(m,m) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k,m}}^{nb} v_j (G_{mj} \sin \delta_{mj} - B_{mj} \cos \delta_{mj}) + \\ v_k t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} + bt_{km} \cos \delta_{km}) - \\ 2v_m (B_{mm} + bt_{km}) \quad (2.54)$$

$$J_{4t}(m,k) = v_m t_{km} (gt_{km} \sin \delta_{km} + bt_{km} \cos \delta_{km}) \quad (2.55)$$

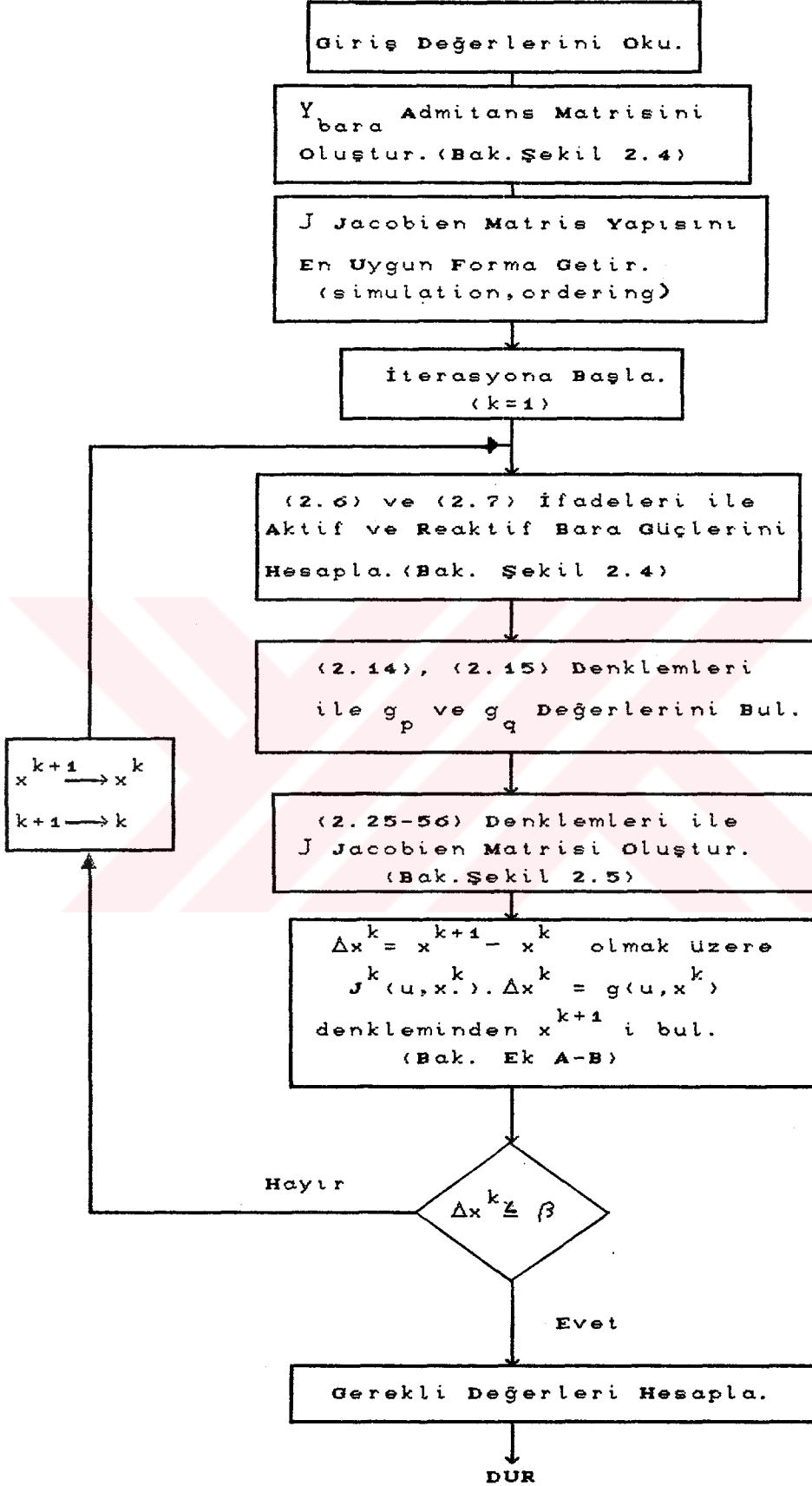
$$J_{4t}(m,j) = v_m (G_{mj} \sin \delta_{mj} - B_{mj} \cos \delta_{mj}) \quad (2.56) \\ (i, j = ng+1, \dots, nb)^*$$

Şekil 2.3 de Newton yöntemi ile güç akışına ilişkin işaret akış diyagramı verilmiştir. Sistemin Y_{bara} admitans matrisi, kullanılan yöntemin gereği, tüm güç akışı işlemleri boyunca bir defa hesaplanmakta, kademeli transformatorün t kademe ayar değerinin değişmesi halinde, yalnızca Jacobien matrisine ilişkin denklemlerde değişiklik yapılmaktadır. Böyle bir yaklaşım optimizasyon hesaplamalarında kolaylık sağlamaktadır. Birbirini izleyen iki iterasyonda durum değişkenleri arasındaki fark Δx olmak üzere, bu algoritmada yer alan

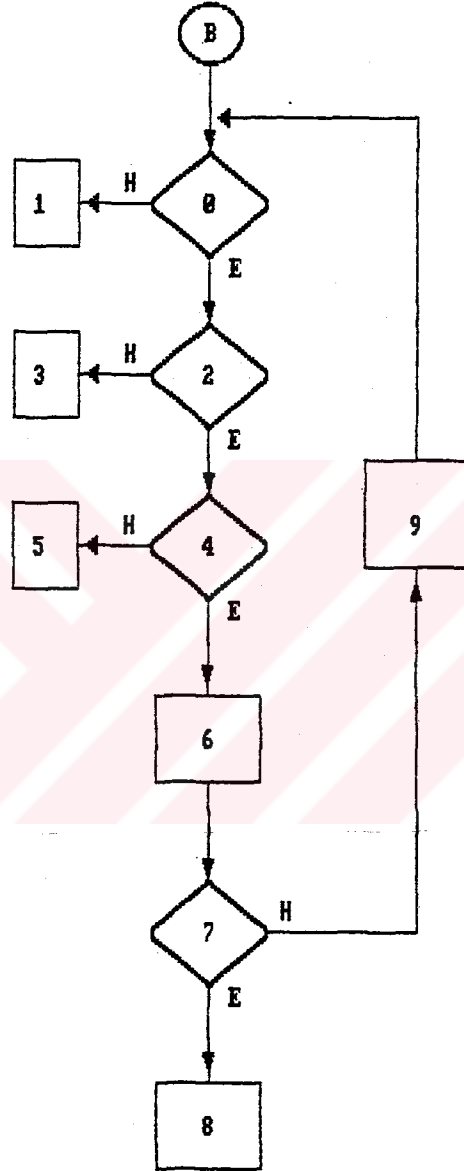
$$J(x, u^k) \cdot \Delta x^k = g(x, u^k) \quad (2.57)$$

denklemini TF (triangular factorization) yöntemi kullanılarak çözülmüştür [54]. Gerek Y_{bara} admitans matrisi, gerekse J Jacobien matrisinin, bellekte en az yer kaplayacak şekilde bilgisayara yüklenmesi için kullanılan işlemler (compacting-ordering) [57-65] ve bunlara ilişkin FORTRAN programlama dilinde yazılmış programlar ise ek A ve ek B de verilmiştir [54]. Şekil 2.4-2.5 deki algoritmalar, Şekil 2.3 ile verilen algoritmaya ilişkin alt programlardır.

* : Generatör reaktif güç değerleri güç akışı işlemlerinde J Jacobien matrisinde gözükmediğinden, i satır sayısı $ng+1$ den, generatör baraları gerilim genlik değerleri ise kontrol değişkeni olduğu için j sütun sayısı $ng+1$ den başlamıştır.



Şekil 2.3 Newton Yöntemi ile Güç Akışı Algoritması



Şekil 2.4 Şekil 2.3 ile Verilen Bara Güçlerinin Hesaplan-
masına Ait Program İşaret Akış Şeması.

0- İncelenen baraya ayarlı transformatör bağlı mı?

1- (2.6) ve (2.7) eşitliklerini kullanarak baralardan hatlara verilen aktif ve reaktif güçleri hesapla.

2- İncelenen baraya bağlı ayarlı transformatör sayısı bir adet den fazla mı?

$$\begin{aligned}
 3- P_k^{tt} &= v_k \sum_{j=1}^{nb} v_j (G_{kj} \cos \delta_{kj} + B_{kj} \sin \delta_{kj}) - v_k v_{m1} t_{km1} \\
 &\quad j \neq k, m1, m2 \\
 &\quad (g_{t_{km1}} \cos \delta_{m1k} + b_{t_{km1}} \sin \delta_{m1k}) - v_k v_{m2} t_{km2} \\
 &\quad (g_{t_{km2}} \cos \delta_{m2k} + b_{t_{km2}} \sin \delta_{m2k}) + v_k^2 (G_{kk} + t_{km1}^2 g_{t_{km1}}) \\
 &\quad + v_k^2 t_{km2}^2 g_{t_{km2}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_k^{tt} &= v_k \sum_{j=1}^{nb} v_j (G_{kj} \sin \delta_{kj} - B_{kj} \cos \delta_{kj}) - v_k v_{m1} t_{km1} \\
 &\quad j \neq k, m1, m2 \\
 &\quad (g_{t_{km1}} \sin \delta_{m1k} - b_{t_{km1}} \cos \delta_{m1k}) - v_k v_{m2} t_{km2} \\
 &\quad (g_{t_{km2}} \sin \delta_{m2k} - b_{t_{km2}} \cos \delta_{m2k}) - v_k^2 (B_{kk} + t_{km1}^2 b_{t_{km1}}) \\
 &\quad - v_k^2 t_{km2}^2 b_{t_{km2}}
 \end{aligned}$$

4- Bu baraya ayarlı transformatör k ucu ile mi bağlı?

5- (2.23), (2.24) yardımı ile aktif ve reaktif güçleri bul.

6- (2.21), (2.22) eşitliklerini kullan.

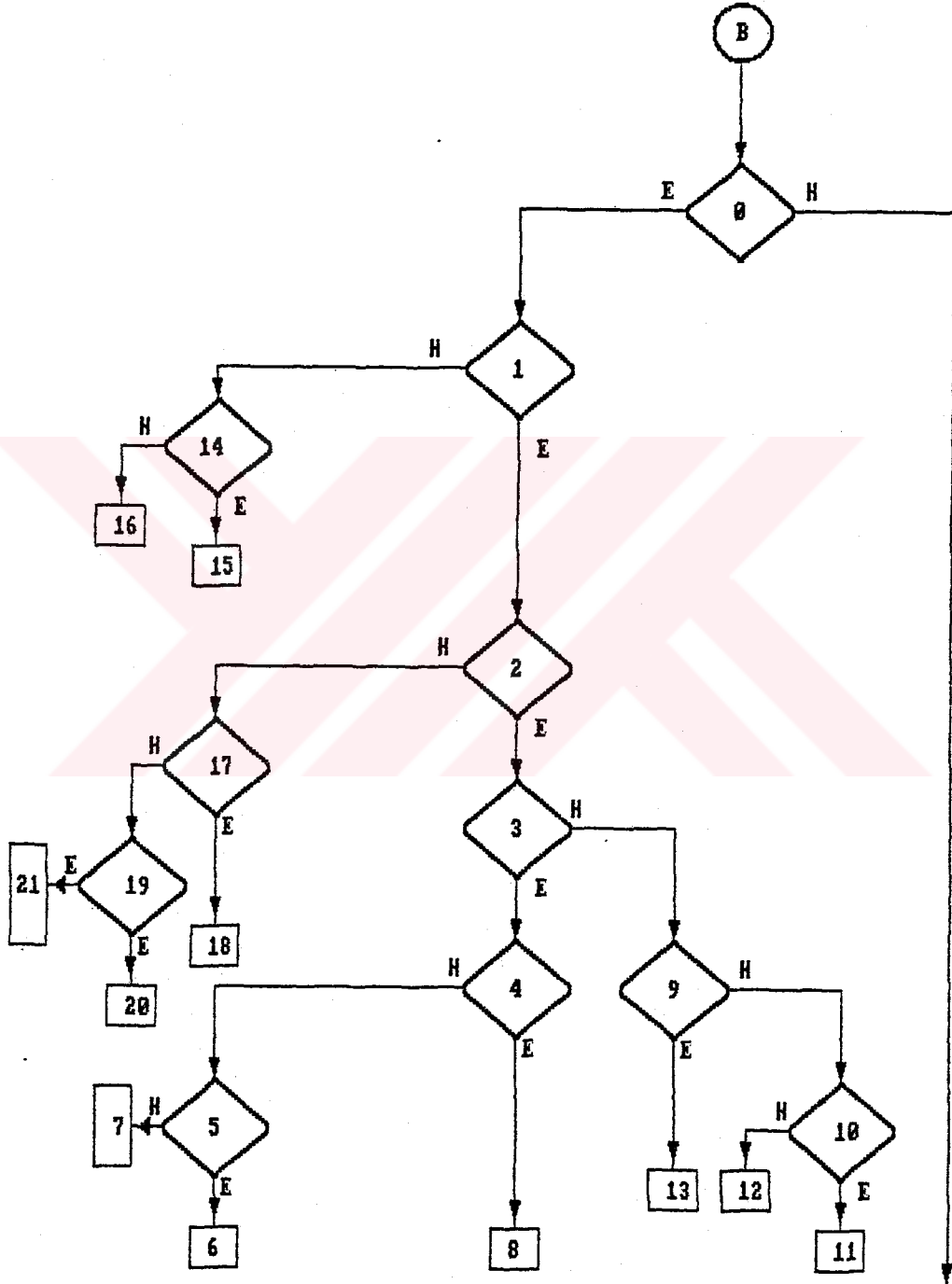
7- Son bara mı?

8- Hesabı durdur.

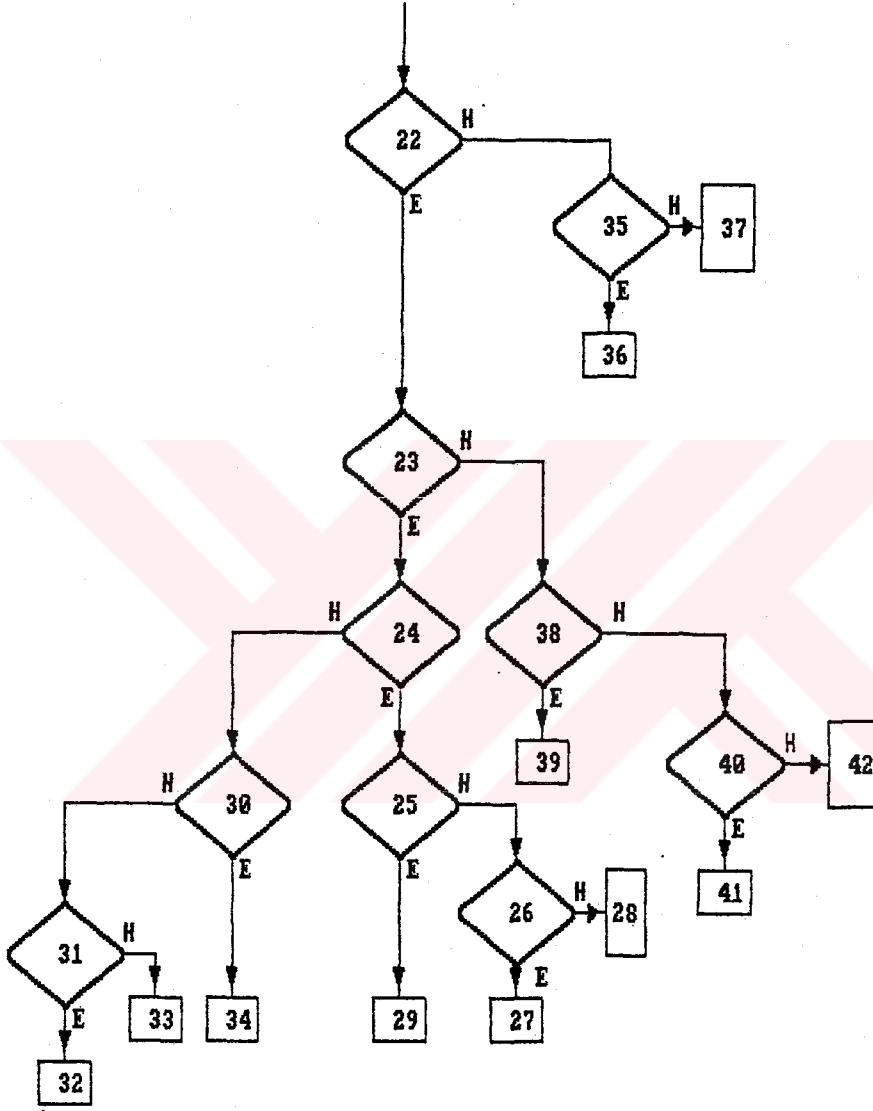
9- Döngü başına dön, incelenen bara numarasını değiştir.

NOT: Bir baraya iki adetten fazla ayar edilebilen transformatör bağlanmadığı kabulü yapılmıştır.

Şekil2.4 Şekil 2.3 ile Verilen Bara Güçlerinin Hesaplan-
masına Ait Program İşaret Akış Şeması (Devamı).



Şekil 2.5 Şekil 2.3 ile Verilen Jacobien Matris Hesaplan-
masına Alt Alt Program İşaret Akış Şeması.



Şekil 2.5 Şekil 2.3 ile Verilen Jacobien Matris Hesaplan-
masına Ait Alt Program İşaret Akış Şeması (Devamı).

- 0- J_1 ya da J_3 matrisleri mi hesaplanacak?
- 1- İncelenen baraya kademeli transformatör bağlı mı?
- 2- Kademeli transformatör sayısı bir adet mi?
- 3- Baraya k ucu ile mi bağlı?
- 4- Ana köşegen üzerindeki elemanlar mı?
- 5- Köşegen dışındaki elemanın değeri transformatörün m no lu ucuyla aynı değerde mi?
- 6- (2.28) ile $J_{1t}(k,m)$, (2.44) ile $J_{3t}(k,m)$ hesapla.
- 7- (2.29) ile $J_{1t}(k,j)$, (2.45) ile $J_{3t}(k,j)$ hesapla.
- 8- (2.27) ile $J_{1t}(k,k)$, (2.42) ile $J_{3t}(k,k)$ hesapla.
- 9- Ana köşegen mi?
- 10- Köşegen dışındaki elemanın değeri transformatörün k no lu ucu ile aynı değerde mi?
- 11- (2.31) ile $J_{1t}(m,k)$, (2.47) ile $J_{3t}(m,k)$ hesapla.
- 12- (2.32) ile $J_{1t}(m,j)$, (2.48) ile $J_{3t}(m,j)$ hesapla.
- 13- (2.30) ile $J_{1t}(m,m)$, (2.46) ile $J_{3t}(m,m)$ hesapla.
- 14- Ana köşegen mi?
- 15- (2.25) ile $J_1(i,i)$, (2.41) ile $J_3(i,i)$ hesapla.
- 16- (2.26) ile $J_1(i,j)$, (2.43) ile $J_3(i,j)$ hesapla.
- 17- Ana köşegen mi?

$$\begin{aligned}
 18- J_1^{tt}(k,k) = & v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m1, m2}}^{nb} v_j (-a_{kj} \sin \delta_{kj} + B_{kj} \cos \delta_{kj}) + \\
 & v_k v_{m1} t_{km1} (g_{t_{km1}} \sin \delta_{km1} - b_{t_{km1}} \cos \delta_{km1}) + \\
 & v_k v_{m2} t_{km2} (g_{t_{km2}} \sin \delta_{km2} - b_{t_{km2}} \cos \delta_{km2})
 \end{aligned}$$

Şekil 2.5 Şekil 2.3 ile Verilen Jacobien Matris Hesaplan-
masına ait Alt Program İşaret Akış Şeması (Devamı).

$$J_3^{tt}(k,k) = v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j (a_{kj} \cos \delta_{kj} + b_{kj} \sin \delta_{kj}) - \\ v_k v_{m1} t_{km1} (gt_{km1} \cos \delta_{km1} + bt_{km1} \sin \delta_{km1}) - \\ v_k v_{m2} t_{km2} (gt_{km2} \cos \delta_{km2} + bt_{km2} \sin \delta_{km2})$$

19- Matrisin ilgili sütunu m_1 ve m_2 den farklı mı?

20- (2.29) ile $J_{1t}(k,j)$, (2.45) ile $J_{3t}(k,j)$ hesapla.

21- (2.28) ile $J_{1t}(k,m_1)$, $J_{1t}(k,m_2)$ hesapla.

(2.44) ile $J_{3t}(k,m_1)$, $J_{3t}(k,m_2)$ hesapla.

22-1 23-2 24-3 25-4 26-5

27- (2.35) ile $J_{2t}(k,m)$, (2.51) ile $J_{4t}(k,m)$ hesapla.

28- (2.36) ile $J_{2t}(k,j)$, (2.52) ile $J_{4t}(k,j)$ hesapla.

29- (2.37) ile $J_{2t}(k,k)$, (2.53) ile $J_{4t}(k,k)$ hesapla.

30-9 31-10

32- (2.39) ile $J_{2t}(m,k)$, (2.55) ile $J_{4t}(m,k)$ hesapla.

33- (2.40) ile $J_{2t}(m,j)$, (2.56) ile $J_{4t}(m,j)$ hesapla.

34- (2.38) ile $J_{2t}(m,m)$, (2.54) ile $J_{4t}(m,m)$ hesapla.

35- 14

36- (2.33) ile $J_2(i,i)$, (2.49) ile $J_4(i,i)$ hesapla.

37- (2.34) ile $J_2(i,j)$, (2.50) ile $J_4(i,j)$ hesapla.

38- 17

$$39- J_2^{tt}(k,k) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m_1, m_2}}^{nb} v_j (a_{kj} \cos \delta_{kj} + b_{kj} \sin \delta_{kj}) - \\ v_{m1} t_{km1} (gt_{km1} \cos \delta_{km1} + bt_{km1} \sin \delta_{km1}) + \\ 2v_k (a_{kk} + t_{km1}^2 gt_{km1}) + 2v_k t_{km2}^2 gt_{km2} - \\ v_{m2} t_{km2} (gt_{km2} \cos \delta_{km2} + bt_{km2} \sin \delta_{km2})$$

Şekil 2.5 Şekil 2.3 ile Verilen Jacobien Matris Hesaplan-
masına ait Alt Program İşaret Akış Şeması (Devamı).

$$\begin{aligned}
J_4^{tt}(k,k) &= \sum_{j=1}^{nb} v_j (a_{kj} \sin \delta_{kj} - b_{kj} \cos \delta_{kj}) - \\
&\quad j \neq k, m1, m2 \\
&\quad v_{m1} t_{km1} (g_{km1} \sin \delta_{km1} - b_{km1} \cos \delta_{km1}) - \\
&\quad 2v_k (b_{kk} + t_{km1}^2 b_{km1}) - 2v_k t_{km2}^2 b_{km2} - \\
&\quad v_{m2} t_{km2} (g_{km2} \sin \delta_{km2} - b_{km2} \cos \delta_{km2})
\end{aligned}$$

40- 19

41- (2.36) ile $J_{2t}(k,j)$, (2.52) ile $J_{4t}(k,j)$ hesapla.42- (2.35) ile $J_{2t}(k,m1)$, $J_{2t}(k,m2)$ hesapla.(2.51) ile $J_{4t}(k,m1)$, $J_{4t}(k,m2)$ hesapla.

Şekil 2.5 Şekil 2.3 ile Verilen Jacobien Matrisi Hesaplan-
masına ait Alt Program İşaret Akış Şeması (Devamı).

Kademe ayarlı transformatörler bulunan bir alternatif akım sisteminde, kademe ayarının her farklı değeri için sisteme ilişkin bara admitans matrisi yeniden hesaplanmaktadır. Bu durum, büyük sayıda bara içeren sistemler için verimli olamamaktadır.

Şekil 2.4 ve 2.5 ile verilen algoritmalar, yapılan çoğu güç akışı çalışmasından farklı bir özelliğe sahiptir. Bu çalışma için geliştirilen ve Şekil 2.5, 2.5 algoritmalarında, kademe ayar değerleri bara admitans matrisine sokulmadan güç akışı hesaplamalarında değişken olarak yer alabilmektedir. Böylece yukarıda belirtilenin tersine kademe ayar değeri değişmesine rağmen, bara admitans matrisinde herhangi bir değişiklik yapılmasına gerek kalmamaktadır. Ayrıca, bu algoritmalar bir baraya iki adet kademe ayarlı transformatörün bağlanması durumunda da gösterildiği şekliyle kolaylıkla kullanılabilirler.

