

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FACTS CİHAZLARI İÇEREN AA-DA SİSTEMİNDE
OPTİMAL GÜÇ AKIŞI HESABI İÇİN YENİ BİR
YAKLAŞIM**

DOKTORA TEZİ

Elk. Y. Müh. Faruk YALÇIN

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK VE ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU

Nisan 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FACTS CİHAZLARI İÇEREN AA-DA SİSTEMİNDE
OPTİMAL GÜÇ AKIŞI HESABI İÇİN YENİ BİR
YAKLAŞIM**


DOKTORA TEZİ


Eik. Y. Müh. Faruk YALÇIN

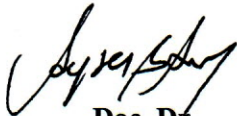
**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK VE ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 05 / 04 / 2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


**Prof. Dr.
Uğur ARİFOĞLU
Jüri Başkanı**


**Doç. Dr.
Yılmaz UYAROĞLU
Üye**


**Doç. Dr.
Ali ÖZTÜRK
Üye**


**Doç. Dr.
Aysen Basa ARSOY
Üye**

**Yrd. Doç. Dr.
Kürşat AYAN
Üye**



ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans tez çalışmalarında olduğu gibi doktora çalışmamda da bana her türlü desteği veren değerli hocam sayın Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU' na ve doktora çalışmamdaki katkılarını esirgemeyen sayın Dr. Ulaş KILIÇ' a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xvi
TABLolar LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. AA–DA Enerji İletim Sistemlerine Genel Bakış.....	1
1.1.1. AA–DA sistemlerinin gelişimi.....	1
1.1.2. AA ve AA–DA sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılması.....	4
1.1.3. AA–DA güç akışı çalışmaları.....	7
1.2. Elektrik Güç Sistemlerinde Optimal Güç Akışı Çalışmaları.....	9
1.3. Tezin İçeriği ve Organizasyonu.....	11

BÖLÜM 2.

FACTS CİHAZLARI.....	13
2.1. Statik Kompanzator (STATCOM).....	14
2.2. Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC).....	22

BÖLÜM 3.

ÖNERİLEN AA–DA GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMI.....	28
3.1. Ayrık AA–DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası Olarak Önerilen AA Güç Akışı Yaklaşımı.....	28
3.1.1. AA güç akışı eşitlikleri.....	29
3.1.2. AA güç akışı hesaplamaları.....	36
3.1.3. AA güç akışı algoritması.....	47
3.2. Ayrık AA–DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası Olarak Önerilen DA Güç Akışı Yaklaşımı.....	50
3.2.1. DA güç akışı eşitlikleri.....	51
3.2.2. DA güç akışı hesaplamaları.....	58
3.2.3. DA güç akışı algoritması.....	61
3.3. Önerilen Ayrık AA–DA Güç Akışı Algoritması.....	68

BÖLÜM 4.

ÖNERİLEN OPTİMAL AA–DA GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMI.....	71
4.1. AA–DA Sistemine Ait Optimal Güç Akışı Problemi.....	71
4.2. YAK Algoritması ve AA–DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabına Uygulanması.....	74
4.2.1. YAK algoritması ve genel optimizasyon hesaplamalarına uygulanması.....	75
4.2.1.1. Başlangıç yiyecek kaynaklarının üretilmesi.....	78
4.2.1.2. İşçi arıların yiyecek kaynaklarına gönderilmesi.....	80
4.2.1.3. Gözcü arıların çevresinde arama yapacakları işçi arılara ait yiyecek kaynaklarının belirlenmesi....	80
4.2.1.4. Gözcü arıların gidecekleri yiyecek kaynaklarını seçmesi ve bu kaynakların çevresine gönderilmesi...	81
4.2.1.5. Bırakılacak kaynağın tespit edilmesi ve kaşif arının üretilmesi.....	82
4.2.1.6. Durdurma kriteri.....	82
4.2.2. YAK algoritmasının AA–DA sisteminde optimal güç akışı hesabına uygulanması.....	89