BÖLÜM 3

ÖNERİLEN AYRIK DOĞRU AKIM GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMI

Son yıllarda doğru akım ile güç iletimi, güç sistemlerinde önem kazanmaya başlamıştır. Böyle bir iletim türü, alternatif gerilim ile çalışan birleşik sistemin uygun olan bazı noktaları arasında, doğru akım kullanılarak enerji iletilmesi ile gerçekleşir. Doğru akım ile enerji iletimini seçmeye yönelten etkenlerden bir tanesi, bu tür güç iletiminin, gerek hat maliyetini, gerekse güç kayıplarını azaltmasıdır. Bunun yanı sıra, sürekli ve geçici hallerde sistemi kararlı kılmadaki katkısı, bu iletim türünün seçilmesinde diğer önemli bir etkindir [40],[41],[44]. Son olarak belirtilmesi gereken bir diğer özelliği de, reaktif güç akışını etkileyerek, enerji sisteminin daha rahat kontrol edilmesini sağlamasıdır [66-70].

Günümüzde AA-DA güç akışı yöntemleri arasından modern kontrol teorisindeki gelişmelere açık olanları tercih edilmektedir [71]. Alternatif akım devrelerindeki pasif elemanlardan farklı olarak, doğru akım sistemine ait çeviriciler; güç, akım, gerilim ve açı kontrol elemanları ile donatılmıştır. Sistemdeki kayıpların mümkün olan en alt değerde olabilmesi için, çevirici kontrol açıları alt sınır değerlerinde tutulmaya çalışılır. Bu yüzden sürekli veya geçici halde çeviricinin kontrolü, öncelikle çevirici transformatörünün ayar kademesinin değiştirilmesi ile yapılır. Sistemin kararlı çalışmasını bozabilecek olan ani değişikliklerde ise, çevirici transformatör ayar kademesini kontrol ederek cevap verilebilmesi mümkün olamaz. Bu tür değişikliklere ancak, açı kontrol elemanları kullanarak çok az bir gecikme ile cevap verilebilir.

AA-DA güç akışı hesaplamalarında, alternatif akım hatlarına eklenecek doğru akım hatlarının, çözüm süresini

fazla arttırmaması istenir. Çok kutuplu çevirici terminal-
lerinin katılımı ile çoğalan değişken sayısının, çözüm sü-
resini üstel olarak arttırdığı [48] düşünülürse, uygulan-
ması istenen yöntemde aranan özellikler de artacaktır.

Bu çalışmada kullanılan, AA-DA güç akışı hesaplama-
ları, çok uçlu-tek kutuplu devrelerde kullanılabileceği
gibi, çok uçlu-iki kutuplu doğru akım devrelerinde de kul-
lanılabilir. Bu yöntem ile, doğru akım devresine ait bü-
yüklikler olan, hat akımları, tetikleme açıları, çevirici
gerilimleri ve çevirici transformatörünün kademe ayar de-
ğerlerine ilişkin sınır değerlerini de gözeterek, oldukça
az sayılabilecek sürede yakınsama elde edilebilmektedir.
Ayrıca Newton yöntemine göre daha hızlı olup Jacobien mat-
ris hesaplamaları gerektirmediği için, bilgisayar belleği
kullanımı açısından üstünlüklere sahiptir. Bu yöntem ile
yapılan doğru akım güç akışı ayrık türde olduğundan, tüm
alternatif akım güç akışı hesaplama yöntemleri ile birlik-
te kullanılabilmek özelliğine de sahiptir. Bu yüzden mev-
cut olan alternatif akım güç akışı programları da, yapı-
sında hiç bir değişiklik gerektirmeden AA-DA güç akışı algo-
ritması içinde kullanılabılır.

AA-DA güç akışı çalışmalarında iki çeşit yaklaşım
söz konusudur; birincisi, birleşik çözüm diğeri ayrık çö-
zümdür. Birinci yöntemde AA-DA güç akışı algoritması, tüm
sistemi temsil eden eşitliklerin bir arada göz önüne alın-
ması ve çözülmesi esasına dayanır. İkinci yöntemde ise AA
ile DA devresine ilişkin eşitlikler arasında ileri geri
gidilerek çözüme ulaşılmaya çalışılır.

Genel olarak, birleşik yöntemde doğru akım güç akı-
şına ait eşitlikler, alternatif akım güç akışı eşitlikle-
rine sokularak doğrudan çözülür. Buna örnek olarak Newton
yönteminde kullanılan Jacobien matrisin genişletilmesi ve-
rilebilir. Newton yaklaşımı ile yapılan AA-DA güç akışı
eşitliklerinde [9-11], sisteme konan ilk doğru akım hattı,
Jacobien matris boyutunu 13 arttırır. Böyle bir yaklaşım

doğru akım sistemi büyüklüklerine ait kısıtlamaların gerçekleşmesinde zorluklara neden olduğu gibi Jacobien matrisin tersi alındığında, bilgisayarın bellek gereksinimini de arttırmaktadır.

Ayrık çözümde, doğru akım baralarının her biri alternatif akım sisteminde bir yük olarak düşünülür. Bundan dolayı yukarıda belirtilen zorluk ve olumsuzluklar, ayrık çözümde söz konusu olmaz.

3.1 Alternatif Akım- Doğru Akım Sistem Modeli

Doğru akım sistemini analiz etmeden önce, çevirici ve doğru akım iletim hatlarının modellenmesi gerekmektedir. Modelleme, literatürde genel kabul görmüş varsayımlara dayanarak yapılacaktır. Bu varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- 1-Alternatif akım sistemindeki akım ve gerilime ait ana (birinci) harmonik değerleri dengelidir.
- 2-Ana harmonik dışındaki harmonikler ihmal edilecektir.
- 3-Doğru akım ve gerilim dalga şekillerindeki dalgalılık göz önüne alınmayacaktır.
- 4-Çeviricilerde kullanılan tiristörler ideal anahtar kabul edilecek ve bunların iletim yönünde gerilim düşümlerinin olmadığı, kesim yönünde sonsuz direnç gösterdikleri varsayımı yapılacaktır.
- 5-Çevirici transformatörlerin boşa çalışma akımları ve kayıpları ihmal edilecektir.

Şekil 3.1 de iki uçlu doğru akım iletim hattına ait basit bir model verilmiştir. Şekilde alternatif akım harmoniklerini süzmek için kullanılan filtre, çevirici

transformatörünün alternatif akım tarafına bağlanmıştır. Çevirici transformatörünün modellenmesinde, Π eşdeğer devresi kullanılmıştır. Büyüklüklerin birim (p.u) değerlere dönüşümleri için gerekli eşitlikler aşağıda verilmiştir. Alternatif akım ve doğru akım devrelerine ait temel güç değeri P_{temel} , üç fazlı alternatif akım devresine ait gerilim temel değeri $V_{aatemel}$ (faz arası efektif değer) olmak üzere alternatif akıma ait temel akım ve empedans değeri

$$I_{aatemel} = \frac{P_{temel}}{\sqrt{3} \cdot V_{aatemel}} \quad (3.1)$$

$$Z_{aatemel} = \frac{V_{aatemel}}{\sqrt{3} \cdot I_{aatemel}} \quad (3.2)$$

olur. Doğru akım devresine ilişkin temel güç büyüklüğü P_{temel} ve temel gerilim değeri olarak, çevirici çıkışı faz-toprak gerilimi $V_{datemel}$ alınır, temel gerilim değeri için

$$V_{datemel} = K_b \cdot V_{aatemel} \quad (3.3)$$

yazılabilir. n, seri olarak bağlanan çevirici sayısını göstermek üzere, K_b değeri

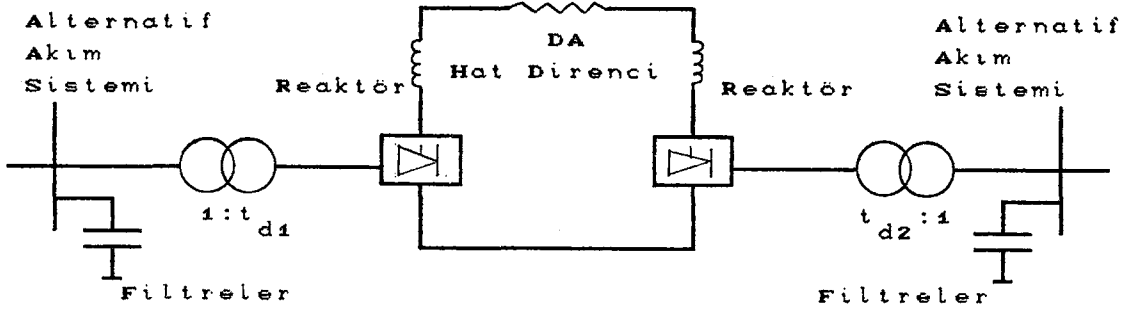
$$K_b = \frac{3\sqrt{2}}{\Pi} n \quad (3.4)$$

eşitliği ile elde edilir. Doğru akım devresinin akım ve empedansına ait temel değerler

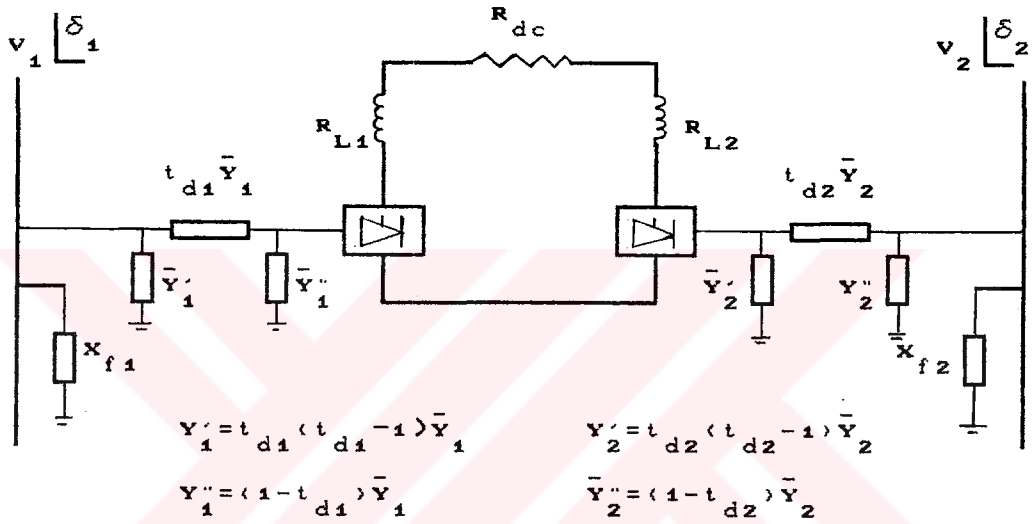
$$I_{datemel} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{aatemel}}{K_b} \quad (3.5)$$

$$Z_{datemel} = K_b^2 \cdot Z_{aatemel} \quad (3.6)$$

ifadeleri ile bulunabilir [49].



(a)



(b)

Şekil 3.1 Doğru Akım İletim Hattı, Çevirici ve Transformatörün; (a)- Modeli (b)-Elektriksel Eşdeğeri.

Doğru akım hattının modellenmesinde kullanılan terimler birim olarak aşağıda tanımlanmıştır:

P_d : Çeviricinin AA sisteminden çektiği aktif güç,

v_d : Çevirici terminali çıkışı doğru gerilim değeri,

v : Çevirici transformatörü primer ucuna ait gerilim,

I_c : Çeviricinin AA barasından çektiği alternatif akım değeri (Yönü çeviriciye doğru ise pozitif, aksi halde negatif değer alır),

I_d : Çevirici terminal çıkışı doğru akım değeri (Doğrultma durumu için pozitif, evirme durumu için negatif değer alır),

δ : Serbest baraya göre AA barası gerilim faz açısı,

φ : Çeviriciye ait alternatif akım faz açısı.

ϕ : $\delta - \varphi$

α : Doğrultucuya ait tetikleme açısı,

γ : Evirici toparlanma (recovery, extinction) açısı,

R_c : Çevirici komutasyon direnci, $\left(\frac{\pi}{6n_1}\right)X_c$

(Doğrultma durumunda pozitif, evirmede negatif olur)

X_c : Çevirici transformatörü artık reaktansı,

t_d : Çevirici transformatörü ayar kademesi,

n_1 : Seri olarak bağlı çevirici sayısı.

Şekil 3.1 de verilen model için doğru gerilim değeri

$$v_d = v \cdot t_d \cdot \cos(\alpha \text{ veya } \gamma) - R_c \cdot I_d \quad (3.7)$$

eşitliği ile bulunabilir. Çevirici ve buna ait transformatör kayıplarının ihmalı ile, doğru ve alternatif akım tarafına ait güçlerin eşitliğinden faydalanarak

$$v_d = v \cdot t_d \cdot \cos\phi \quad (3.8)$$

ifadesi de kullanılabilir.

Şekil 3.2 de görülen doğru akım sisteminde, i. çeviriciye ait açık devre gerilimi e_i , terminal gerilim değeri v_{di} ifadeleri

$$e_i = v_i \cdot t_{di} \cdot \cos(\alpha_i \text{ veya } \gamma_i) \quad (3.9)$$

$$v_{di} = e_i - R_{ci} \cdot I_{di} \quad (3.10)$$

olur. Buna göre, her bir çevirici, kontrol edilebilen bir doğru gerilim kaynağı ve buna seri olarak bağlanan küçük değerde bir direnç ile modellenenebilir. Şekil 3.2 de böyle

$$e_i = e_1 - R_{ci} \cdot I_{d1} + R_{ci} \cdot I_{di} + \sum_{j=2}^m r_{ij} \cdot I_{dj} \quad (i=2..nc) \quad (3.11)$$

olarak hesaplanır [49]. (3.11) ifadesinde verilen terimler aşağıda tanımlanmışlardır:

R_{ci} : i. çeviriciye ait komutasyon direnci (Doğrultma durumu için pozitif, evirme durumu için negatif olur),

nc : Doğru akım sistemindeki çevirici terminal sayısı,

e_i : i. çeviriciye ait açık devre gerilimi,

e_1 : Referans çevirici açık devre gerilimi,

I_{dj} : j. çeviricinin ürettiği doğru akım (Pozitif ise akımın DA sistemine doğru aktığı kabul edilir.),

r_{ij} : Doğru akım sisteminde referans baraya göre oluşturulan bara direnç matrisine ait i. satır j. sütun elemanı.

(3.11) eşitliğinde görülen bara direnç matrisi elemanları içinde komutasyon direnci bulunmamaktadır. Bu direncin matrise ilave edilmemesi, her bir doğru akım yük akışı döngüsünde, $\hat{R}$ matrisinin yeniden hesaplanması gibi ilave bir işlemden kurtulmayı sağlar. Çünkü çeviricilerin durum değişikliğine (doğrultma/evirme veya tersi) uğraması halinde, R_{ci} işaret değiştirir. $\hat{R}$ matrisi ancak doğru akım iletim sisteminde şekil (bağlantı) değişikliği olduğunda değer değiştirmelidir. (3.11) eşitliğinde e_i değerleri daima pozitifdir. e_i değerlerinin

$$e_i \leq v_{dimax} = v_i \cdot t_{di} \cdot \cos(\alpha_{imin} \text{ veya } \gamma_{imin}) \quad (3.12)$$

(i=1,..nc)

ifadesini en az bir çevirici için sağlaması, doğru akım sistemine ait kayıpların azaltılması açısından önemlidir.

Ayrıca I_{di} akımı, I_{dimax} değerini aşmamalıdır. Daha açık deyimle

$$0 \leq I_{di} \leq I_{dimax} \quad \text{doğrultucu için,} \quad (3.13)$$

$$-I_{dimax} \leq I_{di} \leq 0 \quad \text{evirici için,} \quad (3.14)$$

koşulları geçerli olmalıdır. Bunlardan başka doğru akım enerji iletim hattına verilen akımların cebrik toplamı

$$\sum_{i=1}^{nc} I_{di} = 0 \quad (3.15)$$

eşitliğini sağlamalıdır.

Doğru akım sistemine ait her bir çeviricinin alternatif akım sisteminden çektiği P_{di} aktif güç değeri için Gauss iterasyonu kullanılarak, çalışma noktasına ait değerler aşağıdaki hesaplama sırası gözetilerek bulunabilir.

i- İlk olarak v_{di} tahmininde bulunulur. Uygun olan

$$v_{di} = v_{dimax} \quad (i=1, \dots, nc) \text{ alınmasıdır.}$$

ii- I_i , çevirici çıkışı akımı tahmini değeri olmak üzere

$$I_i = P_{di} / v_{di} \quad (3.16)$$

elde edilir.

iii-Çevirici akımlarını bulmak üzere, akım dengeleme yöntemi adı verilebilen, tahmini akım değerleri ile gerçek akım değerleri arasındaki β_1 farkının, minimum yapılması esasına dayanan bir işlem uygulanır.

$$\beta_1 = 0.5 \sum_{i=1}^{nc} \sigma_i \cdot (I_i - I_{di})^2 \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.17)$$

(3.17) eşitliğinde verilen σ_i ağırlık katsayısıdır.

(Kısaca ADY olarak adlandırılacak, akım dengeleme yöntemi hakkında, bölüm içinde gerekli açıklamalar yapılacaktır.)

- iv- (3.12) denklemi en az bir bara için sağlanıp, (3.11) denklemi ile e_i ($i=1,...,nc$) değerleri elde edilir.
- v- (3.10) denklemi kullanılarak tüm v_{di} terminal gerilim değerleri

$$v_{di} = e_i - R_{ci} \cdot I_{di} \quad (i=1,...,m) \quad (3.18)$$

olarak hesaplanır.

- vi- v. adımda elde edilen v_{di} değeri ile , ii. adımda tahmini olarak bulunan v_{di} değeri arasındaki fark verilen bir toleransı aşmıyor ise döngü devam eder, aksi halde v. adımdaki v_{di} değerleri ii. adıma taşınarak aynı işlemler tekrar edilir [49].

3.3 Akım Dengeleme Yöntemi (ADY)

(3.17) ifadesinin çözümü (3.15) kısıtlaması ile birlikte ele alınarak μ amaç ölçüt fonksiyonu

$$\mu(I_{di}, I_i, \lambda) = 0.5 \sum_{i=1}^{nc} \sigma_i \cdot (I_i - I_{di})^2 + \lambda \cdot \sum_{j=1}^{nc} I_{dj} \quad (3.19)$$

($i=1,...,nc$)

elde edilir [49]. (3.19) denkleminde görülen λ , Lagrange çarpanıdır. Genel olarak değişkenler arasındaki ilişkinin

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (3.20)$$

ifadesi ile verildiği kabulü ile bir

$$f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.21)$$

fonksiyonunu minimum yapan değerleri bulmak için Lagrange yöntemi uygulanabilir [35]. Bu yöntem ile yazılabilen

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f}{\partial x_1} + \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial x_1} &= 0 \\
\frac{\partial f}{\partial x_2} + \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial x_2} &= 0 \\
&\vdots \\
\frac{\partial f}{\partial x_n} + \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial x_n} &= 0
\end{aligned} \tag{3.22}$$

n adet denklemden oluşan sistem çözülmeye çalışılır. Yukarıdaki ifadelere, akım dengeleme yöntemi uygulandığında f fonksiyonu olarak (3.17) deki

$$f = \beta_1 = 0.5 \sum_{i=1}^{nc} \sigma_i \cdot (I_i - I_{di})^2 \tag{3.23}$$

ifadesi alınırken, g fonksiyonuna ait değişkenler arasındaki ilişki (3.15) deki

$$g = \sum_{i=1}^{nc} I_{di} = 0 \tag{3.24}$$

denklemini sağlamalıdır. Çok sayıda çevirici içeren AA-DA sistemi için (3.21-22) ifadeleri matrisel formda da

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \cdot I_1 \\ \sigma_2 \cdot I_2 \\ \vdots \\ \sigma_{nc} I_{nc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{nc} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ \vdots \\ I_{dnc} \\ \lambda \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

yazılabilir. (3.25) ifadesi kısaca

$$B = A X \tag{3.26}$$

olarak ifade edilirse, (Bilinmeyen X matrisi, Ek A-B de gösterildiği şekilde çözülebilir) (3.25) eşitliğindeki B matrisinde satır işlemleri yapılarak

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \cdot I_1 \\ \sigma_2 \cdot I_2 \\ \vdots \\ \sigma_{nc} I_{nc} \\ -\sum_{j=1}^{nc} I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{nc} & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{\sigma_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ \vdots \\ I_{dnc} \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

denklemini elde edilir. (3.27) eşitliğinden;

$$\lambda = \left(\sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{\sigma_i} \right)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{nc} I_j \quad (3.28)$$

değeri bulunur. Ayrıca gene aynı denklemden

$$I_{di} = I_i - \frac{\lambda}{\sigma_i} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.29)$$

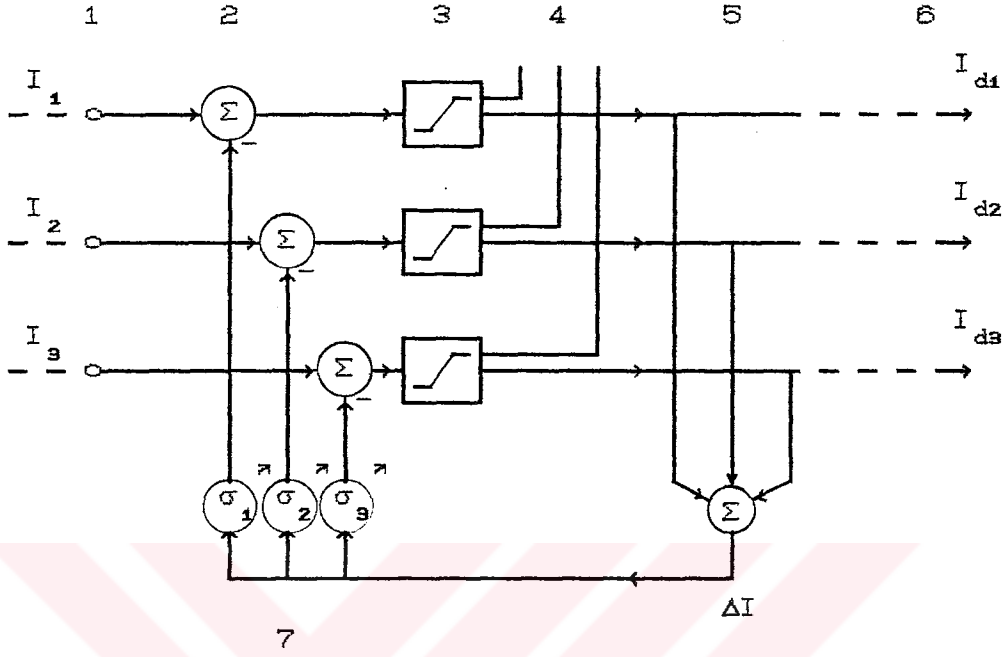
elde edilir. Bu ifadede λ yerine (3.28) ile bulunan değeri kullanılarak

$$I_{di} = I_i - a_i \cdot \sum_{j=1}^{nc} I_j \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.30)$$

yazılabilir. (3.30) denkleminde kullanılan a_i katsayıları;

$$a_i = \left(\sigma_i \cdot \sum_{j=1}^{nc} \frac{1}{\sigma_j} \right)^{-1} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.31)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 3.3 Üç Uçlu DA Enerji İletim Akım Dengeleme Yöntemi Kontrol Şeması. 1-Başlangıç Çevirici Akım Değerleri. 2-Düzeltilmiş Akım Değer İlavesi. 3-Sınırlayıcılar. 4-Limit Değerleri. 5-Fark Akım Toplamı. 6-Çevirici Akımları Sonuç Değerleri. 7-Ayarlanabilir Akım Dağılım Katsayıları.

Şekil 3.3 de 3 uçlu doğru akım enerji iletim sistemi için uygulanan ADY, kontrol mantığı ile incelenmiştir. Başlangıç çevirici akımlarında bir fark veya dengesizlik olduğunda, σ_i dağıtım katsayıları ile oynayarak, doğru akım değerleri değiştirilir. ADY'de şayet çevirici akım değerleri I_{dmax} üst sınır değerini aşarsa, σ_i yardımı ile hesaplanan a_i değeri sıfır olur. Bu sınırı aşmayan a_i değerleri (3.31) denklemi ile hesaplanır. (3.17) denkleminde verilen ve ağırlık katsayıları olarak isimlendirdiğimiz σ_i değerleri (3.17) denkleminde de görüldüğü gibi, gerçek ve

tahmini çevirici akım değerleri arasındaki farkı büyütürler. Bu farkın en aza indirilmesi, istenilen akım değerine en az hata ile yaklaşılmaması anlamına gelecektir.

3.4 Tek Kutuplu-Çok Uçlu DA Sistemlerinde Güç Akışı

Doğru akım güç akışı algoritmasında Gauss iterasyonu kullanılacaktır. Bu algoritma, yapılan bir çok çalışmada yakınsama açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Örneğin 4 uçlu bir doğru akım sisteminde 2 ila 3 iterasyon içinde yakınsama elde edilebilmektedir. Bununla birlikte çevirici gerilimleri, tristör akımları, tetikleme açıları ve çevirici transformatör ayar kademeleri istenilen sınırlar içinde kalabilmektedir [49].

Doğru akım güç akışı algoritması, bu bölüm girişinde tanımlanan birim değerler kullanılarak yapılmıştır. Basitleştirilmiş güç akışı işaret akış şeması şekil 3.4 de verilmiştir. İşleme başlamadan önce, giriş değeri olarak bazı değişken ve parametre değerleri tanımlanmalıdır. Bunlar; β yakınsama toleransı, n_c çevirici istasyon sayısı, DA çevirici ve hat listeleri ile bunlara ait değerlerdir. Doğru akım hat listesinden faydalanılarak oluşturulan bara konduktans matrisinin tersi alınarak $\hat{R}$ bara direnç matrisi elde edilmelidir. Bu işlem yapılırken doğru akım baralarından bir tanesi (Burada 1 numaralı bara) referans bara seçilmelidir. Girişte verilmesi gereken diğer parametreler ise, v_d çevirici çıkış geriliminin alt ve üst sınırı, I_d çevirici akımının üst sınırı, α ve γ tiristör tetikleme açılarının üst sınırları, σ ağırlık katsayıları ve kademeli transformatörün t_d ayar kademesi alt ve üst sınırlarıdır. a_i katsayıları ise (3.32) eşitliği kullanılarak elde edilebilir. Data dosyasında verilmesi gereken değişkenlere ait bilgiler, şekil 3.4 de gösterilmiştir.

Şekil 3.4 de verilen güç akışı iterasyonunda önce I çevirici akımları başlangıç değerleri hesaplanmalıdır. Kayıpların en az değerde tutulabilmesi için, döngü başlangıcında, çevirici açık devre uç geriliminin

$$V_{dimax} = V_i \cdot t_{di} \cdot \cos(\alpha_{imin} \text{ veya } \gamma_{imin}) \quad (3.32)$$

(i=1,...,nc)

ifadesi ile verilen üst sınır değerinde alınması uygun olur. I değerlerini elde etmek için bilinmesi gereken diğer büyüklük ise doğru akım barasının alternatif akım sisteminden çektiği P_d aktif güç değerleridir. Bu değerler, ilk AA-DA güç akışı iterasyonu için, sistemin daha önceki güç akışı sonuçlarına bakılarak tahmin edilirler. Daha sonraki değerler ise ilk güç akışı çalışmasını takip eden optimal güç akışı sonuçlarından bulunur. Bu veriler yardımı ile, I çevirici akımları başlangıç değerleri

$$I_i = P_{di} / V_{dimax} \quad (i=1,...,nc) \quad (3.33)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Daha sonra ADY kullanılarak çevirici akımları

$$I_{di} = I_i - a_i \cdot \Delta I \quad (i=1,...,nc) \quad (3.34)$$

$$\Delta I = \sum_{i=1}^{nc} I_i \quad (i=1,...,nc) \quad (3.35)$$

bulunur. ADY işlemleri boyunca, herhangi bir çevirici akımının belirtilen sınır değerlerinin içinde kalıp kalmadığı kontrol edilmelidir. Sınır değer aşılmış ise aşan akım değeri yerine, bu çeviriciye ait üst sınır değerinin alınması gerekir.

Çevirici akımları değer ve işaretleri ile birlikte elde edildikten sonra, R_{ci} komutasyon direncinin değeri ve işareti bulunur. Aşağıda verilen

$$R_{ci} = |R_{ci} \cdot I_{di}| / I_{di} \quad (i=1,...,nc) \quad (3.36)$$

ifadesi ile komutasyon direncinin işareti belirlenebilir. Daha sonra çevirici açık devre gerilimleri hesaplanır. 1 numaralı doğru akım barası referans alınarak, doğru akım enerji iletim sistemine düğüm gerilimleri yönteminin uygulanması ile

$$e_i = e_1 - R_{ci} \cdot I_{di} + R_{ci} \cdot I_{di} + \sum_{j=2}^{nc} r_{ij} \cdot I_{dj} \quad (i=2, \dots, nc) \quad (3.37)$$

çevirici açık devre gerilim değerleri elde edilebilir. Bulunan bu ifadede ilk iterasyon için $e_1=1$ birim alınır. Daha sonraki iterasyonlarda ise bu değer, optimizasyon sonuçlarından faydalanılarak bulunur. Yukarıda elde edilen e_i değerlerinin üst sınırları

$$e_i \leq v_{dimax} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.38)$$

ifadesi kullanılarak kontrol edilmelidir. Aşma varsa, tüm e_i değerleri aşan miktar kadar aşağıya indirilmelidir. Bulunan e_i değerleri

$$v_{di} = e_i - R_{ci} \cdot I_{di} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.39)$$

denkleminde kullanılarak çeviricilere ait uç gerilimleri elde edilir. Bulunan v_{di} değerleri, döngü başlangıcındaki değerlerinden, β toleransını aşacak kadar farklı ise

$$I_i = P_{di} / v_{di} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.40)$$

eşitliğini kullanarak yeni çevirici çıkış akımları elde edilir. Bu değerler ile (3.34) hesaplamalarına tekrar dönlür. Bu işlemlere, döngü başı ile sonundaki v_{di} değerleri arasındaki fark, β toleransı içinde kalıncaya kadar devam edilir.

Yakınsama elde edilince çeviricilere ait tetikleme açıları

$$\alpha_i, \gamma_i = \arccos\left(\frac{e_i}{v_i \cdot t_{di}}\right) \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.41)$$

eşitliği ile, $\phi_i = \delta_i - \alpha_i$ faz farkları

$$\phi_i = \arccos\left(\frac{v_{di}}{v_i \cdot t_{di}}\right) \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.42)$$

eşitliği ile, reaktif güç değerleri ise, $P_{di} = v_{di} \cdot I_{di}$ kullanılarak;

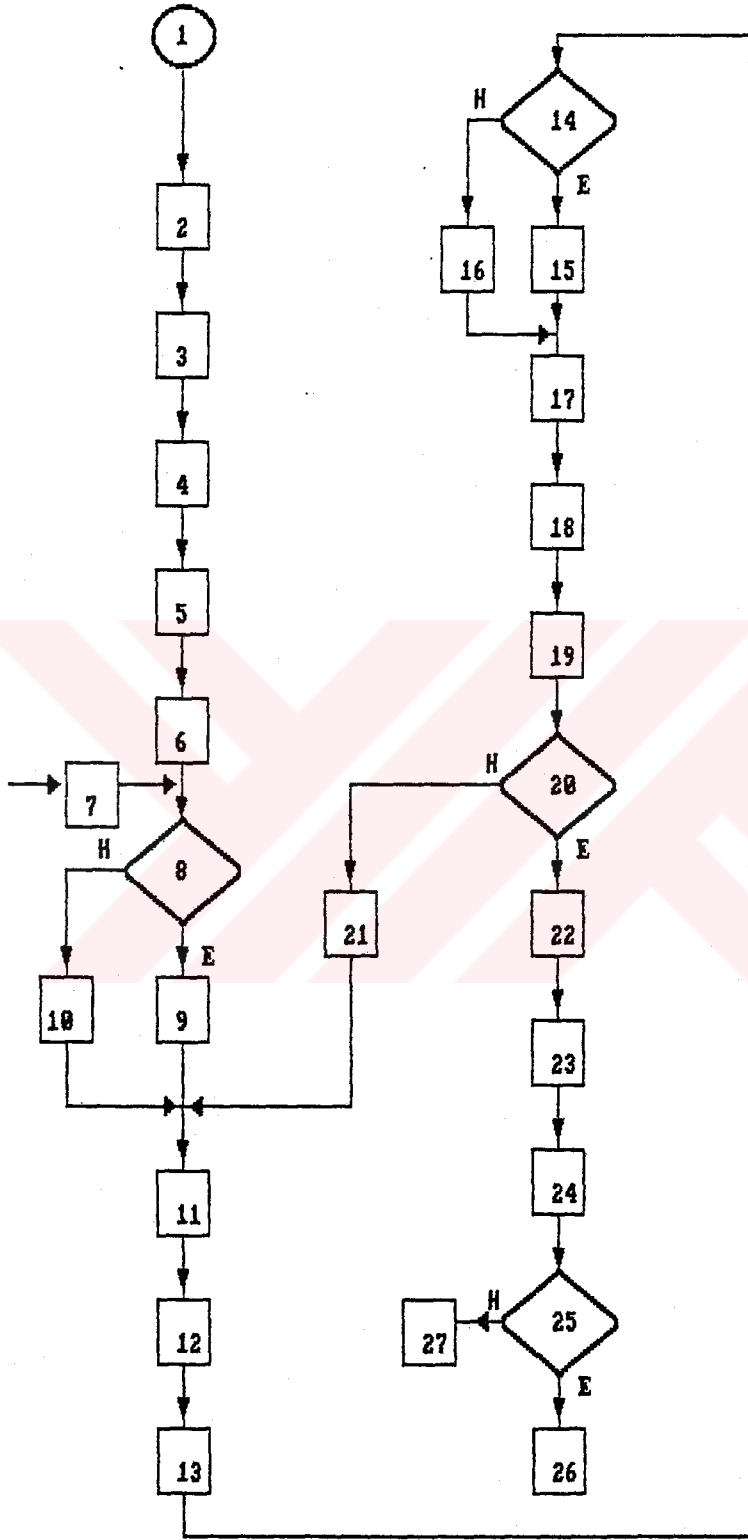
$$Q_i = |P_{di} \cdot \tan \phi_i| \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.43)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Doğru akım enerji iletim hatlarından akan aktif güç değeri ise, $(i \rightarrow j)$ enerji akış yönü için

$$P_{ij} = \frac{v_{di} - v_{dj}}{R_{ij}} \cdot v_{di} \quad (i, j=1, \dots, nh) \quad (3.44)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. R_{ij} , i . ve j . düğümler arasındaki hat direnci, nh ise doğru akım hatları sayısıdır.

Şekil 3.4 de doğru akım güç akışının işaret akış şeması verilmiştir. Doğru akım sistemine ait değerler giriş verilerinde okunmakta, hesaplamalara ait diğer değerler, alternatif akım güç akışı sonuçlarından alınmaktadır. Gerekli hesaplamalar yapıldıca, eğer doğru akım güç akışı algoritması tek bir döngüde sona ermiş ise optimizasyon algoritmasına, aksi halde alternatif akım güç akışı algoritmasına dönülmesi gerekmektedir.



Şekil 3.4 Optimal Güç Akışı Hesaplamalarında Kullanılan Doğru Akım Güç Akışı İşaret Akış Şeması

- 1- Başla
- 2- İterasyon limitleri yakınsama toleransı, çevirici numaraları, çevirici bara bağlantı listesi, doğru akım hat değerlerini gir.
- 3- 1 numaralı doğru akım çevirici barasını referans kabul ederek bara direnç matrisini oluştur.
- 4- Çeviricilere ait parametreleri, başlangıç tetikleme açılarını, transformatör kademe ayarları ve limitlerini, çevirici çıkış gerilimi ile bu gerilimin üst sınır değerlerini gir.
- 5- Çevirici akım limitlerini, tetikleme açısı limitlerini, ağırlık katsayılarını gir.
- 6- a_i katsayılarını hesapla. ($i=1,..,nc$)
- 7- AA güç akışı sonuçlarından V_i , δ_i değerlerini, ilk iterasyon değilse, optimal güç akışı sonuçlarından P_{di} , t_{di} ($i=1,..,nc$), v_{d1} değerlerini gir.
- 8- İlk döngü mü?
- 9- $v_{di} = v_{dimax} = V_i \cdot t_{di} \cdot \cos(\alpha_{imin} \text{ veya } \gamma_{imin})$ ($i=1,..,nc$)
- 10- $v_{di} = v_{dimax} = V_i \cdot t_{di} \cdot \cos(\alpha_{imin} \text{ veya } \gamma_{imin})$ ($i=2,..,nc$)
- 11- Çevirici çıkış akım kabulü yap;
 $I_i = P_{di} / v_{di}$ ($i=1,..,nc$)
- 12- ADM ile çevirici çıkış akımlarını bul;

$$I_{di} = I_i - a_i \cdot \sum_{j=1}^{nc} I_j \quad (i=1,..,nc)$$
- 13- Çeviricilerin çalışma durumunu (doğrultucu /evirici) ve komutasyon dirençlerini bul;
 $R_{ci} > 0$ (doğrultucu), $R_{ci} < 0$ (evirici)
- 14- İlk döngü mü?
- 15- $e_1 = 1$ birim

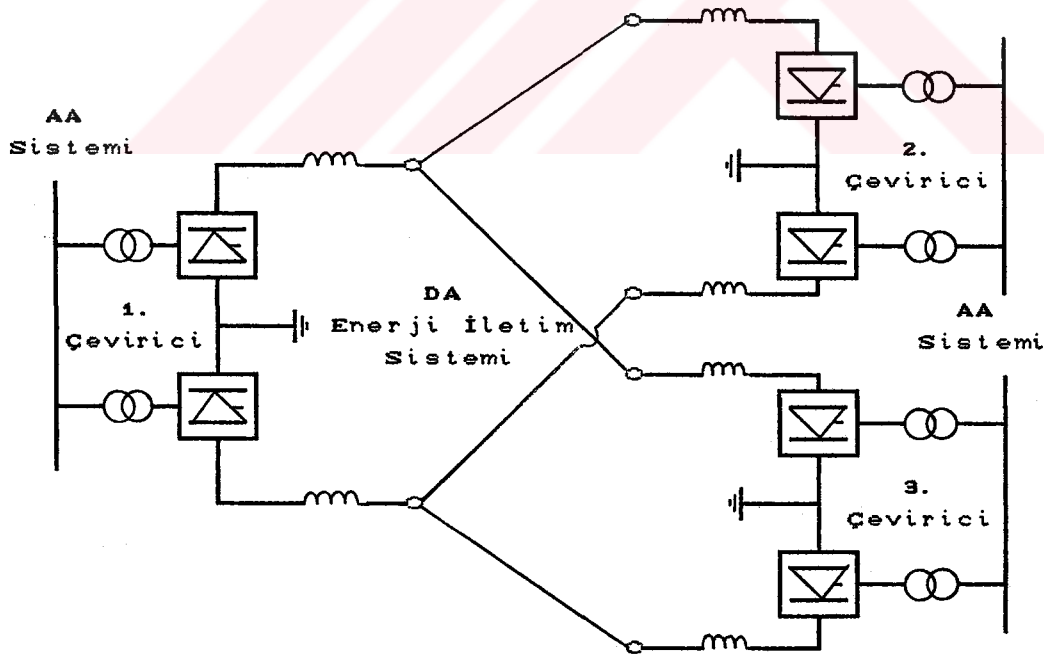
Şekil 3.4 Optimal Güç Akışı Hesaplamalarında Kullanılan Doğru Akım Güç Akışı İşaret Akış Şeması. (Devamı)

- 16- $e_1 = v_{d1} + I_{d1} \cdot R_{c1}$
- 17- Çevirici açık devre gerilim değerlerini hesapla;
- $$e_i = e_1 - R_{c1} \cdot I_{d1} + R_{ci} \cdot I_{di} + \sum_{j=2}^{nc} r_{ij} \cdot I_{dj} \quad (i=2, \dots, nc)$$
- 18- $e_i \leq v_{dimax}$ sağlanmıyorsa e_1 değerini ayarla.
- 19- $v_{di} = e_i - I_{di} \cdot R_{ci} \quad (i=1, \dots, nc)$ değerinin alt ve üst sınırlarını kontrol et. Sınırlar aşılmıyorsa v_{di} değerlerini ayarla.
- 20- v_{di} nin 11. işlem öncesi değeri ile 19. işlem sonunda ki değeri arasındaki farkı kontrol et. v_{di} girişte verilen tolerans içinde kalıyor mu?
- 21- v_{di} nin yeni değerleri ile hesaplamalara tekrar başla.
- 22- çevirici tetikleme açılarını hesapla;
- $$\alpha_i, \gamma_i = \arccos\left(\frac{e_i}{v_i \cdot t_{di}}\right) \quad (i=1, \dots, nc)$$
- 23- $\phi_i = \arccos\left(\frac{v_{di}}{v_i \cdot t_{di}}\right) \quad (i=1, \dots, nc)$
- 24- $P_{di} = v_{di} \cdot I_{di}$ kullanarak; $Q_{di} = |P_{di} \cdot \tan \phi_i|$ hesapla.
($i=1, \dots, nc$)
- 25- Alternatif akım- doğru akım algoritması tek bir iterasyonda yakınsadı mı?
- 26- DA güç akışı hesaplamalarından çık, optimizasyon hesaplamalarına git.
- 27- Doğru akım güç akışı algoritmasına ilişkin sonuçları, alternatif akım güç akışı hesaplamalarına taşı.

Şekil 3.4 Optimal Güç Akışı Hesaplamalarında Kullanılan Doğru Akım Güç Akışı İşaret Akış Şeması. (Devamı)

3.5 İki Kutuplu- Çok Uçlu DA Sistemleri

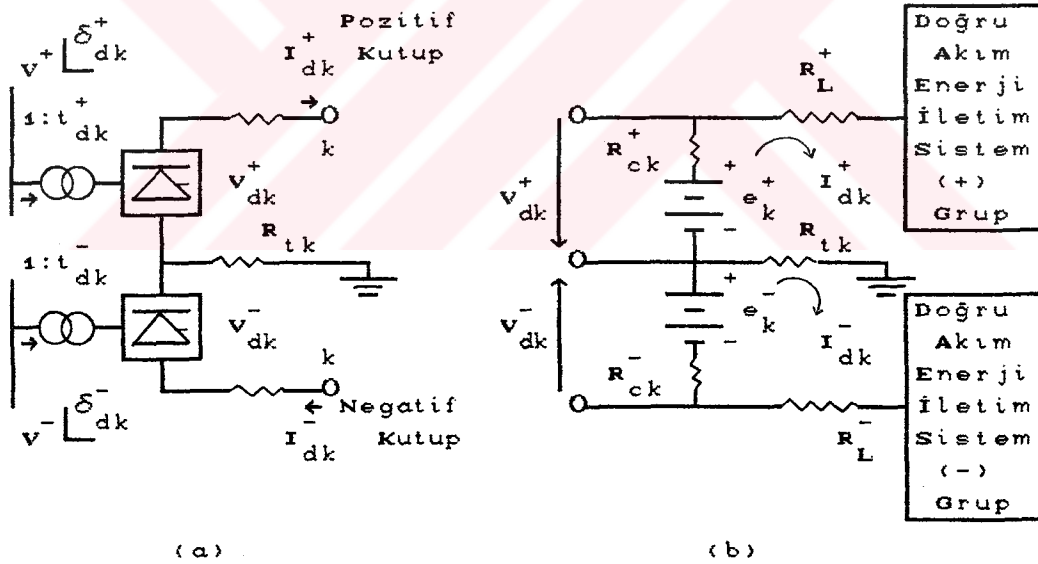
Bu alt bölümde iki kutuplu (bipolar) DA sistemleri tanıtılacak ve doğru akım güç akışı algoritması hakkında açıklamalar yapılacaktır. Normal olarak iki kutuplu doğru akım enerji iletim sistemleri, biri pozitif, diğeri negatif polaritede olmak üzere, iki adet iletkenine sahiptirler. İki kutuplu bir istasyonda, aynı gerilim ve güç değerinde çalışan, doğru akım sistemine seri olarak bağlı iki adet çevirici grubu mevcuttur. İki kutup arasındaki birleşme yeri, nötr noktası olarak adlandırılır ve bu noktada genellikle topraklanır. Bu iki ayrı çevirici bağımsız olarak çalıştırılabileceği gibi, topraklama akımı yok edilerek eşit akım değerlerinde de yüklenebilir. Şekil 3.5 de iki kutuplu çok uçlu radyal iletim hattı şeması verilmiştir. İki kutuplu sistemin kontrolü, toprak akımı ile ilgili hesaplamalar dışında, tek kutuplu sistemlerdeki gibidir.



Şekil 3.5 İki Kutuplu, Çok Uçlu, Radyal Beslemeli Doğru Akım İletim Hattı Şeması.

3.5.1 Sistem Modeli

İki kutuplu sistemdeki her bir kutubun yapısı, tek kutuplu sistemdeki yapının aynısıdır. Şekil 3.6 da iki kutuplu çevirici istasyon şeması verilmiştir. Şekilde nötr noktası ile toprak arasındaki direnç, R_t ile gösterilerek, + indisi ile belirtilen büyüklükler pozitif gurubu - indisi ile gösterilenler ise negatif gurubu belirtmektedir. İki kutuplu çalışmada toprak ucu, akım dönüş yoludur. Bu yol, ya sürekli olarak kullanılır, ya da acil durumlarda geçici olarak kullanılır. Toprak üzerinden tamamlanan dönüş yolu direnci, metalik bağlantılı dönüş yollarına göre oldukça düşük dirence sahiptir. Kullanılan çözüm yönteminde her bir çeviricinin nötr noktası, bir baraya karşı düşürülebilir [49].



Şekil 3.6 İki Kutuplu Çevirici a) Sistem Modeli. b) Elektriksel Eşdeğeri

Verilen modelde i . terminalin nötr noktasına ait gerilim değeri

$$v_{ni} = \sum_{j=1}^{nc} r_{ij}^t (I_{dj}^- - I_{dj}^+) \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.45)$$

denklemleri ile verilebilir. (3.45) denklemi ile belirlenen r_{ij}^t direnç değeri, R^t bara direnç matrisinin (i,j) numaralı elemanını göstermektedir. (3.47) denkleminin elde edilmesi için çevirici nötr noktalarından bir tanesi referans olarak kullanılabileceği gibi, ayrı bir toprak noktası da referans olarak alınabilir [49].

3.5.2 İki Kutuplu DA Güç Akışı Algoritması

İki kutuplu sisteme ait güç akışı algoritması yapı olarak bir kutuplu gibidir:

$$e_i^+ = e_1^+ - R_{c1}^+ \cdot I_{d1}^+ + R_{t1} \cdot (I_{d1}^- - I_{d1}^+) + R_{ci}^+ \cdot I_{di}^+ - R_{ti} \cdot (I_{di}^- - I_{di}^+) + \sum_{j=2}^{nc} r_{ij}^+ \cdot I_{dj}^+ \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.46)$$

$$e_i^- = e_1^- - R_{c1}^- \cdot I_{d1}^- - R_{t1} \cdot (I_{d1}^- - I_{d1}^+) + R_{ci}^- \cdot I_{di}^- + R_{ti} \cdot (I_{di}^- - I_{di}^+) + \sum_{j=2}^{nc} r_{ij}^- \cdot I_{dj}^- \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.47)$$

Yukarıdaki eşitliklerde görülen R_{ti} değeri, i . çeviriciye ait nötr noktası topraklama direncidir. e_i^+ ve e_i^- değerlerinin daima pozitif olduğu düşünülerek

$$e_i^+ \leq v_{imax}^+ = v_i^+ \cdot t_{di}^+ \cdot \cos(\alpha_{imin}^+ \text{ veya } \gamma_{imin}^+) \quad (3.48)$$

$$e_i^- \leq v_{imax}^- = v_i^- \cdot t_{di}^- \cdot \cos(\alpha_{imin}^- \text{ veya } \gamma_{imin}^-) \quad (3.49)$$

($i=1, \dots, nc$)

şeklinde ifade edilebilir. Yukarıda verilen her bir ifadenin en az bir çevirici için eşitlik olarak sağlanması, kayıpların azaltılması bakımından iyi olur. Çevirici

akımının üst sınırı için

$$0 \leq (I_{di}^+, I_{di}^-) \leq I_{dimax} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.50)$$

eşitsizliği sağlanmalıdır. Ayrıca her bir kutuba ait akım değerleri toplamı ayrı ayrı

$$\sum_{i=1}^{nc} I_{di}^+ = 0 \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.51)$$

$$\sum_{i=1}^{nc} I_{di}^- = 0 \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.52)$$

olmalıdır. İki kutuplu çevirici istasyonlarında, sistem çalışma esnasında meydana gelecek ani değişikliklere izin verebilir. Her bir kutup istenirse diğerinden bağımsız, farklı güçler, akımlar ve gerilimlerde çalıştırılabilir. Doğru akım yük akışı hesaplamasına ait iterasyon adımları aşağıda verilmiştir;

i- Öncelikle sürekli halde, çevirici terminalleri gerilimleri için ilk değerler tesbit edilir. En uygun tahmin

$$v_{di}^+ = v_{dimax}^+ \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.53)$$

$$v_{di}^- = -v_{dimax}^- \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.54)$$

olarak yapılabilir.

ii-Çevirici başlangıç akım değerleri hesaplanır;

$$I_i^+ = P_{di}^+ / v_{di}^+ \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.55)$$

$$I_i^- = -P_{di}^- / v_{di}^- \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.56)$$

iii- I_{di}^+ ve I_{di}^- akımları dengelenir. Bu işlem daha önce bir kutuplu sistemlerde yapıldığı gibi her bir

çevirici bağımsız olarak ele alınıp akım dengeleme yöntemi uygulanabileceği gibi, toprak akımlarını içine alan bir β_1 hata fonksiyon tanımı yapılarak da çözüme gidilebilir:

$$\begin{aligned} \beta_1 = 0.5 \cdot \sum_{i=1}^{nc} \sigma_i^+ \cdot (I_i^+ - I_{di}^+)^2 &+ 0.5 \cdot \sum_{i=1}^{nc} \sigma_i^- \cdot (I_i^- - I_{di}^-)^2 \\ &+ 0.5 \cdot \sum_{i=1}^{nc} \rho_i \cdot (I_{di}^- - I_{di}^+)^2 \end{aligned} \quad (3.57)$$

Bu denklemde verilen çevirici akımları (3.51), (3.52), (3.53) ve (3.54) denklemlerini sağlamalıdır. σ_i^+ ve σ_i^- her iki çevirici grubuna ait ağırlık katsayılarıdır. ρ_i ise i. çeviriciye ait toprak akımı yoğunluk katsayısıdır. İki kutuplu sisteme ait diğer açıklamalar bölümünde verilecektir.