4.3. GA ve AA–DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabına Uygulanması.....	95	
4.3.1. GA ve genel optimizasyon hesaplamalarına uygulanması....	95	
4.3.1.1. Başlangıç popülasyonunun üretilmesi.....	96	
4.3.1.2. Seçme.....	97	
4.3.1.3. Çaprazlama.....	98	
4.3.1.4. Mutasyon.....	99	
4.3.1.5. Durdurma kriteri.....	100	
4.3.2. GA' nın AA–DA sisteminde optimal güç akışı hesabına uygulanması.....	106	
BÖLÜM 5.		
ÖNERİLEN OPTİMAL AA–DA GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMININ UYGULAMASI.....		111
5.1. Optimal AA–DA Güç Akışı Algoritmasının Uygulandığı Test Sistemi.....	111	
5.2. YAK Algoritmasının Test Sistemine Uygulanması.....	117	
5.3. GA' nın Test Sistemine Uygulanması.....	123	
BÖLÜM 6.		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	129	
KAYNAKLAR.....	135	
ÖZGEÇMİŞ.....	144	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a, b	: TCSC' nin bağlı olduğu AA baraları
a_g, b_g, c_g	: Jeneratör üretim maliyet katsayısı (birim aktif güç değeri için)
A_g, B_g, C_g	: Jeneratör üretim maliyet katsayısı (gerçek aktif güç değeri için)
AA	: Alternatif akım
ABC	: Artificial bee colony
AC	: Alternating current
b_{bara}	: AA sisteme ait bara admitans matrisi elemanı birim suseptans değeri
c_i	: Hata katsayısı
C_i	: DA çeviricisi
C	: TCSC' ye ait kapasitör kapasite değeri
DA	: Doğru akım
DC	: Direct current
DE	: Diferansiyel evrim
e	: DA çevirici açık devre doğru gerilimi birim değeri
EF1	: İşçi arının yiyecek kaynağına dönmeden önce gözcü arılara dans ederek bilgi aktarması
EF2	: İşçi arının dans alanına uğramadan yiyecek kaynağına geri dönmesi
f	: Amaç fonksiyonu
$f_{\text{kayıp}}$: Toplam aktif güç kaybı birim değeri
f_{maliyet}	: Jeneratör üretim maliyeti (\$/saat)
f_{opt}	: Optimal amaç fonksiyonu değeri
fit	: YAK algoritması ve GA için uygunluk değeri
fit_{ort}	: GA için ortalama uygunluk değeri
FACTS	: Flexible alternating current transmission system (esnek alternatif akım iletim sistemi)
g	: Güç akışı eşitliği

G	: Jeneratör
g_{bara}	: AA sisteme ait bara admitans matris elemanı kondüktans birim değeri
g_p	: Aktif güç dengesi eşitliği
g_q	: Reaktif güç dengesi eşitliği
GA	: Genetik algoritma (genetic algorithm)
h	: Sistem kısıtlamaları eşitsizliği
i_d	: DA çevirici doğru akımı birim değeri
i'_d	: DA güç akışı algoritması için DA çevirici doğru akımı tahmini birim değeri
\bar{i}_k	: Kademe ayarlı transformatör giriş barasından transformatöre akan kompleks alternatif akımı birim değeri
\bar{i}_m	: Kademe ayarlı transformatör çıkış barasından transformatöre akan kompleks alternatif akımı birim değeri
i_{md}	: DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör çıkışından DA çeviriciye akan alternatif akımı birim değeri
ind	: Birey
ind_{min}	: Bireye ait parametre alt sınır değeri
ind_{max}	: Bireye ait parametre üst sınır değeri
ite_{AA}	: AA güç akışı algoritması iterasyon sayısı
ite_{AA}^{max}	: AA güç akışı algoritması maksimum iterasyon sayısı
ite_{AA-DA}	: AA-DA güç akışı algoritması iterasyon sayısı
ite_{AA-DA}^{max}	: AA-DA güç akışı algoritması maksimum iterasyon sayısı
ite_{DA}	: DA güç akışı algoritması iterasyon sayısı
ite_{DA}^{max}	: DA güç akışı algoritması maksimum iterasyon sayısı
ite_{GA}	: GA iterasyon sayısı
ite_{GA}^{max}	: GA maksimum iterasyon sayısı
ite_{YAK}	: YAK algoritması iterasyon sayısı
ite_{YAK}^{max}	: YAK algoritması maksimum iterasyon sayısı
$I_{AA_{\text{baz}}}$: AA sistemi için baz akımı gerçek etkin değeri
$I_{DA_{\text{baz}}}$: DA sistemi için baz akımı gerçek ortalama değeri