- iv- (3.46) ve (3.47) denklemleri kullanılarak açık devre gerilimleri e_i^+ ve e_i^- değerleri bulunur.
- v- Çevirici çıkışı doğru gerilim değerleri;

$$v_{di}^+ = e_i^+ - R_{ci}^+ \cdot I_{di}^+ \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.58)$$

$$v_{di}^- = -e_i^- + R_{ci}^- \cdot I_{di}^- \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.59)$$

ifadeleri ile elde edilir.

- vi- i. ve iv. adımları arasında yapılan hesaplamalar, çevirici çıkış gerilimleri arasındaki fark, belirlenen toleransın altında kalıncaya kadar devam eder.

Daha sonraki iterasyon adımları bir kutuplu sistemlerdeki gibidir. ρ yoğunluk katsayısının değerini, istasyonlar arasındaki toprak akım dağılımındaki istekler belirler. Şekil 3.6 da verildiği gibi toprak akımının yok

edilmesi, pozitif ve negatif kutup akımlarının birbirine eşit olması ile mümkündür. Toprak akımlarının yok edildiği istasyon bara numaraları g_1 ile isimlendirilen bir kümede birleştirilir ve (3.55-56) denklemleri kullanılırsa

$$I_i = \frac{P_{di}^+ + P_{di}^-}{V_{di}^+ - V_{di}^-}, \quad i \in g_1 \quad (3.60)$$

ifadesi elde edilir. (3.60) eşitliğinin gerçekleşmesi

$$I_i = I_i^- = I_i^+ \quad (3.61)$$

ifadesine bağlıdır. Geriye kalan çevirici akımları (3.55) ve (3.56) ifadeleri ile hesaplanabilir. Toprak akımlarının yok edildiği terminaller için ($i \in g_1$), pozitif ve negatif kutuplara ait terminal akımları

$$I_{di}^{+(-)} = I_i^{+(-)} - a_i^{+(-)} \cdot \sum_{j=1}^{nc} I_j^{+(-)} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.62)$$

ve a_i katsayıları

$$a_i^{+(-)} = \left(\sigma_i^{+(-)} \sum_{j=1}^{nc} \frac{1}{\sigma_j^{+(-)}} \right)^{-1} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3.63)$$

ifadesi ile hesaplanır. (3.60-3.63) ifadeleri ($i \in g_1$) terminalleri için geçerlidir.

İki kutuplu sistem için yapılan işlemler, tek kutuplu sistem için yapılanlar gibidir. Fakat toprak akımının varlığından dolayı, ilave işlemler gerekmektedir. Yukarıda yapılan işlemlerden farklı bir yöntemle çevirici akımlarını bulmak da mümkündür. (3.51-52) kısıtlamaları altında β_1 fark fonksiyonunu minimum yapmak üzere Lagrange yöntemini kullanarak, (pozitif grup için λ^+ , negatif grup için λ^-) aşağıda verilen denklemler elde edebilebilir:

$$\frac{\partial \beta_1}{\partial I_{di}^+} + \frac{\partial (\lambda^+ \sum_{k=1}^m I_{dk}^+)}{\partial I_{di}^+} + \frac{\partial (\lambda^- \sum_{l=1}^n I_{dl}^-)}{\partial I_{di}^+} = 0 \quad (i=1, \dots, m) \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial \beta_1}{\partial I_{dj}^-} + \frac{\partial (\lambda^+ \sum_{k=1}^m I_{dk}^+)}{\partial I_{dj}^-} + \frac{\partial (\lambda^- \sum_{l=1}^n I_{dl}^-)}{\partial I_{dj}^-} = 0 \quad (j=1, \dots, n) \quad (3.65)$$

Yukarıda verilen ifadeler genel bir duruma, yani pozitif kutup çevirici sayısı m , negatif çevirici kutup sayısı n olması haline göre verilmiştir. (3.64-65) denklemlerinden;

$$\sigma_i^+ \cdot I_i^+ = \sigma_i^+ \cdot I_{di}^+ + \lambda^+ - \rho_i \cdot (I_{di}^- - I_{di}^+) \quad (i=1, \dots, m) \quad (3.66)$$

$$\sigma_j^- \cdot I_j^- = \sigma_j^- \cdot I_{dj}^- + \lambda^- + \rho_j \cdot (I_{dj}^- - I_{dj}^+) \quad (j=1, \dots, n) \quad (3.67)$$

ifadeleri elde edilir. Tek kutuplu çeviricilerde yapıldığı gibi; (3.51), (3.52), (3.66) ve (3.67) kullanılarak

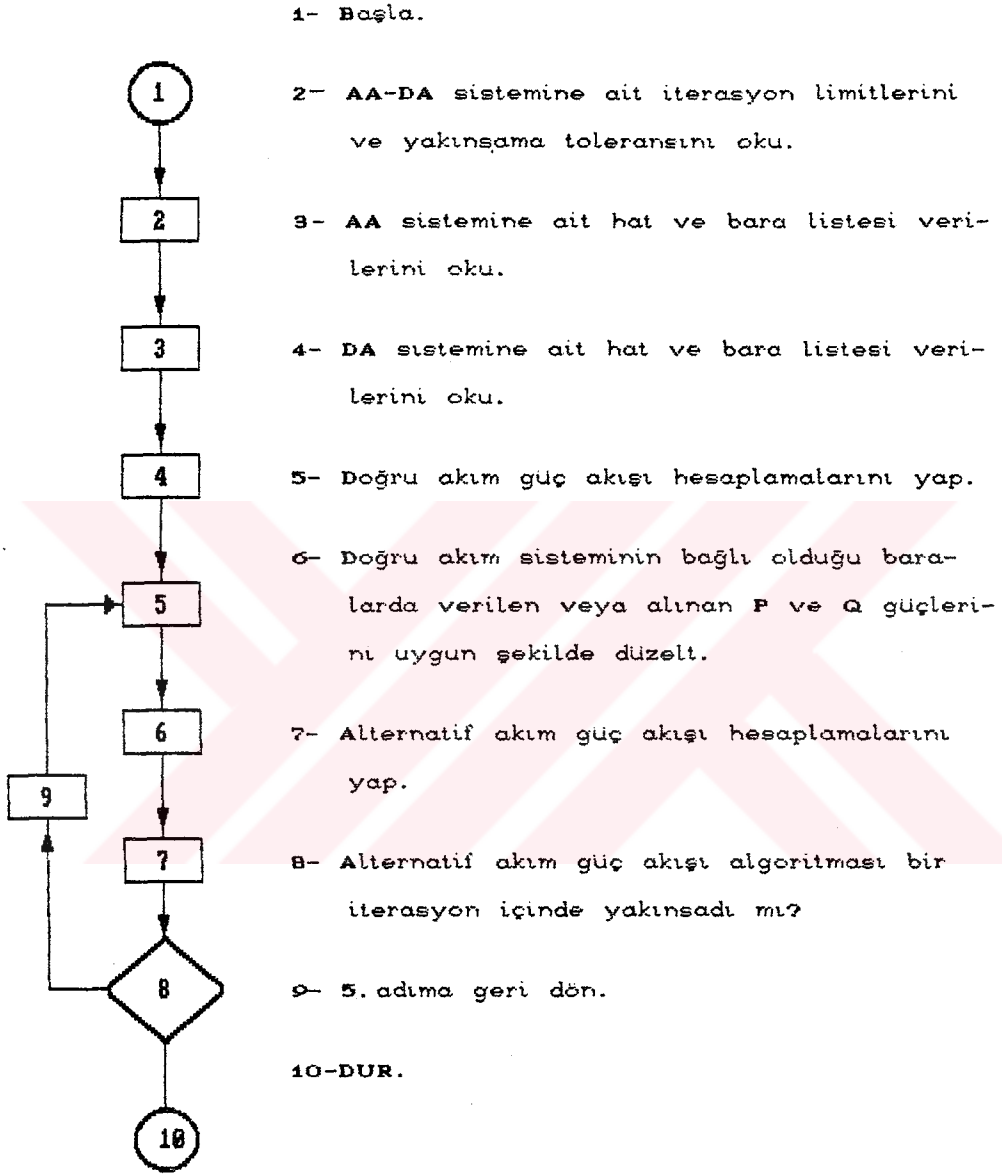
$$\begin{bmatrix} \sigma_1^+ \cdot I_1^+ \\ \sigma_2^+ \cdot I_2^+ \\ \vdots \\ \sigma_m^+ \cdot I_m^+ \\ \sigma_1^- \cdot I_1^- \\ \sigma_2^- \cdot I_2^- \\ \vdots \\ \sigma_n^- \cdot I_n^- \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1^+ + \rho_1 & 0 & \dots & 0 & -\rho_1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sigma_2^+ + \rho_2 & \dots & 0 & 0 & -\rho_2 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m^+ + \rho_m & 0 & 0 & \dots & -\rho_m & 1 & 0 \\ -\rho_1 & 0 & \dots & 0 & \sigma_1^- + \rho_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\rho_2 & \dots & 0 & 0 & \sigma_2^- + \rho_2 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\rho_n & 0 & 0 & \dots & \sigma_n^- + \rho_n & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d1}^+ \\ I_{d2}^+ \\ \vdots \\ I_{dm}^+ \\ I_{d1}^- \\ I_{d2}^- \\ \vdots \\ I_{dn}^- \\ \lambda^+ \\ \lambda^- \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

elde edilir. (3.66-67) ifadeleri (3.68) deki gibi de yazılabilir. (3.68) matris denklemi, (3.57) de verilen ifade ile benzer şekilde çözülebilir (Ek [A-B]). İki kutuplu çeviriciye ait güç akışı işlemlerinde, (3.68) eşitliğinden sonrası için yapılması gereken işlemler, bir kutuplu çeviricide yapılanlar gibidir. Tek kutuplu çeviricide tek kutup için yapılan işlemler, burada pozitif ve negatif kutuplar için ayrı ayrı yapılır ve her birinde ayrı ayrı yakınsama elde edilince işlem tamamlanır.

3.6 AA-DA Güç Akışı Algoritması

Daha önce çok uçlu doğru akım devresine ait güç akışı işaret akış şeması verilmişti (şekil 3.4). Optimizasyon hesaplamalarının göz önüne alınmaması durumunda ise (u kontrol vektörü sabit), alternatif akım sistemine ait çeviricilerin bulunduğu baralardaki gerilim genlik ve açı değerleri data olarak verilirken, sonuçta aynı baralardan çekilen veya verilen P aktif güçleri ile, yalnızca hattan çekilen Q reaktif güçleri elde edilmektedir. Daha açık bir ifade ile çeviriciler, alternatif akım sistemine ilişkin P ve Q yükleri olarak ifade edilmektedir. Alternatif akım sistemine ait baralar serbest, Pv, PQ barası olarak üç ayrı grupta toplanmaktadır. Çeviricilerin bağlı olduğu bara, bu üç tip baradan birisi olabilir.

AA-DA güç akışı hesaplamalarında bu çalışmada anlatılan doğru akım güç akışı yöntemi, hızlı ayrışık (fast-decoupled) yöntemi ile kullanılabileceği gibi, herhangi bir alternatif akım güç akışı yöntemi ile birlikte de kullanılabilir. Bu yöntemi uygularken AA güç akışı algoritmasında herhangi bir değişikliğe gerek yoktur. Bunun için gerekli işaret akış diyagramı şekil 3.7 de verilmiştir. Ayrık AA-DA güç akışı algoritmasının diğer önemli bir üstünlüğü ise, doğru akım sistemine ait kısıtlamaların çok kolay bir şekilde güç akışı hesaplamaları içine sokulabilir olmasıdır. Alternatif akım sistemine ait gerilim



Şekil 3.7 AA-DA Güç Akışı İşaret Akış Şeması.

değerleri, reaktif güç değerlerinden daha kolay yakınsadığı için, DA güç akışını AA güç akışı önüne koymak daha yararlı olacaktır. Şekil 3.7 görüldüğü gibi DA güç akışı belirlendikten sonra AA ile DA sisteminin bağlı olduğu baralardaki yeni yük değerleri (doğru akım sisteminin P_{hat} ve Q_{hat}) hesaplanır ve yeni yük değerleri uygun şekilde düzeltilir. Daha sonra AA güç akışı hesaplanır. Değişkenlerin yeni değerleri ile, datada verilen tolerans da gözetilerek, alternatif akım güç akışı algoritmasının ilk iterasyonunda yakınsama varsa AA-DA güç akışı tamamlanmış olur. Aksi halde tekrar yeni değişken değerleri ile DA güç akışı hesaplamalarına geri dönlür. Yapılan hesaplamalarda iki ya da üç iterasyonda yakınsamanın sağlandığı görülmüştür.

BÖLÜM 4

ALTERNATİF AKIM - DOĞRU AKIM OPTİMAL GÜÇ AKIŞI

Bir sistemin optimal şartlarda çalışması, sistemi işletmek için gereken değişkenlerin (durum ve kontrol değişkenleri), bunları birbirine bağlayan tüm eşitlikleri, kısıtlamaları sağlayacak ve amaç ölçütünü en verimli kılacak şekilde her an belirlenerek, elde edilen değerlerine göre çalıştırılmasıdır.

Enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılması gerektiğinin anlaşılması ile, enerji sistemlerinde de uygulama alanı bulan optimizasyon çalışmaları, 1930 lu yıllardan itibaren bir çok araştırmaya konu olmuştur [24]. Özellikle 1950 li yıllarda bilgisayar destekli çözümlemelerin ortaya çıkması ile bu çalışmalar yeni bir boyut kazanmıştır. Yapılan çalışmalarda özellikle Dommel ve Tinney tarafından çözüme yönelik olarak verilen matematiksel model, uygulamada hayli tutulmakta ve bilgisayar destekli çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1952 yılında ilk olarak bir alternatif akım sistemi içinde, iki uzak nokta arasında yüksek doğru gerilimli enerji iletimi gerçekleştirilmiştir [1]. Böyle bir sistemden elde edilen faydalar karşısında kısa bir sürede doğru akım terminal sayısı çoğaltılmış (çok uçlu-multiterminal) ve bu olay günümüzdeki modern AA-DA sistemlerinin başlangıcı olmuştur.

Sistem kararlılığı ve gerilim kontrolü gibi günümüz tekniğinde oldukça önemli olan konularda içerdiği üstünlükler [8-9], AA-DA birleşik sistemini ciddi bir şekilde gündeme getirmiştir. Teknolojinin gelişimi ve buna paralel olarak eskiye oranla maliyetlerin düşmesi de olayı

daha çekici hale getiren diğer bir etkidir [7].

4.1 Optimizasyon Hesaplamalarında Kullanılan Dommel-Tinney yaklaşımı.

Bu çözüm yöntemine göre bir f fonksiyonunun optimize edilmesi işlemi, sisteme ait durum ve kontrol değişkenlerine bağlı olarak,

$$f=f(x,u) \quad (4.1)$$

ifadesi ile verilen bir amaç ölçütünü en verimli kılacak kontrol değişkenlerinin elde edilmesidir. Bu işlemler yapılırken, sisteme ait değişkenlerin birbiri ile olan ilişkilerini gösteren

$$g(x,u)=0 \quad (4.2)$$

eşitliğinin ve ayrıca sistemin sağlıklı çalışmasını temin eden kısıtlamaları içeren

$$h(x,u) \geq 0 \quad (4.3)$$

ifadesinin sağlanması gerekir.

(4.2-3) koşullarına uyan ve $f(x,u)$ eğrisi üzerinde yer alan değişkenleri bulmak için Lagrange fonksiyonu

$$L(x,u,\lambda) = f(x,u) + \lambda^T \cdot g(x,u) + w(x) \quad (4.4)$$

olarak tanımlanır [35]. $f(x,u)$ fonksiyonunu en verimli kılan optimal çalışma noktasına ilişkin değişken değerleri, (4.4) eşitliği ile verilen genişletilmiş amaç ölçüt ifadesi $L(x,u,\lambda)$ nin durum, kontrol büyüklükleri ve λ Lagrange çarpanlarına göre kısmi türevleri

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(x,u) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} + \left[\frac{\partial g(x, u)}{\partial x} \right]^T \cdot \lambda + \frac{\partial w(x)}{\partial x} = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial u} = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} + \left[\frac{\partial g(x, u)}{\partial u} \right]^T \cdot \lambda = 0 \quad (4.7)$$

kullanılarak elde edilir.

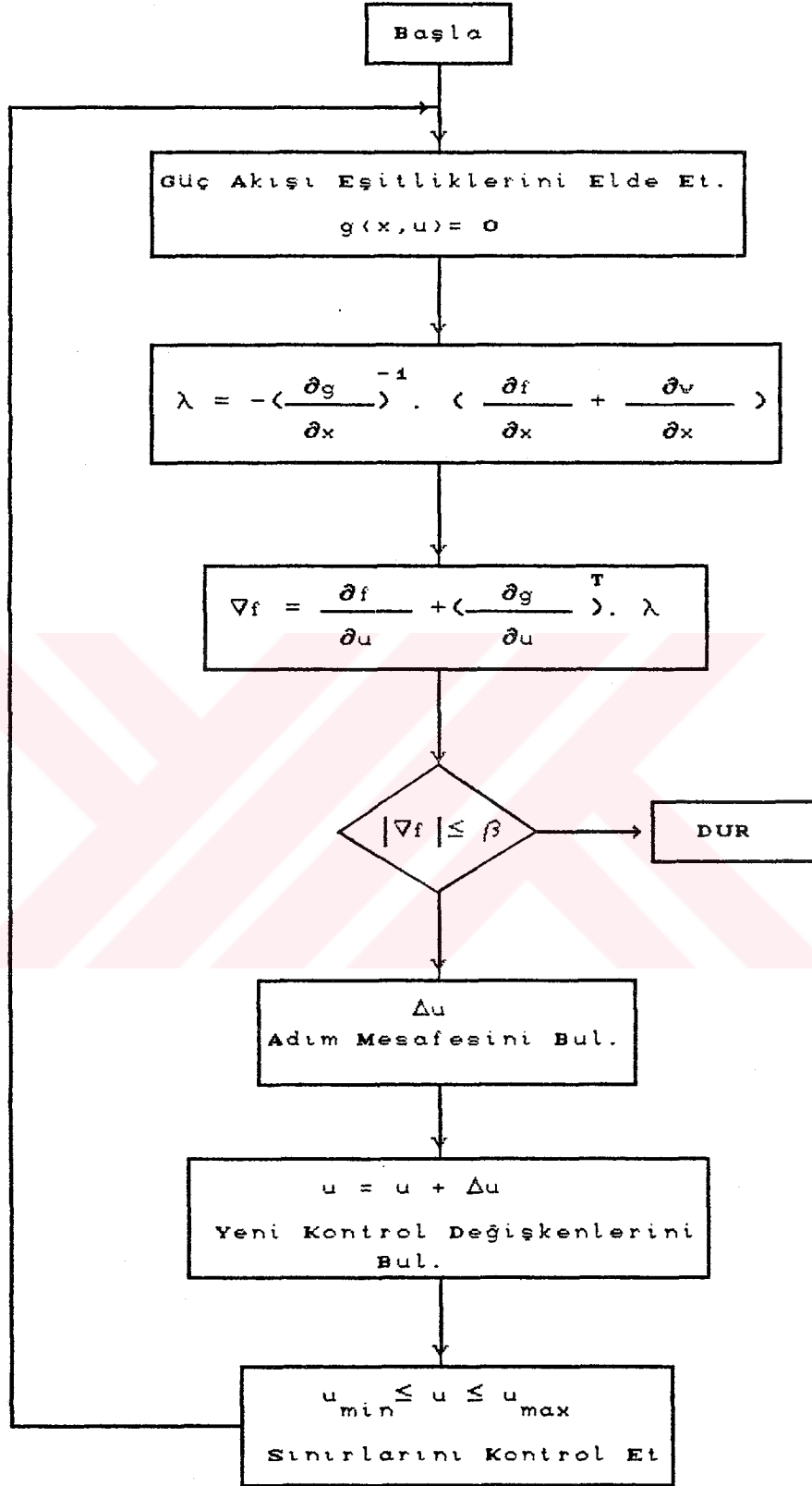
Yukarıda (4.5-7) ile verilen denklem sisteminde görülen $w(x)$ ifadesi, penaltı fonksiyonu olarak adlandırılır ve sistem eşitsizliklerini içeren $h(x, u)$ ifadesinin, amaç ölçütü olan $L(x, u, \lambda)$ ifadesine yansıtılması ile elde edilir. Kontrol değişkenlerine ilişkin eşitsizlikler ise kontrol değişkenlerinin uygun hale getirilmesi sırasında göz önüne alındığından, (4.5-6) ifadelerinde yer almamıştır. (4.3) ifadesi ile tanımlanan $h(x, u)$ kısıtlaması içinde kontrol ve durum değişkenlerine ilişkin

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (4.8)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (4.9)$$

eşitsizlikleri ele alınmış, fonksiyon kısıtlamaları kullanılmamıştır.

(4.5-7) ifadeleri lineer olarak değişmediklerinden, çözümleri iterativ yöntemler ile gerçekleştirilebilir. Bu ifadelerin çözümü için öncelikle başlangıçta bilinen kontrol değişkenleri, (4.5) denklemde kullanılarak durum değişkenleri bulunur. (4.6-7) eşitliklerinde bilinmeyen yalnızca Lagrange sabitleridir. (4.6) eşitliğinden, bilinmeyen λ değerinin bulunmasında yararlanılır. Bu durumda (4.7) eşitliği dışında diğer iki eşitlik sağlanmaktadır. (4.7) eşitliği, (4.4) amaç fonksiyonunun gradyenidir. Bu ifadenin çözümü, ilk olarak Dommel - Tinney tarafından bulunan ve negatif gradyen (steepest descent algorithm) olarak adlandırılan bir iterasyon ile verilmiştir [50]. Şekil 4.1



Şekil 4.1 Gradient Yöntemi İşaret Akış Şeması

de görülen bu algoritma ile (4.5-7) ifadeleri çözülebilir.

(4.8) ve (4.9) kısıtlamaları altında çözüm istendiğinden, bu kısıtlamaları içeren ve penaltı fonksiyonu olarak adlandırılan, w fonksiyonunun kullanılması gerekmektedir. Durum değişkenleri sayısı m olmak üzere, w penaltı fonksiyonu

$$w(x) = \sum_{i=1}^m w_i(x_i) \quad (4.10)$$

$$w_i(x_i) = \begin{cases} \sigma_i \cdot (x_i - x_{i\min})^2, & x_i < x_{i\min} \\ 0, & x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max} \\ \sigma_i \cdot (x_i - x_{i\max})^2, & x_i > x_{i\max} \end{cases} \quad (4.11)$$

olarak yazılabilir. (4.11) ifadesinde kullanılan σ_i , yoğunluk katsayısı sabit bir değerdir.

Şekil 4.1 de verilen Δu adım mesafesi, kontrol değişkenlerinin uygun hale getirilmesinde kullanılan bir büyüklüktür. Adım mesafesinin hesaplanmasına yönelik bir çok yöntem bulunmaktadır [35,50,56]. Bu büyüklük hakkında gerekli açıklama (4.35) denklemi ile yapılacaktır.

Enerji iletim sistemleri optimal güç akışı hesaplamalarında amaç ölçütü olarak kabul edilen iki fonksiyon bulunmaktadır. Bunlardan ilki, enerji iletim hatlarındaki kayıpları, diğeri ise santrallerdeki yakıt maliyetlerini gösteren fonksiyonlardır. Her iki amaç ölçütü için yapılan optimizasyon çalışmalarında, faydalanılan çözüm yöntemleri aynı olmakla birlikte, kullanılan eşitliklerde farklılıklar bulunmaktadır. Optimizasyon çalışmalarında, enerji sistemine ait $h(x,u)$ kısıtlamaları ve tüketici isteklerini yansıtan P_{yuk} , Q_{yuk} değerleri göz önüne alınarak sistemin kontrol ve durum değişkenleri yardımı ile amaç

ölçütü olan fonksiyonun, optimum değere getirilmesi gerekmektedir.

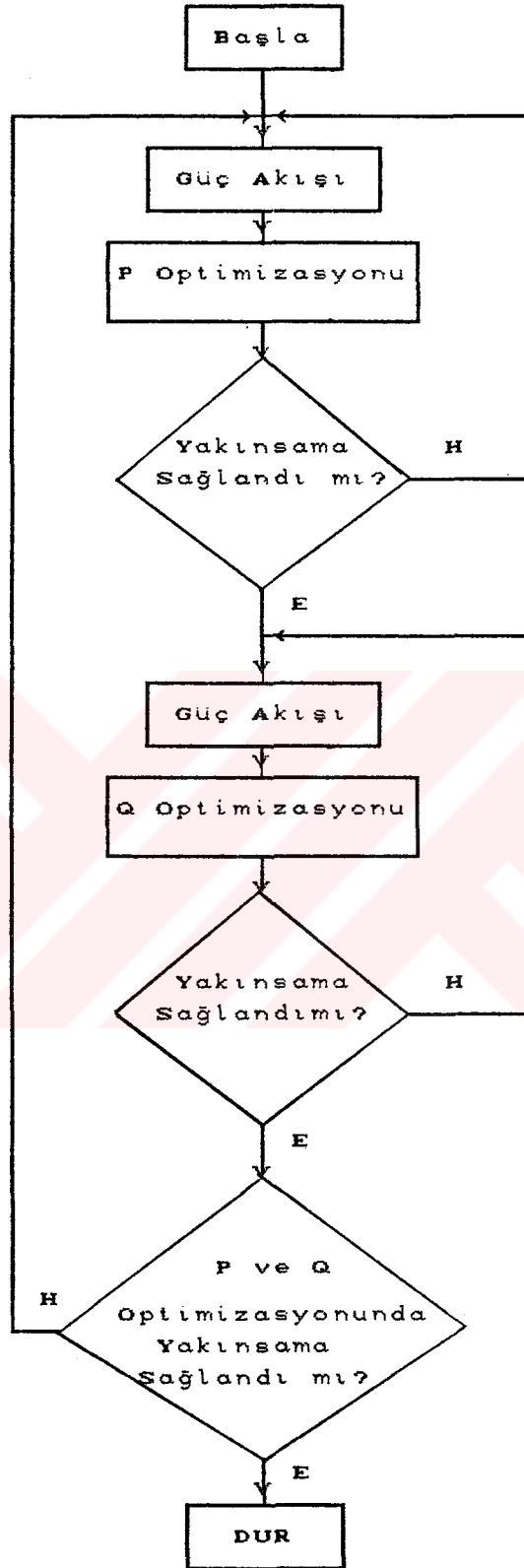
Güç sistemlerinde optimizasyon metodolojisi adı altında aktif güç optimizasyonu, reaktif güç optimizasyonu, ve aktif-reaktif güç optimizasyonu ele alınmaktadır [52]. Bunlar kısaca P optimizasyonu, Q optimizasyonu ve P-Q optimizasyonu olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada, daha genel olması dolayısı ile, üçüncü yani P-Q optimizasyonu yöntemi ile AA-DA enerji sistemi incelenecektir.

Şekil 4.2 de bu çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemine ilişkin algoritma verilmiştir. Bu yöntem ile çözüm yapılırken P aktif ve Q reaktif güç optimizasyonu boyunca sistemin x durum değişkenleri vektörü aynı kalırken u kontrol değişkenleri vektörü her bir optimizasyon türü (P ve Q) için ayrı ayrı değişkenlerden meydana gelmektedir. Algoritma içinde aktif ve reaktif güç optimizasyonu hesaplamaları ard arda yapılmakta, P optimizasyon hesaplamaları sona erdikten sonra Q optimizasyon hesaplamalarına geçilmektedir. P optimizasyonuna ilişkin eşitlikleri sağlayan durum ve kontrol değişkenleri aynı iterasyon içinde Q optimizasyonuna ilişkin eşitlikleri de sağlıyorsa P-Q optimizasyonu sona ermektedir. Aksi halde algoritmaya kaldığı yerden devam edilerek yeniden iterasyona başlanmaktadır.

Şekil 4.2 de dikkat edilmesi gereken iki önemli noktada bulunmaktadır. Bunlardan birincisi

$$g(x,u)=0 \quad (4.12)$$

ile verilen eşitlikle ilgilidir. AA-DA güç akışı hesaplamalarında ayrık yöntemin kullanılması, daha önce de belirtildiği gibi (Bölüm 2.1), güç akışı işlemleri boyunca doğru akım hattından akan gücün, bağlı olduğu AA barası için sabit bir yük olarak kabul edilmesini gerektirmektedir. Bu durumda k . bara için (Şekil 2.1) için yazılan (2.8) ve



Şekil 4.2 P - Q Optimizasyonu İşaret Akış Diyagramı.

(2.9) eşitlikleri aşağıda gösterildiği şekilde de ifade edilebilir:

$$P_{hatk} + P_{dk} - P_{gk} = g_p(x,u)=0 \quad (k=2,\dots,nb) \quad (4.13)$$

$$Q_{hatk} + Q_{dk} - (Q_{gk} + Q_{ck}) = g_q(x,u)=0 \quad (k=ng+1,\dots,nb) \quad (4.14)$$

Son iki eşitlikte verilen P_{dk} ve Q_{dk} güçleri güç akışı hesaplamaları boyunca sabit olduklarından, (2.20) ifadesinde verilen $\frac{\partial g}{\partial x}$ matrisi içinde değişken olarak yer alamazlar. Amaç ölçütünü en verimli kılan kontrol değişkenlerini elde etmek için yapılan optimizasyon hesaplamaları boyunca ise tüm güç büyüklükleri değiştiğinden, P_{dk} ve Q_{dk} değerleri sabit kalmaz. Şekil 4.1 de verilen algoritma da da görüldüğü gibi amaç ölçütünü etkileyen $\frac{\partial g}{\partial x}$ ve $\frac{\partial g}{\partial u}$ matrisleri içine, yukarıda verilen açıklamalardan dolayı P_{dk} ve Q_{dk} değerleri değişken olarak girmektedir.

Dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir nokta da, λ_i Lagrange katsayıları ile ilgilidir. Şekil 4.3 de görüleceği gibi, doğru akım sistemine ait eşitliklerin Jacobien matris içine sokulması, işlemler sırasında bu matris ile çarpım halinde olan λ katsayı matrisinin boyutlarının da değişmesini gerekli kılmaktadır. Alternatif akım optimizasyon hesaplamalarında λ matrisi, λ_p ve λ_q alt vektör matrislerinden oluşmaktadır. (4.4) ifadesinde de görüldüğü gibi, λ sütun matrisi Jacobien matris ile çarpım halinde olduğundan, doğru akım sisteminin ilavesi ile λ matrisi içinde yer alan ve ile λ_d gösterilen bir alt vektör matrisinin tanımlanması gerekecektir.

4.2 Önerilen Yaklaşım ile Aktif Güç Optimizasyonu

Güç sistemlerinde enerji üretim maliyetleri içindeki başlıca unsur aktif güç üretim maliyetidir. Bu maliyet ise ancak buhar gücü ile tahrik edilen generatörlerin beslediği sistemlerde söz konusu olmaktadır. Ancak büyük güç sistemleri ele alınarak yapılan optimizasyon hesaplamalarında birimler ayrı ayrı değil, bütün sistem içinde düşünülmekte ve tüm sisteme ilişkin toplam aktif gücün üretim maliyetinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Aktif güç optimizasyonu, tanım olarak, sisteme ilişkin yakıt maliyet fonksiyonu

$$f(x, u_p) \quad (4.15)$$

ifadesini minimum yapan x durum ve u_p kontrol değişkenlerinin değerlerinin bulunmasıdır. Bu işlem yapılırken, alternatif akım ve doğru akım sistemlerine ilişkin güç akışı ifadelerinin, x ve u_p değişkenlerine ait

$$g(x, u_p) = 0 \quad (4.16)$$

ve

$$h(x, u_p) \geq 0 \quad (4.17)$$

kısıtlamalarını sağlamaları gerekmektedir.

Aktif güç optimizasyonunda, u_p kontrol değişkenleri, ayrık doğru akım güç akışı algoritmasının genel yapısını bozmadan, aktif güç ile P optimizasyonu arasındaki ilişkiyi gözeterek seçilmişlerdir.

Aktif güç ile referans baraya göre belirlenen gerilim faz açısı arasındaki $P-\delta$ ilişkisinin, alternatif akım

sistemlerinin aksine, doğru akım sistemlerinde çeviricilerden akan aktif güç değerine etkisinin olmadığı Bölüm 3 de verilen doğru akım güç akışı algoritmasında görülmektedir. Yine bu algorithmada verildiği gibi δ gerilim faz açısı, AA sisteminden çeviricilere doğru akan AA'nın faz açıları ile birlikte reaktif gücün hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Birleşik güç akışı yardımı ile gerçekleştirilen çalışmaların aksine, doğru akım sistemine ait tüm eşitlikler, aktif güç optimizasyonu hesaplamaları içine, daha önce tanımlanan λ_d Lagrange çarpanı kullanılarak taşınmışlardır.

4.2.1 Yakıt Maliyet Fonksiyonu

Güç sistemlerinde enerji üretim maliyet fonksiyonunun ikinci dereceden bir polinom ile ifade edilebildiği görülmektedir [51]. P_{gi} , i. barada üretilen generatör aktif gücünü göstermek üzere enerji sistemine ilişkin yakıt maliyet fonksiyonu (hourly fuel cost),

$$f_p = \sum_{i=1}^{ng} a_{gi} \cdot P_{gi}^2 + b_{gi} \cdot P_{gi} + c_{gi} \quad (4.18)$$

olarak ifade edilebileceği gibi,

$$f_p = P_g^T \cdot A_g \cdot P_g + B_g^T \cdot P_g + C_g \quad (4.19)$$

eşitliği ile matrisel şekilde de verilebilir. (4.18) ve (4.19) denklemlerinde verilen a_{gi} , b_{gi} , c_{gi} skaler katsayıları ve A_g , B_g , C_g matrisleri, her bir generatör için değişebilen sabit değerlerdir.

4.2.2 Aktif Güç Optimizasyonu Hesaplamaları

Enerji sistemlerinde optimizasyon hesaplama tekniklerinden bir tanesi de, şekil 4.1 de işaret akış şeması verilen yönteme dayanmaktadır. Bu yöntem hem P hem de Q optimizasyonu hesaplamalarında kullanılabilir [50,51,52]. Bu yaklaşımda, u kontrol değişkenleri vektörünün ve f maliyet fonksiyonunun, her bir optimizasyon türü için farklı olduğu gözden uzak tutulmamalıdır.

P optimizasyonuna ait x durum ve u kontrol değişkenleri, matrisel biçimde ifade edilebilirler. Değişkenlerde görülen aa indisi, alternatif akım sistemine da indisi ise doğru akım sistemine ilişkin büyüklükleri göstermektedir. Bölüm 2 de alternatif akım sistemi, Bölüm 3 de ise doğru akım sistemine ait eşitliklerden faydalanarak AA-DA sistemine ilişkin durum değişkenleri

$$x^T = [x_{aa}^T \quad x_{da}^T] \quad (4.20)$$

$$x_{aa}^T = [\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{nb}; v_{ng+1}, \dots, v_{nb}] \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} x_{da}^T &= [I_{d1}, \dots, I_{dnc}; v_{d2}, \dots, v_{dnc}; \alpha_1, \dots, \alpha_{nc}; \phi_1, \dots, \phi_{nc}] \\ &= [I_d^T \quad v_d^T \quad \alpha^T \quad \phi^T] \end{aligned} \quad (4.22)$$

ifadeleri ile verilebilir. Burada nb bara sayısını, nc çevirici sayısını, ng generatör sayısını gösterirken, x_{aa} (2.nb-ng-1; 1) boyutunda, x_{da} ise (4.nc-1; 1) boyutundaki vektör matrislerdir. Bu durumda sisteme ait x durum vektör matrisi (2.nb-ng-4.nc-2; 1) boyutunda olmaktadır. Optimizasyon hesaplamalarında kullanılan yöntemin gereği olarak P ve Q optimizasyon hesaplamaları boyunca x vektör matrisi (4.21-22) ifadelerinde verildiği gibi kalırken, u kontrol vektörü her bir optimizasyon türü için farklı

değişkenlerden meydana gelmektedir. Eşitliklerde verilen-
p alt indisi P optimizasyonunu göstermek üzere, sistemin
kontrol değişkenleri

$$u_p^T = [u_{paa}^T \ u_{pda}^T] \quad (4.23)$$

$$u_{paa} = [P_{g2}, \dots, P_{gng}] = [P_g^T] \quad (4.24)$$

$$u_{pda}^T = [P_{d1}, \dots, P_{dnc}] = [P_d^T] \quad (4.25)$$

şeklinde vektör matris olarak gösterilebilir. Burada u_{paa}
(ng-1,1) boyutunda, u_{pda} ise (nc,1) boyutunda vektör mat-
ristir. Bu durumda sisteme ait u kontrol vektör matrisi
(ng-nc-1,1) boyutunda vektör matris olmaktadır.

$$L(x,u) = f_p(x,u) + [\lambda_p^T \ \lambda_q^T \ \lambda_d^T] \cdot \begin{bmatrix} g_p(x,u) \\ g_q(x,u) \\ g_d(x,u) \end{bmatrix} + w(x) \quad (4.26)$$

denklemleri ile verilen f_p yakıt maliyet fonksiyonu, serbest
bara yakıt maliyet fonksiyonu f_{p1} ve diğer baralardaki
toplam yakıt maliyet fonksiyonu f_{p2} olmak üzere, iki ayrı
fonksiyonun toplamıdır [56]. Böyle bir ayrımın nedeni,
 f_{p1} maliyet fonksiyonunun u_p ve x değerine bağlı olması-
na karşın, f_{p2} maliyet fonksiyonunun yalnızca u_p nin fonk-
siyonu olmasıdır.

f_{p1} ifadesi içinde yer alan P_{g1} serbest bara üre-
tim aktif gücü, x ve u_p vektör matrislerinde yer almaz.
 P_{g1} ancak, x durum değişkenleri vektör matrisindeki v ger-
rilim genlik değerleri, δ gerilim açısı değerleri ile ser-
best baraya bağlı DA hattı varsa v_d ve I_d değerlerinin
fonksiyonu olarak yazılabilir. Yukarıda ifade edilenler
doğrultusunda, f_p içinde yalnızca f_{p1} büyüklüğü x e bağlı
olduğundan

$$\frac{\partial f_p}{\partial x} = \frac{\partial f_{p1}}{\partial x} = \frac{\partial f_{p1}}{\partial P_{g1}} \cdot \frac{\partial P_{g1}}{\partial x} \quad (4.27)$$

ifadesi yazılabilir. Burada bir matris özelliğinden* yararlanarak (4.6) ve (4.7) denklemlerine göre

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial f_{p1}(x,u)}{\partial x} + \begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x,u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_q(x,u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_d(x,u)}{\partial x} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda_p \\ \lambda_q \\ \lambda_d \end{bmatrix} + \frac{\partial w(x)}{\partial x} = 0 \quad (4.28)$$

yazılır ve λ çözülürse,

$$\begin{bmatrix} \lambda_p \\ \lambda_q \\ \lambda_d \end{bmatrix} = - \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x,u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_q(x,u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_d(x,u)}{\partial x} \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial f_{p1}(x,u)}{\partial x} + \frac{\partial w(x)}{\partial x} \right) \quad (4.29)$$

elde edilir. Aynı işlemler u_p kontrol değişkenleri için yapılırsa

*: $\frac{\partial}{\partial a} (B^T \cdot D) = \left(\frac{\partial D}{\partial a} \right)^T \cdot B$ (B sabit bir vektör)

$$\frac{\partial L}{\partial u_p} = \frac{\partial f_p(x, u)}{\partial u_p} + \begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial u_p} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial u_p} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial u_p} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \lambda_p \\ \lambda_q \\ \lambda_d \end{bmatrix} = 0 \quad (4.30)$$

bulunur. (4.29) ifadesi (4.30) de yerine konulursa

$$\nabla f_p = \frac{\partial L}{\partial u_p} = \frac{\partial f_p(x, u)}{\partial u_p} - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial u_p} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial u_p} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial u_p} \end{bmatrix}^T \cdot \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial x} \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial f_{p1}(x, u)}{\partial x} + \frac{\partial w(x)}{\partial x} \right) \quad (4.31)$$

f_p gradyen değeri elde edilir.

Maliyet fonksiyonunun gradyeni olan olan ve (4.31) denkleminde elde edilen ∇f_p değeri, yeteri kadar küçük ise, P optimizasyonu hesaplamaları sona erer. Bu durumda elde edilen x ve u_p değerleri optimal çalışma noktasına ait değerler olur. Şayet ∇f_p değeri, mücade edilen β toleransından büyük ise, u_p kontrol değişkeninin yeni değeri

$$u_{pyeni_i} = u_{peski_i} - k \cdot \left(\text{satr}_i \frac{\nabla f_p}{\|\nabla f_p\|} \right)^{-1} \quad (i=1, \dots, ng+nc-1) \quad (4.32)$$

bulunur [56]. (4.32) denkleminde verilen $||\nabla f_p||$, ∇f_p gradient vektör matrisinin genlik değeri, k ise β toleransına yaklaşıldığı sürece azalan, aksi halde artan değerler alan bir katsayıdır.

$$(4.27) \text{ eşitliğinde, } \frac{\partial f_{p1}}{\partial x} \text{ ifadesi, } \frac{\partial f_{p1}}{\partial P_{g1}} \text{ ile } \frac{\partial P_{g1}}{\partial x}$$

değerlerinin çarpımları olarak yazılmıştır. Bu çarpımın ilk terimi, (4.18) denklemi yardımı ile bulunur. Çarpımın ikinci terimi ise, serbest bara üretim aktif gücü güç akışı işlemleri tamamlanmadığı sürece bilinemediğinden ve P_{g1} değerinin, durum ve kontrol değişkenlerinin fonksiyonu olduğu gerçeğinden hareketle, (2.6), (2.8) ve (3.16) eşitlikleri kullanılarak hesaplanır. (4.30) eşitliğinde bulunan maliyet fonksiyonunun kontrol değişkenine göre türevi,

$$\frac{\partial f_{pi}}{\partial u_p} = \frac{\partial f_{pi}}{\partial P_{gi}} \frac{\partial P_{gi}}{\partial u_p} \quad (4.33)$$

ifadesinde görüldüğü gibi, iki ayrı terimin çarpımı olarak yazılabilir. Bu çarpımda soldaki terimde P_{g1} ye ait işlemler yukarıda açıklandığı gibi yapılırken, sağdaki ikinci terim şekil 4.4 de verilen matris yardımı ile elde edilecektir.

$$\frac{\partial g(x,u)}{\partial x} \text{ ve } \frac{\partial g(x,u)}{\partial u_p} \text{ değerlerine ilişkin matris ya-}$$

pısı şekil 4.3 ve şekil 4.4 de verilmiştir. P optimizasyonunun işaret akış diyagramı ise, şekil 4.5 de görülmektedir. (4.6) ve (4.7) eşitliklerinde kullanılan $g(x,u)=0$ ifadesi, daha önce söz edildiği gibi, hem alternatif akım hem de doğru akım devresine ait eşitlikleri kapsamaktadır. Doğru akım devresine ait olan bu eşitlikler Bölüm 3 de (3.9), (3.10), (3.11), ve (3.16) denklemleri ile verilmişti. Ayrıca çeviricilerin AA barasından çektikleri reaktif güç değeri için

$$Q_{di} = v_i \cdot t_{di} \cdot I_{di} \cdot \sin \phi_i \quad (i=1, \dots, nc) \quad (4.34)$$

yazılır. Bu denklemler içindeki e_i değeri yok edilirse, rezidü adı verilen

$$R_1 = P_{di} - I_{di} \cdot v_{di} = 0 \quad (i=1, \dots, nc) \quad (4.35)$$

$$R_2 = v_{d1} - v_{di} + \sum_{j=2}^{nc} r_{ij} \cdot I_{dj} \quad (i=2, \dots, nc) \quad (4.36)$$

$$R_3 = v_{di} + R_{ci} \cdot I_{di} - t_{di} \cdot v_i \cdot \cos(\alpha_i \text{ veya } \gamma_i) \quad (i=1, \dots, nc) \quad (4.37)$$

$$R_4 = Q_{di} - v_i \cdot t_{di} \cdot I_{di} \cdot \sin \phi_i \quad (i=1, \dots, nc) \quad (4.38)$$

denklemleri elde edilir.

(4.29) denkleminin çözümü için bilinmesi gerekli ifadelerden en önemlileri, kuşkusuz $\frac{\partial g(x,u)}{\partial x}$ ve $\frac{\partial g(x,u)}{\partial u_p}$

matrisleri olup, bunlar (2.25-56) ve (4.35-38) eşitlikleri yardımı ile şekil 4.3 ve 4.4 deki yapıya göre bulunabilirler. Şekil 4.3, 4.4 ve 4.6 daki matris gösterilişi için literatürde yer alan şekil kullanılmıştır [47]. Matrislerde boşluklara karşı düşen değerler sıfır alınmalıdır. Bu şekillerdeki alt indislerden, y yük barasını, g generatör barasını, d doğru akım hattının bağlandığı barayı, c reaktif güç kaynağının bağlı olduğu barayı, t ayarlı transformator bağlı barayı göstermektedir. Şekil 4.3 de verilen matris elemanlarından; $J_1, J_2, J_3, J_4, J_{1t}, J_{2t}, J_{3t}$ ve J_{4t} alt matrisleri (2.25-56) eşitliklerinde verilmişti. U ise ana köşegen üzerindeki eleman değerleri 1 olan matrisi göstermektedir. Matrise ait diğer büyüklükler ise dk ($1, \dots, nc$) olmak üzere, doğru akım bara numarasını göstererek aşağıdaki ifadelerle hesaplanır:

$$J_{4d}(k,k) = J_4(k,k) + t_{dk} \cdot I_{dk} \cdot \sin \phi_k \quad (4.39)$$

$$J_{4t}(k,k) = J_4^t(k,k) + t_{dk} \cdot I_{dk} \cdot \sin \phi_k \quad (4.40)$$

$$J_5(dk,dk) = -t_{ddk} \cdot \cos(\alpha_{dk} \text{ veya } \gamma_{dk}) \quad (4.41)$$

$$J_6(dk,dk) = -t_{ddk} \cdot I_{ddk} \cdot \sin \phi_{dk} \quad (4.42)$$

$$J_7(dk,dk) = v_{ddk} \quad (4.43)$$

$$J_8(dk,dk) = t_{ddk} \cdot v_{dk} \cdot \sin \phi_{dk} \quad (4.44)$$

	$\Delta\delta$	Δv	ΔI_d	Δv_d	$\Delta\alpha$ veya $\Delta\gamma$	$\Delta\phi$	
Δg_{py}	J_1	J_2					
Δg_{pgy}							
Δg_{pyc}							
Δg_{pgd}							
Δg_{pyd}							
Δg_{pyt}	J_{1t}	J_{2t}					
Δg_{pyct}							
Δg_{pydt}							
Δg_{qy}	J_3	J_4					
Δg_{qgy}							
Δg_{qyc}							
Δg_{qgd}							
Δg_{qyd}							
Δg_{qyt}	J_{3t}	J_{4t}					
Δg_{qyct}							
Δg_{qydt}							
D_1			$-J_7$	$-J_{12}$			
D_2			J_9	$-U$			
D_3	J_5		J_{10}	U	J_{13}		
D_4	J_6		J_{11}				

Sekil 4.9 $\frac{\partial g(x,u)}{\partial x}$, Jacobien matris Yapısı.

$$J_9(dk, dk) = r_{dk, dk} \quad (4.45)$$

$$J_{10}(dk, dk) = R_{cdk} \quad (4.46)$$

$$J_{11}(dk, dk) = -J_8(dk, dk) \quad (4.47)$$

$$J_{12}(dk, dk) = U_{ddk} \quad (4.48)$$

	ΔP_g	ΔP_d
Δg_{py}		
Δg_{pgy}	-U	
Δg_{pyc}		
Δg_{pgd}	-U	U
Δg_{pyd}		U
Δg_{pyt}		
Δg_{pyct}		
Δg_{pydt}		
Δg_{qy}		
Δg_{qgy}		
Δg_{qyc}		
Δg_{qgd}		
Δg_{qyd}		
Δg_{qyt}		
Δg_{qyct}		
Δg_{qydt}		
D ₁	U	
D ₂		
D ₃		
D ₄		

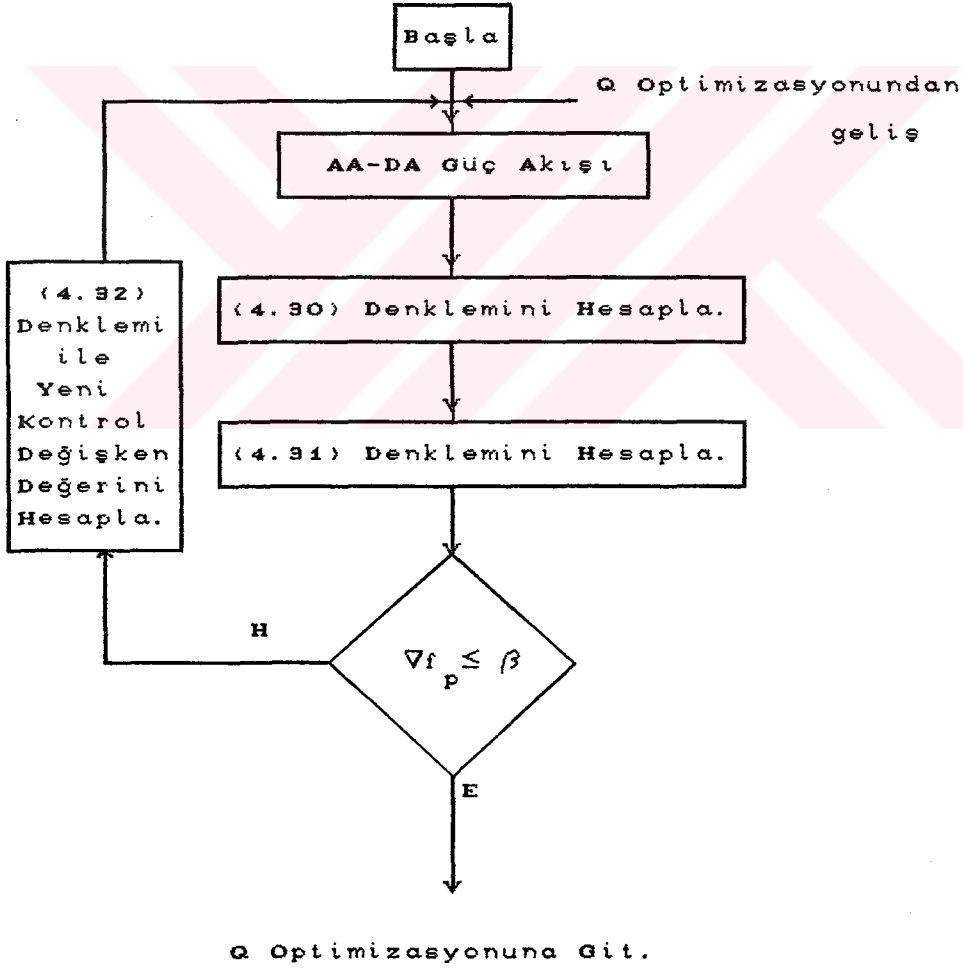
Sekil 4.4 $\frac{\partial g(x, u)}{\partial u_p}$, Jacobien Matris Yapısı.

$$J_{13}(dk, dk) = t_{ddk} \cdot v_{dk} \cdot \sin(\alpha_{dk} \text{ veya } \gamma_{dk}) \quad (4.49)$$

$$J_{14}(dk, dk) = t_{ddk} \cdot v_{dk} \cdot I_{ddk} \cdot \cos \phi_{dk} \quad (4.50)$$

$$J_{15}(dk, dk) = - J_{14}(dk, dk) \quad (4.51)$$

Bu değerler ile elde edilen P optimizasyonu işaret akış diyagramı şekil 4.5 de görülmektedir.