I_{reak}	: TCSC' ye ait reaktör alternatif akımı gerçek etkin değeri
I_{TCSC}	: TCSC alternatif akımı gerçek etkin değeri
J	: Jacobian matris
J_1	: Tüm AA hatlarına aktarılan aktif güçlerinin gerilim açılarına göre türevlerinden oluşan Jacobian alt matrisi
J_2	: Tüm AA hatlarına aktarılan aktif güçlerinin gerilimlere göre türevlerinden oluşan Jacobian alt matrisi
J_3	: Tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güçlerinin gerilim açılarına göre türevlerinden oluşan Jacobian alt matrisi
J_4	: Tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güçlerinin gerilimlere göre türevlerinden oluşan Jacobian alt matrisi
k	: Kademe ayarlı transformatör giriş barası
K_{baz}	: AA ve DA sisteme ait birim değerler arası dönüşüm katsayısı
K_{GA}	: GA için sabit sayı
KKA	: Karınca koloni algoritması
L	: TCSC' ye ait reaktör endüktans değeri
lim	: Alt ve üst sınır bildirim
m	: Kademe ayarlı transformatör çıkış barası
m_0	: Mutasyon oranı
n_b	: AA bara sayısı
n_c	: DA çevirici sayısı
n_c^{set}	: Sabit aktif güç modunda çalışan DA çevirici sayısı
n_{cs}	: DA çeviricinin olduğu seri bağlı çevirici sayısı
$n_{çocuk}$: Çocuk birey sayısı
n_f	: Yiyecek kaynağı sayısı
n_g	: Jeneratör barası sayısı
$n_{gözcü}$: Gözcü arı sayısı
n_{ind}	: Birey sayısı
$n_{işçi}$: İşçi arı sayısı
n_p	: YAK algoritması ve GA için optimizasyon parametresi sayısı
n_t	: AA sisteme ait kademe ayarlı transformatör sayısı
n_{TCSC}	: AA sisteme ait TCSC sayısı

n_{td}	: DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatör sayısı
p	: Aktif güç birim değeri
P	: Yiyecek getirici arı
p_a	: TCSC' nin bağlı olduğu a nolu AA barasından tüm AA hatlarına aktarılan aktif güç birim değeri
$P_{AA_{baz}}$: AA sistemi için baz aktif güç gerçek değeri
p_b	: TCSC' nin bağlı olduğu b nolu AA barasından tüm AA hatlarına aktarılan aktif güç birim değeri
p_d	: DA çeviricisi aktif gücü birim değeri
p_d^{min}	: DA çeviricisi aktif güç alt sınırı birim değeri
p_d^{max}	: DA çeviricisi aktif güç üst sınırı birim değeri
p_d^{set}	: Sabit aktif güç modunda çalışan DA çevirici aktif gücü birim değeri
$P_{DA_{baz}}$: DA sistemi için baz aktif gücü gerçek değeri
$p_{dhat_{ij}}$: i. ve j. DA çeviricileri arasındaki DA iletim hattından akan aktif güç birim değeri
p_g	: Jeneratör barası aktif gücü birim değeri
p_g^{min}	: Jeneratör barası aktif güç alt sınırı birim değeri
p_g^{max}	: Jeneratör barası aktif güç üst sınırı birim değeri
p_{hat}	: AA barasından tüm AA hatlarına aktarılan aktif güç birim değeri
p_k	: Kademe ayarlı transformatör giriş barasından tüm AA hatlarına aktarılan aktif güç birim değeri
$p_{kayıp}$: Toplam aktif güç kaybı birim değeri
p_m	: Kademe ayarlı transformatör çıkış barasından tüm AA hatlarına aktarılan aktif güç birim değeri
p_{stat}	: STATCOM' dan AA şebekesine aktarılan aktif güç birim değeri
p_y	: AA yük barası aktif gücü birim değeri
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
PWM	: Pulse width modulation (darbe genişlik modülasyonu)
q	: Reaktif güç birim değeri
q_a	: TCSC' nin bağlı olduğu a nolu AA barasından tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güç birim değeri