Şekil 4.5 P optimizasyonu işaret Akış Şeması.

4.3 Önerilen Yaklaşım ile Reaktif Güç Optimizasyonu

Enerji sistemlerinde üretilen enerjinin, tüketiciye en az maliyet ile ulaştırılmasına yönelik hesaplamalarda, bu maliyetin optimum bir değere yaklaştırılabilmesi için, iletim hatlarındaki kayıpların artmasını engelleyecek özellikler aranır. İki bara arasındaki enerji akış yönünün i .baradan j .baraya doğru olduğu kabulü ile, hattın direnci r_{ij} , hattın akan aktif güç ve reaktif güç değerleri P_{ij} ve Q_{ij} nin hatlara verildiği baranın gerilim genlik değeri v_i olmak üzere, enerji iletim sistemi içindeki tüm iletim hatlarında meydana gelen toplam aktif kayıp güç değeri (real power transmission losses) için

$$P_{\text{kayıp}} = \sum \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_i^2} \cdot r_{ij} \quad (4.52)$$

ifadesi yazılabilir. Enerji akışının yönü, baralar arasındaki gerilim genlik farkları ile belirlenir. Bu değerlerin kontrolü ile enerji akış yönü düzenlenebilir. Alternatif akım sistemlerinde P - δ ilişkisi, aktif gücün üretimi açısından ne kadar önemli ise Q - v ilişkisi de reaktif güç bakımından o kadar önem taşır. Gerilim kontrolü için kullanılan reaktif güç kaynaklarının reaktif güç değerleri, bağlı olduğu baraya ait gerilim genlik değerinin değiştirilmesinde etkilidir. Gerilimin genlik değerinin kontrolü ve buna bağlı olarak düzeltilmesi, senkron makinelerde uyarma devrelerinin, kademeli transformatörlerde kademe ayar değerlerinin, şönt kapasite ve reaktörlerde ise bunların enerji sistemine sokulup çıkarılmalarını sağlayan devrelerin kontrolü ile gerçekleştirilir. Bu kontrol tiplerinin temel ilkesini, baradan enerji sistemine verilen veya çekilen reaktif gücün, bu baraya ait olan gerilimin genlik değeri ile çok yakın ilişkisi oluşturmaktadır.

Çok yüksek gerilimli AA hatlarında, hattın şönt kapasitelerinin varlığından dolayı, özellikle düşük yüklerde,

hatlarda, oldukça büyük ölçüde reaktif güç üretilmektedir. Bu durum aktif güç kayıplarını arttırdığı gibi, çok sık yapılan açma-kapama işlemlerinde kesicilerde problemlere de yol açmaktadır [66]. Doğru akım iletim hatlarından reaktif güç akmamaktadır. Ayrıca bu hatların sistem kararlılığına olumlu katkıları ve çok kolay kontrol edilebilir olmaları gibi üstünlükleri de vardır. Çeviricinin çeşitli şekillerde kontrol edilebilmesi (akım, güç, gerilim), reaktif güç kontrolünde oldukça büyük kolaylıklar sağlamaktadır [70]. Bu yüzden alternatif akım sistemin çok problemli bir konusu olan reaktif güç kontrolünde, doğru akım iletim ciddi bir öneri olarak gündeme gelmektedir.

Q reaktif güç optimizasyonu, tanım olarak, u_q reaktif güç optimizasyonuna ait kontrol değişkenlerini göstermek üzere, iletim hatlarındaki kayıpları belirleyen

$$f(x, u_q) \quad (4.53)$$

ifadesini minimum yapan sisteme ait x durum ve u_q kontrol değişken değerlerinin bulunmasıdır. Bu işlemi yaparken sisteme ilişkin değişkenlerin birbirleri ile olan bağıntısını gösteren

$$g(x, u_q) = 0 \quad (4.54)$$

eşitliklerinin ve sisteme ait kısıtlamaları içeren

$$h(x, u_q) \geq 0 \quad (4.55)$$

eşitsizliklerinin sağlanması gerekmektedir. Q optimizasyonuna ilişkin hesaplamalar, P optimizasyonuna benzer bir yolla gerçekleştirilir. Tek farklılık, amaç ölçütü f_q ve u_q kontrol değişken değerleridir.

Q reaktif güç optimizasyonunda u_q kontrol değişkenleri, ayırık doğru akım güç akışı algoritması genel

yapısını koruyarak ve reaktif güç ile gerilim arasındaki ilişkiyi gözeterek seçilmişlerdir. Çevirici transformatörleri t_d kademe ayar değerleri alternatif akım sisteminde de olduğu gibi kontrol değişkeni olarak alınmıştır. Doğru akım sistemine esneklik kazandırmak için, yalnızca referans çeviriciye ait çevirici çıkışı v_{d1} doğru gerilim değeri kontrol değişkeni olarak seçilmiştir. Ayrıca çeviricilere ilişkin, e açık devre gerilim değeri rezidü ifadelerinden çıkarılarak, Q-v ilişkisi içine sokulmamış, böylece kontrol değişken sayısı azaltılarak iterasyon yakınsama süresi kısaltılmıştır. Kontrol değişkenlerinin yapıları bir çalışmada verilenden farklı olarak [3], yukarıda belirtilen şekilde seçilmesi ile, optimizasyon algoritmasında işlem kolaylığı ve hızlı yakınsama sağlanmaktadır.

4.3.1 İletim Hattı Kayıpları

i. ve j. sistem baraları arasına bağlanmış olan bir alternatif akım hattındaki aktif güç kaybı, v_k, v_j bara gerilimlerinin genlikleri, G_{ij} iletim hattı seri admitan- sı olmak üzere

$$P_{ij} = -G_{ij} \cdot (v_k - v_j)^2 \quad (4.56)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Alternatif akım sisteminin tümü ele alındığında toplam iletim kayıpları

$$f_{qda} = \sum_{i=1}^{nb-1} \cdot \sum_{j=i+1}^{nb} P_{ij} \quad (4.57)$$

olarak hesaplanabilir. Doğru akım iletim hatlarına ait kayıplar ise, R_{ij} i. ve j. çevirici terminal baraları arasındaki hat direnci, R_{ci} komutasyon direnci olmak üzere;

$$f_{qda} = \left(\sum_{i=1}^{nc-1} \cdot \sum_{j=i+1}^{nc} (v_{di} - v_{dj})^2 / R_{ij} \right) + \sum_{i=1}^{nc} (v_i \cdot t_{di} \cdot \cos \alpha_i - v_{di})^2 / R_{ci} \quad (4.58)$$

ifadesi ile bulunur. Alternatif ve doğru akım sistemini içine alan enerji iletim sistemine ilişkin toplam kayıp

$$f_q = f_{qaa} + f_{qda} \quad (4.59)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Yukarıda verilen ifadelerden farklı biçimde, sisteme ilişkin aktif güç kayıpları olarak alınabilecek bir diğer amaç ölçütü

$$f_q = P_1(x,u) + \sum_{i=2}^{nb} P_{hat_i}(x,u) \quad (4.60)$$

yazılabilir. Bu eşitlikte verilen $P_1(x,u)$, serbest bara aktif güç üretim miktarıdır. $P_{hat_i}(x,u)$ ise i . baradan sisteme verilen aktif güç miktarıdır. (4.13) eşitliği yardımı ile

$$P_{hat_i} = P_{gi} - P_{yi} - g_{pi} \quad (4.61)$$

elde edilir. Serbest bara dışındaki $nb-1$ adet bara için kayıp ifadesi

$$\sum_{i=2}^{nb} P_{hat_i} = \sum_{i=2}^{nb} P_{gi} - \sum_{i=2}^{nb} P_{yi} - \sum_{i=2}^{nb} g_{pi} \quad (4.62)$$

ile bulunabilir. (4.62) eşitliği, (4.60) ifadesinde kullanılarak genişletilmiş amaç ölçüt ifadesi yeniden düzenlenirse;

$$L = P_1 + \sum_{i=2}^{nb} P_{gi} - \sum_{i=2}^{nb} P_{yi} - \sum_{i=2}^{nb} g_{pi} + [\lambda_p^T \lambda_q^T \lambda_d^T] \cdot \begin{bmatrix} g_p \\ g_q \\ g_d \end{bmatrix} + w(x) \quad (4.63)$$

eşitliği elde edilir.

4.3.2 Reaktif Güç Optimizasyon Hesaplamaları

Aktif güç hesaplamalarında kullanılan x , durum vektörü (4.20), (4.21) ve (4.22) ifadeleri ile verilmişti. Bu optimizasyon türüne ait kontrol değişkenleri ise

$$u_q^T = [u_{qaa}^T \quad u_{qda}^T] \quad (4.64)$$

olup, buradaki alt vektör matrisleri ise

$$u_{qaa}^T = [v_{g1}, \dots, v_{gng} \quad Q_{ng+1}, \dots, Q_{nv} \quad t_1, \dots, t_{nt}] \quad (4.65)$$

$$u_{qda}^T = [v_{d1} \quad t_{d1}, \dots, t_{dn}] \quad (4.66)$$

olarak verilebilir. Son iki ifadede yer alan indislerden, nv AA sistemine ait ayarlanabilir şönt kapasitör sayısını, nt AA sistemindeki kademeli transformatör sayısını, n çeviricilere seri bağlı kademeli transformatör sayısını göstermektedir. (4.65) ifadesinde u_{qaa} , $(ng+nv+nt,1)$ u_{qda} ise $(n+1,1)$ boyutundadır. (4.63) ifadesi tekrar düzenlenirse

$$L = P_1 + \sum_{i=2}^{nb} P_{gi} - \sum_{i=2}^{nb} P_{yi} + [(\lambda_p^T - U_1) \lambda_q^T \lambda_d^T] \cdot \begin{bmatrix} g_p \\ g_q \\ g_d \end{bmatrix} + w(x) \quad (4.67)$$

elde edilir. Bu ifadede kullanılan U_1 , eleman değerleri 1 olan, sütun matristir. Q optimizasyon hesaplamaları boyunca kontrol değişkenlerinin sabit kaldığı, incelenen süre içinde yük değerlerinin değişmediği kabulüyle (4.67) ifadesinin değişkenlere göre türevleri alınır

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial P_1(x, u)}{\partial x} + \begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial x} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda_p - U_1 \\ \lambda_q \\ \lambda_d \end{bmatrix} + \frac{\partial w(x)}{\partial x} = 0 \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial L}{\partial u_q} = \frac{\partial P_1(x, u)}{\partial u_q} + \begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial u_q} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial u_q} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial u_q} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda_p - U_1 \\ \lambda_q \\ \lambda_d \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

eşitlikleri elde edilir. (4.68) ifadesinden Lagrange sabitlerine ilişkin sütun matris çekilirse

$$\begin{bmatrix} \lambda_p - U_1 \\ \lambda_q \\ \lambda_d \end{bmatrix} = - \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial x} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial P_1(x, u)}{\partial x} + \frac{\partial w(x)}{\partial x} \right) \quad (4.70)$$

bulunur. (4.70) matris eşitliği, (4.69) ifadesinde kullanılacak olursa

$$\nabla f_q = \frac{\partial L}{\partial u_q} = \frac{\partial P_1(x, u)}{\partial u_q} - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial u_q} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial u_q} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial u_q} \end{bmatrix}^T$$

$$\left(\begin{bmatrix} \frac{\partial g_p(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_q(x, u)}{\partial x} \\ \frac{\partial g_d(x, u)}{\partial x} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial P_1(x, u)}{\partial x} + \frac{\partial w(x)}{\partial x} \right) \quad (4.71)$$

elde edilir.

(4.71) ifadesi ile verilen ∇f_q değeri belirlenen toleransa eşit veya küçük ise, Q optimizasyonu hesaplamaları sona erecektir. Q optimizasyonu, P optimizasyonu değerleri ile bir iterasyonda yakınsar ise P-Q optimizasyonu sona erer. Sayet Q optimizasyonu sonunda elde edilen ∇f_q değeri istenen toleransdan büyük ise, Q optimizasyonuna ait yeni iterasyonda kullanılacak kontrol değişken değerleri

$$u_{qyeni} = u_{qeski} - k \cdot \left[\text{satur}_i \frac{\nabla f_q}{\|\nabla f_q\|} \right] \quad (4.72)$$

ifadesi ile bulunur. (4.72) da verilen k katsayısının hesaplanmasına ilişkin açıklama (4.32) ifadesine ait açıklamalarda verilmişti.

(4.71) ifadesi ile verilen ∇f_q amaç ölçütünde yer

alan, $\frac{\partial P_1(x,u)}{\partial x}$ ve $\frac{\partial P_1(x,u)}{\partial u_q}$ sütun matrisleri, serbest ba-

ra generatör çıkış gücünün x ve u_q değişkenlerinin fonksiyonu olduğu göz önünde tutularak, (2.6), (2.8) ve (4.35) ifadelerinden bulunabilir. (4.71) ifadesinde yer alan

$\frac{\partial g(x,u)}{\partial x}$ ve $\frac{\partial g(x,u)}{\partial u_q}$ matrisleri, şekil 4.3 ve şekil 4.6

kullanılarak elde edilebilir.

Şekil 4.6 da verilen $J_2, J_{2t}, J_4, J_{4d}, J_{4t}, J_{4i}$ ifadeleri şekil 4.3 için hesaplanan değerlerdedir. Alternatif akım sistemindeki kademeli transformatörün k ve m baraları arasına bağlandığı varsayımı ile, Jacobien matrisine ilişkin eleman değerleri aşağıda verilmiştir:

$$J_{16}(k,k) = 2 \cdot v_k^2 \cdot t_{km} \cdot gt_{km} - v_k \cdot v_m \cdot (gt_{km} \cdot \cos \delta_{km} + bt_{km} \cdot \sin \delta_{km}) \quad (4.73)$$

$$J_{16}(m,k) = v_k \cdot v_m \cdot (-gt_{km} \cdot \cos \delta_{km} + bt_{km} \cdot \sin \delta_{km}) \quad (4.74)$$

$$J_{17}(k,k) = -2 \cdot v_k^2 \cdot t_{km} \cdot bt_{km} - v_k \cdot v_m \cdot (gt_{km} \cdot \sin \delta_{km} - bt_{km} \cdot \cos \delta_{km}) \quad (4.75)$$

$$J_{17}(m,k) = v_k \cdot v_m \cdot (gt_{km} \cdot \sin \delta_{km} + bt_{km} \cdot \cos \delta_{km}) \quad (4.76)$$

$$J_{18}(1,1) = U_{d1} \quad (4.77)$$

$$J_{19}(1,1) = 1 \quad (4.78)$$

$$J_{20}(1,1) = 1 \quad (4.79)$$

$$J_{20}(dk,dk) = -1 \quad (4.80)$$

$$J_{21}(dk,dk) = 1 \quad (4.81)$$

$$J_{22}(dk,dk) = t_{ddk} \cdot I_{ddk} \sin \phi_{dk} \quad (4.82)$$

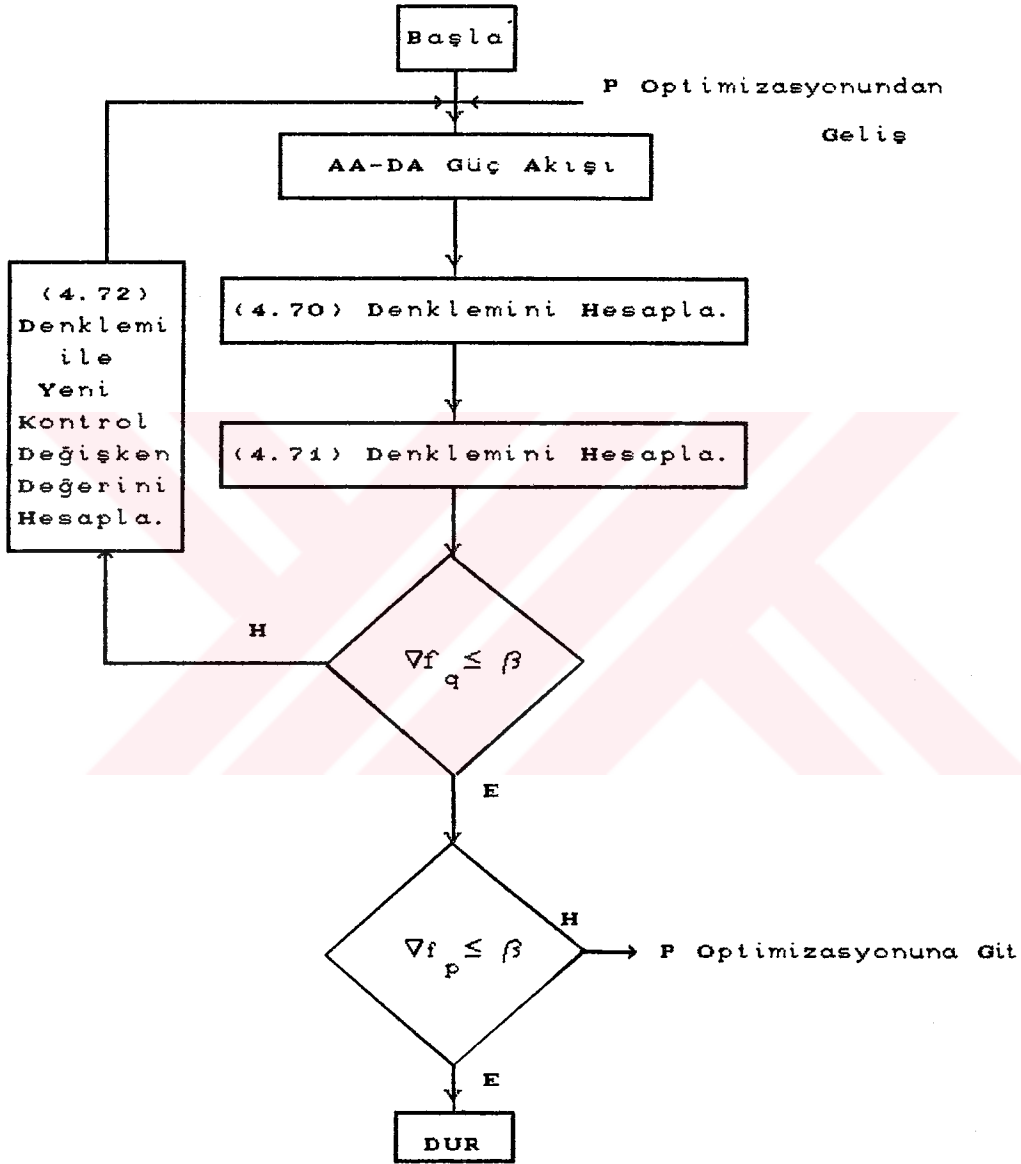
$$J_{23}(dk, dk) = v_k \cdot \cos(\alpha_{dk} \text{ veya } \gamma_{dk}) \quad (4.83)$$

$$J_{24}(dk, dk) = -J_{22}(dk, dk) \quad (4.84)$$

	Δv_g	Δa_c	Δt	Δv_{d1}	Δt_d
Δg_{py}	J_2				
Δg_{pgy}					
Δg_{pyc}					
Δg_{pgd}					
Δg_{pyd}					
Δg_{pyt}	J_{2t}				
Δg_{pyct}					
Δg_{pydt}					
Δg_{qy}	J_4				
Δg_{qgy}					
Δg_{qyc}					
Δg_{qgd}	J_{4d}				
Δg_{qyd}					
Δg_{qyt}	J_{4t}				
Δg_{qyct}					
Δg_{qydt}					
D_1				J_{19}	
D_2				J_{20}	
D_3				J_{21}	J_{23}
D_4					J_{24}

Şekil 4.6 $\frac{\partial g(x,u)}{\partial u_q}$, Jacobien Matris Yapısı

Şekil 4.6 daki değerlerle hesaplanan Q optimizasyonu işaret akış şeması şekil 4.7 de görülmektedir.



Şekil 4.7 Q optimizasyonu işaret Akış Şeması.

BÖLÜM 5
ÖNERİLEN YÖNTEMİN SAYISAL UYGULAMASI

Bu çalışmada önerilen AA-DA optimal güç akışı modeli şekil 5.1 de verilen IEEE değiştirilmiş 14 baralı sisteme uygulanmıştır [15]. FORTRAN 77 dili ile yazılan programa ait giriş değerleri tablo 5.1-5.5 de gösterilmiştir. Değişkenlerin giriş değerlerine karşı, elde edilen çıkışlar tablo 5.6-5.7 de verilmiştir.

Çalışma boyunca temel güç olarak 100 MVA değeri alınmıştır. Tablolarda görülen alt indisi değişkenlerin alt sınırını, üst indisi ise üst sınırları göstermektedir.

Tablo 5.1 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, AA Empedans Büyüklükleri.

HAT NO	BARA NO $i \rightarrow j$	HAT EMPEDANSI		ŞÖNT ADMİTANS	TRANS. KADEMESİ $t [b]$
		R [b]	X [b]	B [b]	
1	1 2	0.01938	0.05917	0.0528	
2	1 5	0.05403	0.22304	0.0492	
3	2 6	0.04699	0.19797	0.0438	
4	3 11	0.09498	0.19890	0	
5	3 12	0.12291	0.25581	0	
6	3 13	0.06615	0.13027	0	
7	4 7	0	0.20912	0	1.
8	4 9	0	0.55261	0	1.
9	5 3	0	0.25202	0	1.
10	6 4	0.06701	0.17103	0.0346	
11	7 8	0	0.17615	0	
12	7 9	0	0.11001	0	
13	9 10	0.03181	0.0845	0	
14	9 14	0.12711	0.27038	0	
15	10 11	0.08205	0.19207	0	
16	12 13	0.22092	0.19988	0	
17	13 14	0.17093	0.34802	0	

Tablo 5.4 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, DA Sistemi Hat ve Çevirici Değerleri.

BARA no $i \rightarrow j$	HAT EMPEDANSI	ÇEVİRİCİ EMPEDANSI
	$R [b]$	$R_c [b]$
2 5	0.057	0.028246
2 4	0.0581	0.02568
4 5	0.0184	0.015329

Tablo 5.5 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi, DA Sistem Değişkenleri Sınır Değerleri.

DEĞİŞKEN GÖSTERİMİ [b]	ÇEVİRİCİ NO		
	1	2	3
V_{dalt}	0.9	0.9	0.9
$V_{üst}$	1.3	1.3	1.3
I_{dalt}	0.2	0.2	0.2
$I_{üst}$	1.5	1.5	1.5
e_{dalt}	0.9	0.9	0.9
$e_{üst}$	1.1	1.1	1.1
t_{dalt}	0.9	0.9	0.9
$t_{üst}$	1.2	1.2	1.2
α_{dalt}	6	6	6
$\alpha_{üst}$	40	40	40
γ_{dalt}	16	16	16
$\gamma_{üst}$	40	40	40
σ	1000	1000	1

Tablo 5.6 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi
Optimal Güç Akış Sonuç Değerleri.

DEĞİŞKENLER	SINIRLAR [b]		BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ [b]	SONUÇ DEĞERLERİ [b]
	ALT	ÜST		
P_{G1}	0.5	2.	1.627	0.5320
P_{G2}	0.2	1.	0.6576	1.1213
P_{G3}	0.2	1.	1.23	1.0675
Q_{G1}	-0.2	1.	0.0438	0.3111
Q_{G2}	-0.4	0.5	0.19	0.3737
Q_{G3}	-0.6	0.45	0.11	0.1585
Q_{C6}	-0.45	0.6	0.21	0.21 (sbt)
Q_{C8}	-0.45	0.6	0.173	0.173 (sb)
V_1	0.9	1.1	1.07	1.0903
V_2	0.9	1.1	1.05	1.0828
V_3	0.9	1.1	0.981	1.1000
V_4	0.9	1.1	1.0137	0.9938
V_5	0.9	1.1	1.023	1.0882
V_6	0.9	1.1	1.01	1.0153
V_7	0.9	1.1	0.996	1.0059
V_8	0.9	1.1	1.026	1.0353
V_9	0.9	1.1	0.9693	0.9939
V_{10}	0.9	1.1	0.9627	1.0032
V_{11}	0.9	1.1	0.9673	1.0456
V_{12}	0.9	1.1	0.9653	1.0789
V_{13}	0.9	1.1	0.96	1.0663
V_{14}	0.9	1.1	0.945	1.0059
δ_1			0	0
δ_2			-3.22	-1.22
δ_3			-8.24	1.95
δ_4			-7.51	-2.88
δ_5			-6.067	-0.65
δ_6			-10.45	-7.13
δ_7			-10.06	-3.34
δ_8			-10	-3.34
δ_9			-11.46	-3.58
δ_{10}			-11.24	-2.81

Tablo 5.6 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi
Optimal Güç Akış Sonuç Değerleri. (Devamı)

DEĞİŞKENLER	SINIRLAR [b]		BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ [b]	SONUÇ DEĞERLERİ [b]
	ALT	ÜST		
δ_{11}			-9.91	-0.46
δ_{12}			-9.91	0.76
δ_{13}			-9.69	0.44
δ_{14}			-11.89	-2.8
t_1	0.9	1.1	1.	1.(sbt)
t_2	0.9	1.1	1.	1.(sbt)
t_3	0.9	1.1	1.	1.(sbt)
I_{d1}	0.2	1.5		0.6946
I_{d2}	0.2	1.5		0.2029
I_{d3}	0.2	1.5		-0.8796
V_{d1}	0.9	1.3	1.3	1.0033
V_{d2}	0.9	1.3	1.3	0.9866
V_{d3}	0.9	1.3	1.3	0.9800
α_1	6	40	6.	19.955
α_2	6	40	6.	24.918
γ_3	16	40	16	17.770
ϕ_1				-21.252
ϕ_2				-25.566
ϕ_3				-20.629
P_{d1}			0.811	0.6969
P_{d2}			0.2	0.2001
P_{d3}			-1.1	-0.8796
Q_{d1}				0.2530
Q_{d2}				0.0930
Q_{d3}				0.2819
t_{d1}	0.9	1.2	1.	1.005
t_{d2}	0.9	1.2	1.	1.005
t_{d3}	0.9	1.2	1.	1.050
e_1	0.9	1.1		1.0229
e_2	0.9	1.1		0.9918
e_3	0.9	1.1		0.9937

Tablo 5.6 IEEE Değiştirilmiş 14 Bara AA-DA Sistemi
Optimal Güç Akış Sonuç Değerleri. (Devamı)

P_1			-21.252
P_2			-25.566
P_3			-20.699
Yakıt Maliyeti [\$/Saat]	297.08	278.48	
İletim Kayıpları [MW]	12.264	8.592	

Tablo 5.7 IEEE 14 Bara Değiştirilmiş AA-DA Sistemi
Optimal Güç Akışı Yakınsama İterasyon Değerleri.

İTERASYON SAYISI	TÜRÜ	KAYIP [MW]	YAKIT MALİYETİ [\$/Saat]
1	P	11.146	280.75
2	P	10.204	279.67
3	P	10.347	278.75
4	P	10.195	278.55
5	P	10.25	278.50
6	P	10.21	278.48
1	Q	9.867	278.48
2	Q	9.600	278.48
3	Q	9.384	278.48
4	Q	9.199	278.48
5	Q	9.047	278.48
6	Q	8.924	278.48
7	Q	8.810	278.48
8	Q	8.714	278.48
9	Q	8.789	278.48
10	Q	8.697	278.48
11	Q	8.619	278.48
12	Q	8.537	278.48
AA-DA İterasyon Sayısı :29			
P İterasyon Sayısı : 6			
Q İterasyon Sayısı :12			
Max.Güç Toleransı :0.0001			
Opt.Durdurma Toleransı:0.07			

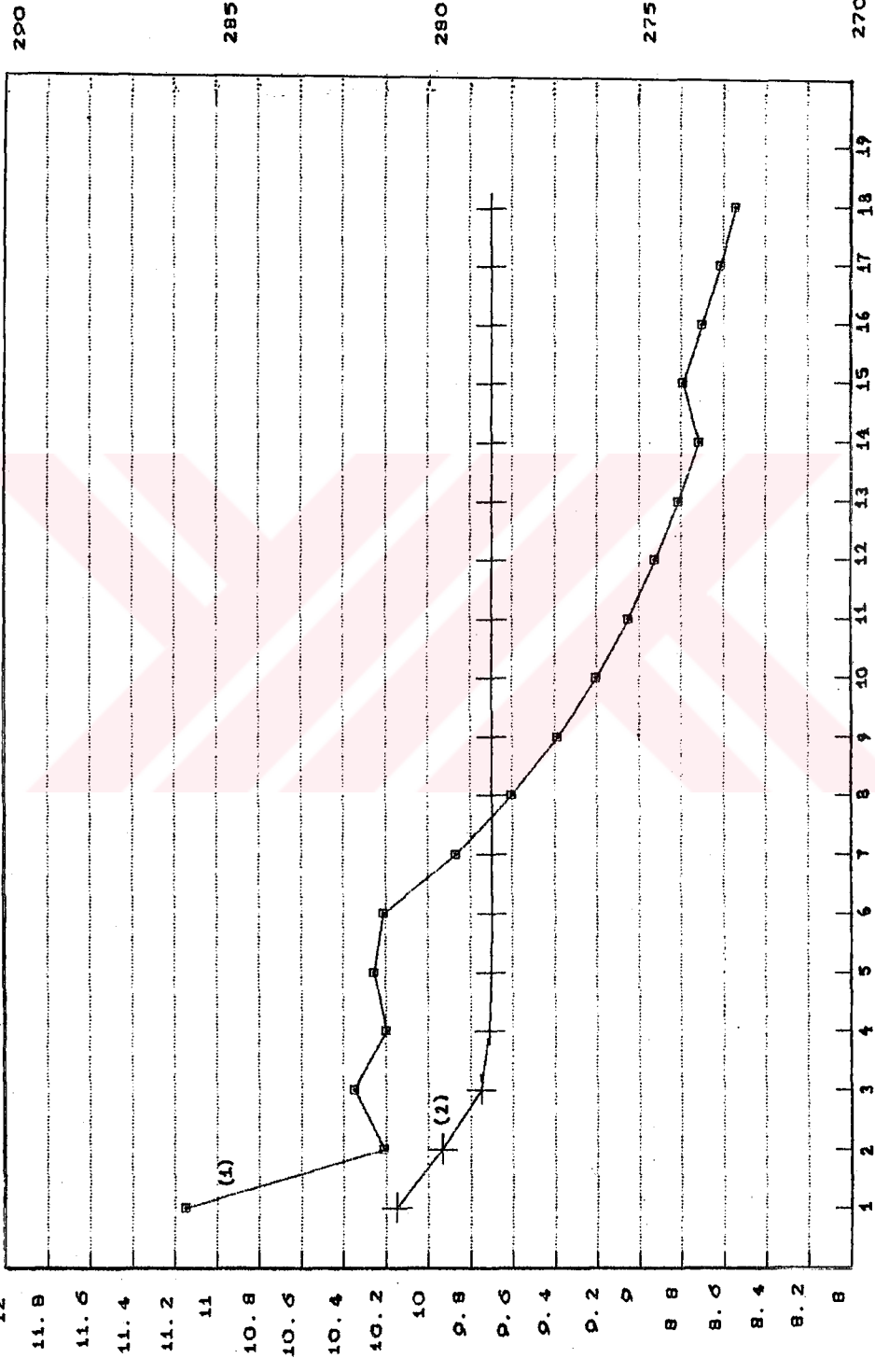
Tablo 5.8 IEEE 14 Bara Sistemi Üzerinde Yapılan AA Optimal Güç Akışı Sonuçları ile Tezde Elde Edilen AA-DA Optimal Güç Akışı Sonuçlarının Karşılaştırılması.

YAKIT MALİYETİ [\$/Saat]			KAYIP [MW]		
A	B	C	A	B	C
1135.9	1134.86	278.5	9.22	8.92	8.53
A : Kaynak [72] B : Kaynak [73] C : Önerilen Yaklaşımda					

Bu çalışmada iterasyon sayısının normal sınırlar içinde kaldığının kontrolü için aynı yöntemi kullanan bir çalışma [50] ile karşılaştırma yapılmıştır. Göz önüne alınan çalışmada [50], P aktif güç optimizasyonu iterasyon sayısı 7, Q reaktif güç optimizasyonu iterasyon sayısı 11 olmuştur. Bu tezde kullanılan AA-DA güç akışı yaklaşımının P aktif ve Q reaktif güç optimizasyonundaki iterasyon sayısının artmadığı görülmektedir (Şekil 5.2).

YAKIT MALİYETİ (2)
[\$/saat]

KAYIP (1)
[MW]



Sekil 5.2 Tablo 5.7 ile Verilen Sonuçlara İlişkin Eğriler.

İTERASYON

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Alternatif akım-doğru akım (AA-DA) optimal güç akışı-na ait çalışmalar, henüz dünya literatüründe çok az yer almaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların azlığı, AA-DA güç sistemlerinin AA sistemlerine göre uygulamada daha az kullanılması ile açıklanabilir. AA-DA güç sistemlerinin uygulamada karşılaşılan en önemli sorunları, doğrultma, evirme ve bunların sonucu olarak ortaya çıkan harmonik üretimi ve güç kayıplarıyla güç elektroniği elemanlarının büyük güçlerde üretilme problemlerinden kaynaklanmaktadır. Bölüm 1 de anlatıldığı gibi güç elektroniği elemanlarının bugün ulaşmış olduğu güç düzeyi göz önüne alındığında, yakın gelecekte AA-DA sistemlerinin uygulamasıyla çok daha sık olarak karşılaşılabileceğini tahmin etmek zor olmayacaktır. Bunun göze çarpan olumlu işaretlerinden biri de, bu konu ile ilgili olarak yazılan makalelerde ve güç sistemlerini konu alan, '90 lı yıllarda basılan ve literatürde genel kabul gören eserlerde, AA-DA güç sistemlerine ayrılan hacimlerin artması ile de görülmektedir.

Sunulan bu çalışma ile ilk defa negatif gradient yöntemi yardımıyla AA-DA optimal güç akışı gerçekleştirilmiş ve yine ilk olarak bir ayırık AA-DA güç akışı yaklaşımı optimizasyon hesaplamalarında kullanılabilir duruma getirilmiştir. Bu işlemleri yapmak amacı ile yeni bir algoritma ve buna bağlı olarak bilgisayar programı geliştirilmiştir. Ayrıca, çevirici transformatörü kademe ayar değerleri ve referans çevirici çıkışı doğru gerilim değerinin kontrol değişkenleri olarak seçilmesi ile de, algoritma içinde yapılan hesaplamalar optimizasyon sürecine taşınarak güç akışı hesaplama süresi azaltılmıştır. Geliştirilen programda AA sistemi içinde yer alan kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değerleri bara admitans matrisine

sokulmadan güç akışı hesaplamalarında kullanılmıştır. Böylece kademe ayarının değişen her yeni değeri için bara admitans matrisinin tekrar hesaplanmasına gerek olmaksızın optimizasyon hesaplamalarında kolaylıklar sağlanmıştır. Bunlardan başka ayırık yöntem yaklaşımına ait tüm eşitlikler yeni tanımlanan bir Lagrange sabiti ile optimizasyon hesaplamalarına taşınmış ve böylelikle AA-DA optimizasyonuna yeni bir görüş getirilmiştir.

Yapılan AA-DA optimal güç akışı çalışması ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- i- Literatürde Newton yöntemine göre üstünlüğü kanıtlanmış olan ayırık DA güç akışı yönteminin optimizasyon hesaplamalarında kullanılabilmesi için bazı değişikliklerin yapılması kaçınılmazdır. Çalışmaya sokulan bu değişikliklere rağmen, AA-DA iterasyon sayısında olumsuz yönde bir artış gözlenmemiştir.
- ii-Önerilen yöntem kullanılarak ayırık DA güç akışının üstünlükleri optimizasyon hesaplamalarına taşınmaktadır. Bunun en belirgin sonucu, güç akışı hesaplamasının kısa zamanda yakınsaması ve Newton yöntemine göre daha az bilgisayar belleği gerektirmesidir.
- iii-Çalışma içinde kullanılan optimizasyon yöntemi ile istenirse yalnız aktif güç veya reaktif güç optimizasyonu da ayrı ayrı gerçekleştirilebilir.
- iv-Doğru akım güç akışı yönteminin uygunluğundan dolayı çeviriciler gerilim, akım, güç ya da açı kontrollü halle kolaylıkla getirilebilir. Bu işlem optimizasyon tekniğinde herhangi bir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilebilir.
- v-Önerilen optimizasyon programında, herhangi bir AA güç akışı programı değişiklik yapılmadan kullanılabilir.
- vi-AA-DA güç sistemindeki bara sayısının artması ile AA-DA güç akışı iterasyon sayısı değişmemekte ve bu üstünlük optimizasyon hesaplamalarına aynen

yansıtılmaktadır.

- vii-Optimizasyonda kullanılan yöntem gereği aynı döngüde hem aktif hem de reaktif güç optimizasyonu gerçekleştirilmektedir. Tek başına aktif ya da reaktif güç optimizasyonu yapılırsa, daha düşük bir kayıp güç veya maliyet değeri elde edilebilir.
- viii-Doğru akım hat sayısının artmasıyla bu çalışmada kullanılan AA-DA güç akışı yaklaşımının, Newton yöntemi-ne göre üstünlükleri daha da önem kazanmaktadır.
- ix- Önerilen AA-DA güç akışı yöntemi, diğer optimizasyon yaklaşımları ile de kullanılabilir niteliktedir.
- x- Çalışmada kullanılan optimizasyon tekniği, yeni durum değişkenlerine gerek olmaksızın yalnızca kontrol de-ğişkenlerini değiştirerek hem aktif hem de reaktif güç optimizasyonunun yapılabilmesine imkan sağlamaktadır.

Yapılan çalışmayla elde edilen sonuçlar incelendiğin-de bazı noktalar dikkate değer görülerek şu öneriler yapılabılır.

- i- IEEE test sistemleri AA sistemi üzerinde yapılacak incelemelere uygun bir şekilde düzenlenmişlerdir. Bu sistemleri AA-DA sistemlerine dönüştürmek için yapı-lan değişiklikler yüzünden generatörlere ait gerek aktif, gerekse reaktif güç sınırlarının aşılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Böyle bir olumsuz et-kiyi yok etmek için güç sınırlarının değiştirilmesi yoluna gidilebileceği gibi, AA-DA sisteminin bazı noktalarına veya doğru akım hatlarının ortalarına ye-ni yükler bağlamak gibi çözümler uygulanabilir.
- ii- Bir sistemden iletilebilen aktif güç değeri, sistem empedansı azaldıkça artmaktadır. Bu yüzden sistem em-pedansını azaltıcı yönde etki yapan doğru akım hatla-rının generatörden çekilen aktif gücün miktarını art-tırması söz konusudur. Aynı zamanda sistemi daha

kararlı kılan bu özelliğın yukarıda bahsedilen yan etkileri bulunmaktadır. Sistem korumasında bu etkilerin göz önüne alınması gerekir.

- iii- Sunulan çalışmada optimizasyon hesaplamaları, çok uçlu bir kutuplu AA-DA sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. İki kutuplu örnek sistem üzerinde yapılarak elde edilen sonuçlar, Newton yöntemi sonuçları ile karşılaştırılabilir.
- iv- AA-DA güç akışı algoritmasının DA güç akışı parçası iteratif yöntemle yapılmaktadır. AA-DA sistemi içinde yer alan DA hat sayısının AA sisteminin hat sayısına göre artması durumunda ise, yakınsamanın yavaşlaması kaçınılmaz olacaktır. Fakat pratikte DA ile iletim ancak uzun mesafeler için kullanım alanına girdiğinden, DA hat sayısı daima AA hat sayısının çok altında kalmaktadır. Bu yüzden yakınsamada yavaşlama probleminin etkisi olmamaktadır.
- v- Literatürde AA-DA sistem incelemelerinde yapılan kabuller gereği, doğrultma sonucunda doğru akım hatlarındaki gerilimin düzgün olduğu, evirme sonucunda ise AA tarafına aktarılan gerilimin birinci harmoniği dışındaki harmoniklerinin göz önüne alınmadığı hatırlanmalıdır. Özellikle AA-DA güç sistemlerinde reaktif güç kaybı gerilim dalga şekli değişmesinden kaynaklandığı için, optimizasyon sonucunda elde edilen kayıp değerlerinin gerçek değerlerden bir miktar farklı olacağı da bilinmelidir.
- vi- DA sistemindeki değişkenlerin bir kısmı kontrol, geri kalanlar ise durum değişkeni olarak seçilmiştir. Bu tercihte farklı yaklaşımlar da düşünülebilir. Ancak sunulan tezde en uygun tercih yapılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde bu seçimin doğru yönde yapıldığı anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [11] NOZARI F., PATEL H.S., Power Electronics in Electric Utilities: HVDC Power Transmission Systems, IEEE Proc. Vol.76, No. 4, pp. 495-506, April 1988.
- [12] BIGGS R.B., JEWEL W.T., Summary of Multiterminal High Voltage Direct Current Transmission Technology, Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/TM-8724
- [13] OPOKU G., ONG C.M., Coordination of Reactive Power Sources to Correct Bus Voltage Violations in an AC-DC System, IEEE Trans. PAS. Vol. 103, pp. 1128-1134, June 1984.
- [14] CHOUDHRY M.A., CARROL D.P., Coordinated Active and Reactive Power Modulation of Multiterminal HVDC Systems, IEEE Trans. PAS. Vol. 103, pp. 1480-1485, June 1984.
- [15] RUMPF E., The Operational Performance of HVDC Systems Throughout the World During 1975-1978, Proc. of the Symposium on Incorporation HVDC Power Transmission into Systems Planning, pp. 1-23, Phoenix, Arizona, March 1980.
- [16] IEEE Task Force on AC/DC System Dynamics, Dynamic Performance Characteristics of North American HVDC Systems for Transient and Dynamic Stability Evaluation, IEEE Trans. PAS. pp.3356-3364, July 1981.
- [17] HINGORANI G.H., Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems, IEE Proc., Vol. 76, No. 4, pp. 481-482 April 1988.
- [18] ANDERSSON Göran, HVDC Links Used to Stabilize Electric Power Systems, ABB Review, No.2, pp.15-22, 1992.
- [19] SMED T., ANDERSSON Göran, Utilizing HVDC to Damp Oscillations, paper 92 WM 006-7 PWRD. IEEE W.P.M. 1992.

- [10] CRESAP R.L., MITTELSTADT W.A., SCOTT D.N., TAYLOR C.W.,
Operating Experience with Modulation of the Pacific HVDC Intertie. IEEE PES paper F77 658-8,
Mexico City 1977.
- [11] BERGQVIST L.E., HILLBERG C., PRASAD M., KUMAR D., De-
sign of a Modulation Controller for Stabilization
of Parallel AC Lines in the Rihand-Delhi HVDC
Transmission: Cigre Symposium on AC-DC Transmis-
sion Interactions and Comparasions. Report 300-14
Boston 1987.
- [12] PORANGABA H.D., SVENSSON S., MENZIES D., TAAM M., Itai-
pu HVDC Transmission System - Stability Studies
for a Weak AC Systems: Montect '86' Conference on
HVDC Power Transmission pp.130-134, Montreal 1986.
- [13] Guide for Planning DC Links Terminating at AC Sys-
tem Locations Having Low Circuit Capacities. Part
I: AC-DC System Interactions Phenomena, Cigre 1991.
- [14] FRANKEN B., ANDERSSON G., Analysis of HVDC Converters
Connected to a Weak AC Systems. IEEE Trans. on PAS
Vol 5, No. 1, pp. 235-242, 1990.
- [15] FUDEH H., ONG C.M., A Simple and Efficient AC-DC Load
Flow Metod for Multiterminal DC Systems, IEEE Trans
on PAS, Vol. 100, No. 11, pp. 4389-4396, Nov. 1981.
- [16] LAZSLO G., Power Electronics in Electric Utilities:
Static Var Compensators, IEE Proc., Vol. 76, No.4,
pp. 483-494 April 1988.
- [17] HORIGOME T., Circuit Theory of High Voltage DC Current
Transmission System, Electrotec. Lab. (Japan), Re-
search Report 586, 1960.
- [18] HORIGOME T., ITO NOBORU., Digital Computer Method for
the Calculation of Power Flow in an AC-DC Inter-
connected Power System, Proc.IEE Vol.111, No.6
pp. 1137-1144, June 1964.
- [19] HORIGOME T., ITO NOBORU., Analytical Research for Power
Systems, Containing DC transmission Links, Bull.
Electrotech. Lab. (Japan) No.26 pp.321 1962.
- [20] HORIGOME T., On the Steady State Equivalent Circuit

of AC-DC-AC Interconnected Transmission System
Ibid. No.21, pp.19, 1957.

- [21] HORIGOME T., Analysis on the Steady State Characteristics of the HVDC Transmission System by Means of equivalent circuit, Ibid. No. 22, 1958.
- [22] TRIPATHY S.C., PRASAD K.P., Load Flow Solutions for Ill- Conditioned Power Systems by Quadratically convergent Newton Like Method, IEE Proc. vol.127, No.5, pp. 273-280 September 1980.
- [23] MARIA G.A., FINDLAY J.A., A Newton Optimal Power Flow Program for Ontario Hydro EMS, IEEE Trans. on PAS, Vol.2, No.3, pp. 576-581, August 1987.
- [24] BURCHETT R.C., HAPP H.H., WIRGAU K.A., Large Scale Optimal Power flow, IEEE Trans. on PAS, Vol.101 No.10, pp.3722-3732, October 1982.
- [25] LEE K.Y., PARK Y.M., ORTIZ J.L., Optimal Real and Reactive Power Dispatch, Electric Power system Research, No. 7, pp. 201-212, 1984.
- [26] IYER S.R., RAMACHANDRAN K., HARIHARAN S., Optimal Reactive Power Allocation for Improved System Performance, IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 6, pp. 1509-1515, June 1984.
- [27] VENKATARAMANA A., CARR J., RAMSHAW R.S., Optimal Reactive Power Allocation, IEEE Trans. on PAS, Vol. 2, No. 1, pp. 138-144, February 1987.
- [28] SUN I.D., ASHLEY B., BREWER B., HUGHES A., TINNEY W.F., Optimal Power Flow by Newton Approach, IEEE Trans. on PAS, Vol.103, No. 10, pp. 2864-2880, October 1984.
- [29] BALA J.L., THANIKACHALAM A., An Improved Second Order Method For Optimal Load Flow, IEEE Trans. on PAS, Vol.97, No. 4, pp. 1239-1244, July-Aug. 1978.
- [30] DOMMEL H.W., TINNEY W.F., Optimal Power flow Solutions IEEE Trans. on PAS, Vol.87, No.10, pp.1866-76, Oct. 1968.
- [31] ALSAC O., STOTT B., Optimal Load Flow with Steady-State Security, IEEE Trans. on PAS, Vol. 93,

pp.745-751, 1974.