q_b	: TCSC' nin bağılı olduğu b nolu AA barasından tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güç birim değeri
q_c	: Şönt reaktif güç üretici reaktif gücü birim değeri
q_d	: DA çeviricisi reaktif gücü birim değeri
q_g	: Jeneratör barası reaktif gücü birim değeri
q_g^{\min}	: Jeneratör barası reaktif güç alt sınırı birim değeri
q_g^{\max}	: Jeneratör barası reaktif güç üst sınırı birim değeri
q_{hat}	: AA barasından tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güç birim değeri
q_k	: Kademe ayarlı transformatör giriş barasından tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güç birim değeri
q_m	: Kademe ayarlı transformatör çıkış barasından tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güç birim değeri
q_{stat}	: STATCOM' dan AA şebekesine aktarılan reaktif güç birim değeri
q_{stat}^{\min}	: STATCOM' dan AA şebekesine aktarılan reaktif güç alt sınırı birim değeri
q_{stat}^{\max}	: STATCOM' dan AA şebekesine aktarılan reaktif güç üst sınırı birim değeri
q_y	: AA yük barası reaktif gücü birim değeri
R	: Kaşif arı
$r_{\text{bara},ij}$: DA sisteme ait bara direnç matrisi elemanı
r_c	: Komutasyon direnci birim değeri
r_{hat}	: DA iletim hattı direnci birim değeri
S	: Gözcü arı
$-s_i$: i. AA barasından tüm AA hatlarına aktarılan kompleks görünür güç birim değeri
sayaç	: YAK algoritmasına ait yiyecek kaynağı ve komşuluğu için deneme sayısı artırımı değişkeni
$sayaç_i^{\text{lim}}$: YAK algoritmasına ait yiyecek kaynağı ve komşuluğu için deneme sayısı artırımı değişkeni maksimum değeri
SC	: Senkron kondenser (synchronous condenser)
sp	: YAK algoritması için yiyecek kaynağı seçilme olasılığı

SSSC	: Statik senkron seri kompanzator (static synchronous series compensator)
STATCOM	: Statik kompanzator (static compensator)
SVC	: Statik VAR kompanzatoru (static VAR compensator)
t	: AA sisteme ait kademe ayarlı transformator kademe ayar değeri
t^{\min}	: AA sisteme ait kademe ayarlı transformator kademe ayar değeri alt sınır değeri
t^{\max}	: AA sisteme ait kademe ayarlı transformator kademe ayar değeri üst sınır değeri
t_d	: DA çeviriciye ait kademe ayarlı transformator kademe ayar değeri
t_{di}^{\min}	: DA çeviriciye ait kademe ayarlı transformator kademe ayar değeri alt sınır değeri
t_{di}^{\max}	: DA çeviriciye ait kademe ayarlı transformator kademe ayar değeri üst sınır değeri
t_{km}	: k ve m baraları arasında bulunan kademe ayarlı transformator kademe ayar değeri
TCR	: Tristör kontrollü reaktör (thyristor-controlled reactor)
TCSC	: Tristör kontrollü seri kompanzator (thyristor-controlled series compensator)
u	: Kontrol değişkeni
u_{AA}	: AA güç akışı algoritmasına ait kontrol değişkenleri
u_{DA}	: DA güç akışı algoritmasına ait kontrol değişkenleri
u_{opt}	: Optimizasyon kontrol değişkenleri
U	: Üç fazlı AA gerilime ait bir faz gerçek etkin değeri
UF	: İşçi arının kaşif arı olması
UPFC	: Birleşik güç akış kontrolörü (unified power flow controller)
V	: Üç fazlı AA gerilime ait bir faz gerçek etkin değeri
v	: AA barasına ait alternatif gerilimi birim değeri
\underline{v}	: AA barasına ait kompleks alternatif gerilimi birim değeri
\underline{v}^*	: AA barasına ait kompleks eşlenik alternatif gerilimi birim değeri
v^{\min}	: AA barası alternatif gerilim alt sınırı birim değeri
v^{\max}	: AA barası alternatif gerilim üst sınırı birim değeri