- [32] AGGARWAL R.P., PAN Y., Minimization of Real Power Losses Using Reactive Power Control, Electric Power System Research, No.17, pp.153-157, 1989.
- [33] TALUKDAR S.N., GIRAS T.C., KALYAN V.K., Decompositions for Optimal Power Flows, IEEE Trans. on PAS, Vol. 102, No. 12, pp.3877-3884, December 1983.
- [34] BALA J.L., TAHANIKACHALAM A., An Improved Second Order Method for Optimal Load Flow, IEEE Trans. on PAS, Vol.97, No. 4, pp. 1239-1244, July-Aug. 1978.
- [35] RASHED A.M.H., KELLY D.H., Optimal load Flow solutions Using Lagrangian Multipliers and the Hessian Matrix, IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp.1292-1297, 1974.
- [36] ELANGO VAN S., New Approach for Real Power Loss Minimization, Proc. IEE, Vol.130, No.6, pp. 295-299 November 1983.
- [37] HAPP H.H., Optimal Power Dispatch, IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp.820-830, May-June 1974.
- [38] RAMA S., RAMACHANDRAN K., HARIHARAN S., New Technique for Optimal Reactive Power Allocation for Loss Minimization in Power Systems, IEE Proc. Vol.130, No. 4, pp. 178-182, July 1983.
- [39] CONTAXIS G.C., DELKIS C., KORRES G., Decoupled Optimal Load Flow Using Linear or Quadratic Programming, IEEE Trans. on PAS, Vol.1, No.2, pp.1-7, May 1986.
- [40] STOTT B., Effective Starting Process Newton-Raphson Method Load Flows, Proc.IEE, vol 118, pp.983, Au.1971
- [41] BRAUNAYAL D.A., KRAFT L.A., WHYSONG J.L., Inclusion of the Converter and Transmission Equations Directly in a Newton Power Flow, IEEE Trans. PAS 75, Vol. 1, pp. 76-88, 1976.
- [42] ARRILLAGA J., HARKER B.J., K.S. and TURNER, Clarifying an Ambiguity in Recent AC-DC Load Flow Formulation, Proc.IEE, Vol.127, No.5, pp.324-325, 1980.

- [43] MARSFAWY M.M., MATHUR R.M., A New Fast Technique for Load Flow Solution of Integrated Multiterminal DC-AC Systems, Trans. on PAS. Vol. 99, No. 1, pp.246-255, Jan-Feb. 1980.
- [44] SATO H., ARRILLAGE J., Improved Load Flow Techniques for Integrated AC-DC Systems, Proc. IEE Vol. 116, No.4, pp. 525-532. 1969.
- [45] REEVE J., FAHMY G., STOTT B., Versatile Load Flow Method for Multiterminal HVDC Systems, IEEE Trans. on PAS, Vol.96, No.3, pp.925-933, 1977.
- [46] ARRILLAGA J., ARNOLD C.P., HARKER B.J., Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley and Sons Inc. New York 1983.
- [47] ARRILLAGA J., BODGER P., Integration of HVDC Links With Fast-Decoupled Load Flow Solutions, Proc. IEEE, Vol. 124, No. 5, pp. 463-468, May 1977.
- [48] GLAVER J.D., SARMA M., Power System Analysis and Design with Personal Computer Applications, PWS-KENT Pub. Com. Boston 1989.
- [49] ONG C.M., NEJAT A.R., A General-Purpose Multiterminal DC Load Flow, IEEE Trans.on PAS, Vol. 100, No.7 pp. 3166-3174, July 1981.
- [50] BURCHETT R.C., HAPP H.H, VIERATH D.R., WIRGAU K.A., Developments in Optimal Power Flow, IEEE Trans.on PAS, Vol. 101, No. 2, pp. 406-413, Feb. 1982.
- [51] HAPP H.H, Optimal Power Dispatch-A Comprehensive Survey IEEE Trans.on PAS, Vol.96, pp.841-854, May-June 1977
- [52] DOMMEL H.W., TINNEY W.F., Optimal Power Flow Solutions IEEE Trans.on PAS, Vol.87, pp. 1866-1876, Oc.1968.
- [53] ARRILLAGA J.H., HARKER B.J., BODGER P., Fast Decoupled Load Flow Algorithm for AC-DC Systems, IEEE paper A-78, 555-5, PES Summer Meeting, Los Angeles, July 16-21, 1978.

- [54] STOTT B., Load Flow AC and Integrated AC-DC Systems, Ph.D. Thesis, University of Manchester, 1971.
- [55] TYLAVSKY D.J., TRUTT F.C., The Newton Raphson Load Flow Applied to AC-DC Systems with Commutation Impedance, IEEE Trans. on Ind. App. Vol. IA-19, No. 6, pp.940-948, Nov-Dec. 1983.
- [56] HEYDT G.T., Computer Analysis Methods for Power Systems Macmillan Pub. Com. New York, 1986.
- [57] STOTT B., HOBSON E., Solution of Large Power System Networks by Ordered Elimination: A Comparison of Ordering Schemes, Proc. IEE, Vol.118, No.1, pp. 125-134, Jan. 1971.
- [58] SATO N., TINNEY W.F., Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix, IEEE Trans. PAS 82, pp.944-950, 1963.
- [59] BAUMANN R., Some New Aspects on Load Flow Calculation: 1-Impedance Matrix Generation Controlled by Network Topology, Ibid., PAS 85, pp.1164-1176, 1966.
- [60] TINNEY W.F., WALKER J.W., Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorisation, Proc. Inst. Elect. Electron. Engrs. 55, pp.1801-1809, 1967.
- [61] PARTER S., The use of linear Graphs in Gaussian Elimination, SIAM Rev., No.3, pp., 119-130, 1961.
- [62] OGBUOBIRI E.C., TINNEY W.F., WALKER J.W., Sparsity Directed Decomposition For Gaussian Elimination on Matrices, IEEE Trans. PAS-89, pp. 141-150, 1970.
- [63] OGBUOBIRI E.C., Dynamic Storage and Retrieval in Sparsity Programming, Ibid. pp. 150-155.
- [64] ZOLLENKOPE K., Bi-Factorisation- Basic Computational Algorithm and Programming Techniques, Proc. on Conference on Sparse Matrix Technique, Oxford April 1970.
- [65] HOBSON E., Ordered Elimination in the Direct Solution of Sparse Electrical Power Networks, M.Sc. Dissertation, UMIST, Manchester 1969.

- [66] OPOKU G., ONG C.M., Coordination of Reactive Power Sources to Correct Bus Voltage Violations in an AC-DC Systems, IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 6, pp. 1128-1134. June 1984.

- [67] IEEE Committee Report, EHV Operating Problems Associated with Reactive Control. IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 3, pp. 1376-1381, March 1981.

- [68] ARRILLAGA J., HYLAND P., Twelve- Pulse Back to Back AC-DC Conversion for Reactive Power Control, IEE Proc. Vol. 129, Pt. C, No. 5, pp. 206-212, Sep. 1982.

- [69] KONISHI H., AMANO H., WATANABE A., KAWAI T., KANO T., Studies on Var and AC Voltage Control By HVDC Converters, IEEE Conference Publication No. 205, Thyristor and Variable Static Equipment for AC and DC Transmission, pp. 182-185.

- [70] ONG C.M., FUDEH H., AC Power Flow Control With a Multiplier DC System, IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 11, pp. 4686-4691, Nov. 1981.

- [71] NOZARI F., CARROLL D.P., A New Control Method for Multiterminal DC Transmission, IEEE Trans. on PAS Vol. 96, No. 2, March-April, 1977.

- [72] REID GERALD F., HASDORFF LAWRENCE, Economic Dispatch Using Quadratic Programming, IEEE Trans. on PAS Vol. 92, pp. 2015-2023, Nov./Dec. 1973.

- [73] NANDA J., KOTHARI D.P., SRIVASTAVA S.C., New Optimal Power Dispatch Algorithm Using Fletcher's Quadratic Programming Method, IEE Proc., Vol. 136 Part C, No. 3, pp. 153-161, May 1989.

EK A

MATRİS ELEMANLARININ UYGUN FORMDA SIRALANMASINA İLİŞKİN BİLGİSAYAR PROGRAMI

(2.57) ifadesi ile verilen $J.Ax = g$ matris eşitliğindeki (X ve B vektör matrisler) J Jacobien matrisinin yapısı, AA-DA enerji sistemindeki baraların bir hesaplama tekniğine (ordering technique) dayanarak elde edilen bir sıra ile numaralanması halinde, çözüm için çok elverişli bir şekil alır [54]. J matrisi uygun bir satır-sütun düzeninde sıralanırsa, $J.Ax = g$ denkleminin çözümünde faydalanan yöntem (Crout-elimination) daha verimli olarak kullanılabilir.

Yukarıda belirtilen amaca uygun olarak gerçekleştirilen FORTRAN programlama dilinde yazılan program ve bu programda kullanılan büyüklükler aşağıda tanımlanmıştır.

n : Bara sayısı.
nb : Hat sayısı. (paralel hatlar içinde)
nd : LIST,LISTJ,LR vektör matris boyutu.
nbd : ISEND,IREC vektör matris boyutu.
nu : LU vektör matris boyutu.
iorder : 0 (pre-ordering metod için)
iorder : 1 (dynamic-ordering metod için)
ier : Hata bildirici (0 için hata yok, 1 için var)
LR,LU : Program içi vektör matrisler.
ISEND(j): j.hattın gönderici bara numarası.
IREC(j) : j.hattın alıcı bara numarası.
LIST(j) : Hesaplama öncesi sistem bara sıralaması.
LISTJ(j): Hesaplama sonrası sistem bara sıralaması.

```

c23456 dimension isend(nbd),irec(nbd),list(nd),listj(nd)
      dimension lr(nd),lu(nu)
      read(5,*) n,nu,nb,nd,nbd,iorder
      read(5,*) (isend(i),i=1,nbd)
      read(5,*) (irec(i),i=1,nbd)
      nrow=nu/n
      ier=0
c      ilk satır sıfırlama ve adresleme
      do 10 i=1,n
        list(i)=0
        lr(i)=nrow*i-nrow
10     listj(i)=i
        do 80 j=1,nb
          i=isend(j)
          k=irec(j)
          if((i-k).lt.0) then
            goto 20
          else
            endif
          if((i-k).eq.0) then
            goto 80
          else
            endif
          if((i-k).gt.0) then
            goto 20
          else
            endif
c      paralel hat kontrolü
20     l=nrow*i-nrow
        m=lr(i)
30     l=l+1
        if((l-m).le.0) then
          goto 40
        else
          endif
        if((l-m).gt.0) then
          goto 50

```

```

else
endif
40  if((lu(l)-k).lt.0) then
    goto 30
    else
    endif
    if((lu(l)-k).eq.0) then
    goto 80
    else
    endif
    if((lu(l)-k).gt.0) then
    goto 30
    else
    endif
50  list(i)=list(i)+1
    list(k)=list(k)+1
    lr(j)=lr(i)+1
    lr(k)=lr(k)+1
    li=lr(i)
    lk=lr(k)
    lu(li)=k
    lu(lk)=i
80  continue
    if(iorder.lt.0) then
    goto 81
    else
    endif
    if(iorder.eq.0) then
    goto 85
    else
    endif
    if(iorder.gt.0) then
    goto 81
    else
    endif
81  do 82 i=1,n
82  lr(i)=list(i)

```

```

85  continue
    do 399 i=1,n
      write(6,*) 'list,listj'
      399  write(6,*) list(i),listj(i)
c   satır sıfırlaması ( pre-ordering metod ile)
      l1=0
      l2=0
      l3=0
      i=-1
      j=0
90   i=i+1
      k=j+1
      do 110 l=k,n
        if((list(l)-i).lt.0) then
          goto 110
        else
          endif
        if((list(l)-i).eq.0) then
          goto 100
        else
          endif
        if((list(l)-i).gt.0) then
          goto 110
        else
          endif
100  j=j+1
      list(l)=list(j)
      list(j)=listj(l)
      listj(l)=listj(j)
110  continue
116  if((j-n).lt.0) then
      goto 90
    else
      endif
    if((j-n).ge.0) then
      goto 120
    else
      endif

```

```

120  do 130 i=1,n
      k=list(i)
130  listj(k)=i
      if(iorder.lt.0)then
        goto 140
      else
        endif
      if(iorder.eq.0)then
        goto 2000
      else
        endif
      if(iorder.gt.0)then
        goto 140
      else
        endif
c    satır sıfırlaması-dynamic ordering method
c    list vektörü içindeki düğüm grup adresleri sonu
140  do 190 i=1,n
      li=list(i)
      nli=lr(li)
      if((nli-1).lt.0)then
        goto 160
      else
        endif
      if((nli-1).eq.0)then
        goto 150
      else
        endif
      if((nli-1).gt.0)then
        goto 160
      else
        endif
150  l1=i
      goto 190
160  if((nli-2).lt.0)then
        goto 180
      else

```

```

endif
if ((nli-2).eq.0)then
goto 170
else
endif
if ((nli-2).gt.0)then
goto 180
else
endif
170  l2=i
goto 190
180  if ((nli-3).lt.0)then
goto 190
else
endif
if ((nli-3).eq.0)then
goto 185
else
endif
if ((nli-3).gt.0)then
goto 190
else
endif
185  l3=i
190  continue
ifull=0
nm2=n-2
do 1000 noad=1,nm2
next=list(noad)
l=nrow*next-nrow+1
m=l+lr(next)-1
c bağılı düğümlerin bağlantı listesinden sonrasının iptali
i=l+1
200 i=i+1
if ((i-m).le.0) then
goto 210
else

```

```

endif
if((i-m).gt.0) then
goto 240
else
endif
210 ii=lu(i)
ll=nrow*ii-nrow+1
mm=ll+lr(ii)-1
do 230 k=ll,mm
if((lu(k)-next).lt.0) then
goto 230
else
endif
if((lu(k)-next).eq.0) then
goto 220
else
endif
if((lu(k)-next).gt.0) then
goto 230
else
endif
220 lu(k)=lu(mm)
lr(ii)=lr(ii)-1
goto 200
230 continue
c      sonrakine bağlı düğümlerin ortak bağlantısı
240 i=l-1
250 i=i+1
if((i-m).le.0) then
goto 260
else
endif
if((i-m).gt.0) then
goto 530
else
endif
endif

```

```

260  ii=lu(i)
      nlold=lr(ii)+1
      ll=nrow*ii-nrow+1
      mm=ll+nlold-2
      mmm=mm
      j=1-1
270  j=j+1
      if((j-m).le.0) then
        goto 280
      else
        endif
      if((j-m).gt.0) then
        goto 300
      else
        endif
280  jj=lu(j)
      if((jj-ii).lt.0)then
        goto 285
      else
        endif
      if((jj-ii).eq.0)then
        goto 270
      else
        endif
      if((jj-ii).gt.0)then
        goto 285
      else
        endif
285  do 290 k=ll,mm
      kk=lu(k)
      if((jj-kk).lt.0)then
        goto 290
      else
        endif
      if((jj-kk).eq.0)then
        goto 270
      else

```

```

endif
if((jj-kk).gt.0)then
goto 290
else
endif
290 continue
mmm=mmm+1
lu(mmm)=jj
lr(ii)=lr(ii)+1
if((lr(ii)-nrow).le.0) then
goto 270
else
endif
if((lr(ii)-nrow).gt.0) then
goto 295
else
endif
295 ier=ii
goto 2000
c siralama(order) in guncellestirilmesi
300 if(ifull.lt.0) then
goto 250
else
endif
if(ifull.eq.0) then
goto 305
else
endif
if(ifull.gt.0) then
goto 250
else
endif
305 nlnew=lr(ii)
lj=listj(ii)
if((nlnew-nlold).lt.0) then
goto 330
else

```

```

endif
if((nlnew-nlold).eq.0) then
goto 250
else
endif
if((nlnew-nlold).gt.0) then
goto 310
else
endif
310 if((nlold-3).le.0) then
goto 320
else
endif
if((nlold-3).gt.0) then
goto 250
else
endif
320 ln=13
l3=13-1
goto 520
330 if((nlold-3).lt.0)then
goto 340
else
endif
if((nlold-3).eq.0)then
goto 370
else
endif
if((nlold-3).gt.0)then
goto 430
else
endif
340 if((noad-11).lt.0)then
goto 360
else
endif
if((noad-11).ge.0)then

```

```
        goto 350
    else
    endif
350  l1=noad
360  l1=l1+1
    ln=l1
    goto 520
370  if((noad-l2).lt.0) then
    goto 410
    else
    endif
    if((noad-l2).ge.0) then
    goto 380
    else
    endif
380  if((noad-l1).lt.0) then
    goto 400
    else
    endif
    if((noad-l1).ge.0) then
    goto 390
    else
    endif
390  l2=noad+1
    goto 420
400  l2=l1+1
    goto 420
410  l2=l2+1
420  ln=l2
    goto 520
430  if((nlold-4).le.0) then
    goto 440
    else
    endif
    if((nlold-4).gt.0) then
    goto 250
```

```

        else
        endif
440  if ((noad-13).lt.0)then
        goto 480
        else
        endif
        if ((noad-13).ge.0)then
        goto 450
        else
        endif
450  if ((noad-12).lt.0)then
        goto 490
        else
        endif
        if ((noad-12).ge.0)then
        goto 460
        else
        endif
460  if ((noad-11).lt.0)then
        goto 500
        else
        endif
        if ((noad-11).ge.0)then
        goto 470
        else
        endif
470  13=noad
480  13=13+1
        goto 510
490  13=12+1
        goto 510
500  13=11+1
510  1n=13
520  k=list(1n)
        list(1j)=k
        listj(k)=1j
        list(1n)=ii

```

```

        listj(ii)=ln
        goto 250
530   noad1=noad+1
        next=list(noad1)
        if((lr(next)-3).le.0) then
            goto 1000
        else
            endif
        if((lr(next)-3).gt.0) then
            goto 540
        else
            endif
c      azaltilmis sira dolunca guncellestirme
540   ifull=1
        min=1000
        do 560 ij=noad1,n
            ik=list(ij)
            if((lr(ik)-min).lt.0)then
                goto 550
            else
                endif
            if((lr(ik)-min).ge.0)then
                goto 560
            else
                endif
550   min=lr(ik)
        il=ik
        im=ij
560   continue
        list(noad1)=il
        list(im)=next
        listj(il)=noad1
        listj(next)=im
1000  continue
2000  write(6,*) 'ier'
        write(6,*) ier
        write(6,*) 'i,list(i)'

```

EK B

BÜYÜK BOYUTLU MATRİS TERSİ ALAN BİLGİSAYAR PROGRAMI

Aşağıda, $A.X = B$ matris denklemi ile verilen ifade-
de (X ve B vektör matrisler) X matrisinin bulunması için
FORTRAN programlama dilinde yazılmış bir program verilmiş-
tir. Bu programda kullanılan A matrisi ana köşegeni 'üze-
rinde sıfır elemanı bulunmamalıdır. A matrisi asimetrik
yapıda olabilir [54].

(2.57) ifadesi ile verilen $J.Ax = g$ matris eşitli-
ği yukarıda gösterilen $A.X = B$ matris denkleminin karşı dü-
şürülebilir. J matrisi Ek A ile verilen program yardımı
ile uygun bir satır-sütun düzeninde sıralanırsa, $J.Ax = g$
denkleminin çözümünde kullanılan yöntemden (Crout elimi-
nation) daha verimli olarak faydalanılabilir.

Özellikle çok sayıda bara içeren enerji sistemlerin-
de, baralar arasındaki hatların sayısı az olduğundan, J
Jacobien matrisi içinde çok sayıda sıfır elemanına rastla-
nır. Yalnızca sıfırdan farklı olan elemanların data ola-
rak bilgisayar belleğine yerleştirilmesine dönük işlemler
(compacting), J matrisinin bellekte kaplayacak hacimi en
aza indirmek için yapılır. Aşağıda verilen program ay-
nı zamanda A matrisinin bu şekilde (compact form) yüklen-
mesini de sağlamaktadır. Verilen programda kullanılan bü-
yüklükler aşağıda gösterilmiştir.

- n : Eşitlik sayısı.
- nd : LA,W,D,DIAG vektör matris boyutları.
- nu : U,LU vektör matris boyutu.
- nu : LU vektör matris boyutu.
- ier : Hata bildirici (0: hata yok, -1: U ve LU vektör
matrisleri boyutu küçük, k: k.pivot sıfır)
- D : Program içi vektör matris. (Program sonunda X
matrisine dönüşecek)
- DIAG: A matrisinin ana köşegen üzerindeki elemanları.
- U : A matrisinin ana köşegen dışındaki elemanları.
(A matrisi sütun düzeninde yüklenir. Sıfır ele-
manları göz önüne alınmaz)
- LU : U matrisi elemanlarının sütun numaraları.
- LA : A matrisi içindeki (U matrisine yazılabilen)
her bir satırda bulunan eleman sayısı.

```

c      dimension la(nd),w(nd),d(nd),diag(nd),u(nu),lu(nu)
      dimension left(30),iright(30)
      read(5,*) nd,nu
      read(5,*) (d(i),i=1,nd)
      read(5,*) (diag(i),i=1,nd)
      read(5,*) (la(i),i=1,nd)
      read(5,*) (u(i),i=1,nu)
      read(5,*) (lu(i),i=1,nu)
      ier=0
      l=0
      lak=la(1)
      la(1)=1
      n=nd
      do 10 i=1,n
10      w(i)=0.
      k=0
15      k=k+1
      il=0
      ir=0
      if((k-n).lt.0) then
      goto 30
      else
      endif
      if((k-n).eq.0) then
      goto 20
      else
      endif
      if((k-n).gt.0) then
      goto 190
      else
      endif
20      mm=nu
      goto 40
30      mm=la(k+1)-1
40      j=lak-1
      w(k)=w(k)+diag(k)
45      j=j+1

```

```

    if((j-mm).le.0) then
      goto 50
    else
      endif
    if((j-mm).gt.0) then
      goto 56
    else
      endif
50  i=lu(j)
    if(w(i).lt.0) then
      goto 51
    else
      endif
    if(w(i).eq.0) then
      goto 52
    else
      endif
    if(w(i).gt.0) then
      goto 51
    else
      endif
51  w(i)=w(i)+u(j)
    goto 45
52  if((i-k).le.0) then
    goto 53
    else
      endif
    if((i-k).gt.0) then
      goto 54
    else
      endif
53  il=il+1
    left(il)=i
    goto 55
54  ir=ir+1
    iright(ir)=i
55  w(i)=u(j)

```

```

        goto 45
56  if (i1.le.0) then
        goto 100
        else
        endif
        if ((i-k).gt.0) then
        goto 57
        else
        endif
57  i=1000
        do 60 m=1,i1
        lm=left(m)
        if ((lm-i).lt.0) then
        goto 58
        else
        endif
        if ((lm-i).ge.0) then
        goto 60
        else
        endif
58  i=lm
        im=m

60  continue
        left(im)=left(i1)
        i1=i1-1
70  aa=w(i)
        w(i)=0
        d(k)=d(k)-aa*d(i)
        j=la(i)-1
        mm=la(i+1)-1
75  j=j+1
        if ((j-mm).le.0) then
        goto 80
        else
        endif
        if ((j-mm).gt.0) then
        goto 56

```

```

      else
      endif
80  l1=lu(j)
      if(w(l1).lt.0) then
      goto 81
      else
      endif
      if(w(l1).eq.0) then
      goto 82
      else
      endif
      if(w(l1).gt.0) then
      goto 81
      else
      endif
81  w(l1)=w(l1)-aa*u(j)
      goto 75
82  if((l1-k).lt.0) then
      goto 83
      else
      endif
      if((l1-k).eq.0) then
      goto 85
      else
      endif
      if((l1-k).gt.0) then
      goto 84
      else
      endif
83  il=il+1
      left(il)=l1
      goto 85
84  ir=ir+1
      irect(ir)=l1
85  w(l1)=-aa*u(j)
      goto 75
100 continue

```

```

110  if((abs(w(k))-0.00001).le.0) then
      goto 120
    else
      endif
    if((abs(w(k))-0.00001).gt.0) then
      goto 130
    else
      endif
120  ier=k
      goto 250
130  dd=1./w(k)
      w(k)=0.
      d(k)=d(k)*dd
      if(ir.le.0) then
        goto 180
      else
        endif
      if((l1-k).gt.0) then
        goto 140
      else
        endif
140  do 170 j=1,ir
      l=l+1
      if((l-la(k+1)).lt.0) then
        goto 160
      else
        endif
      if((l-la(k+1)).ge.0) then
        goto 150
      else
        endif
150  ier=-1
      goto 250
160  i=iright(j)
      lu(l)=i
      u(l)=w(i)*dd
      w(i)=0.

```

```

170  continue
180  lak=la(k+1)
    la(k+1)=l+1
    goto 15
190  continue
    k=n
195  k=k-1
    if((k-1).lt.0) then
        goto 220
    else
        endif
    if((k-1).ge.0) then
        goto 196
    else
        endif
196  i=la(k)-1
    mm=la(k+1)-1
200  i=i+1
    if((i-mm).le.0) then
        goto 210
    else
        endif
    if((i-mm).gt.0) then
        goto 195
    else
        endif
210  m=lu(i)
    d(k)=d(k)-u(i)*d(m)
    goto 200
220  continue
250  write(6,*) 'cikis vektoru x=b'
    write(6,*)(d(i),i=1,nd)
    write(6,*) 'w(i)'
    write(6,*)(w(i),i=1,nd)
    write(6,*) 'ier'
    write(6,*) ier
    stop
end

```

ÖZGEÇMİŞ

Uğur ARİFOĞLU, 1962 yılında Zonguldak-Kilimli de doğdu. 1979 yılında İstanbul Vefa Lisesi'ni 1984 yılında İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesini bitirdi. Daha sonra İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimi tamamladı. 1988 yılında aynı kurumda doktora eğitime başladı. 1986 yılından beri Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
T.C. KURUMSAL YERİ
T.C. KURUMSAL YERİ