$V_{AA_{baz}}$: AA sistemi için baz gerilimi gerçek etkin değeri
V_{bara}	: STATCOM' un bağlı olduğu AA barası alternatif gerilimi gerçek etkin değeri
v_d	: DA çevirici uç çıkış doğru gerilimi birim değeri
v'_d	: DA güç akışı algoritması için DA çevirici uç çıkış doğru gerilimi tahmini birim değeri
v_d^{\min}	: DA çevirici uç çıkış doğru gerilimi alt sınırı birim değeri
v_d^{\max}	: DA çevirici uç çıkış doğru gerilimi üst sınırı birim değeri
v_{dfark}	: DA güç akışı algoritması için DA çevirici uç çıkış doğru gerilimleri için hesaplanan ve başlangıç değerleri arasındaki fark vektörü
v_{dfark}^{\min}	: v_{dfark} vektörünün mutlak değeri en küçük elemanı
V_{DA}	: STATCOM' a ait depolama elemanı doğru gerilimi gerçek ortalama değeri
$V_{DA_{baz}}$: DA sistemi için baz gerilimi gerçek ortalama değeri
$v_{d_i}^{\text{ilk}}$: DA güç akışı algoritması için DA çevirici uç çıkış doğru gerilimi başlangıç birim değeri
$v_{d_i}^{\text{nom}}$: DA çevirici uç çıkış doğru gerilimi nominal birim değeri
v_k	: Kademe ayarlı transformatör giriş barası alternatif gerilimi birim değeri
\bar{v}_k	: Kademe ayarlı transformatör giriş barası kompleks alternatif gerilimi birim değeri
V_{kap}	: TCSC' ye ait kapasitör alternatif gerilimi gerçek etkin değeri
v_{kd}	: DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör giriş barası alternatif gerilimi birim değeri
v_m	: Kademe ayarlı transformatör çıkış barası alternatif gerilimi birim değeri
\bar{v}_m	: Kademe ayarlı transformatör çıkış barası kompleks alternatif gerilimi birim değeri
v_{md}	: DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör çıkış barası alternatif gerilimi birim değeri

V_{reak}	: TCSC' ye ait reaktör alternatif gerilimi gerçek etkin değeri
V_S	: Kaynak alternatif gerilimi gerçek etkin değeri
\bar{v}_t	: İdeal kademe ayarlı transformatör çıkış barası kompleks alternatif gerilimi birim değeri
V_{TCSC}	: TCSC alternatif gerilimi gerçek etkin değeri
V_{VSC}	: STATCOM' a ait gerilim kaynaklı çevirici çıkış alternatif gerilimi gerçek etkin değeri
VSC	: Gerilim kaynaklı çevirici (voltage source converter)
w	: Yiyecek kaynağı
w_{min}	: Yiyecek kaynağına ait parametre alt sınır değeri
w_{max}	: Yiyecek kaynağına ait parametre üst sınır değeri
W	: Üç fazlı AA gerilime ait bir faz gerçek etkin değeri
x	: Durum değişkeni
x_{AA}	: AA güç akışı algoritmasına ait durum değişkenleri
x_{DA}	: DA güç akışı algoritmasına ait durum değişkenleri
x_C	: TCSC' ye ait kapasitör reaktans genliği birim değeri
x_L	: TCSC' ye ait reaktör reaktans genliği birim değeri
x_{TCSC}	: TCSC' ye ait ana harmonik eşdeğer reaktans parametresi birim değeri
x_{TCSC}^{min}	: TCSC' ye ait ana harmonik eşdeğer reaktans parametresi alt sınırı birim değeri
x_{TCSC}^{max}	: TCSC' ye ait ana harmonik eşdeğer reaktans parametresi üst sınırı birim değeri
x_{tr}	: STATCOM' a ait kuplaj transformatörü ve ara faz transformatörlerin sargılarının oluşturduğu eşdeğer reaktans birim değeri
y_{bara}	: AA sisteme ait bara admitans matrisi
$y_{d,bara}$: DA sisteme ait bara admitans matrisi
\bar{y}_{hat}	: İletim hattı kompleks admitansı birim değeri
\bar{y}_{km}	: Kademe ayarlı transformatör kompleks seri admitansı birim değeri
\bar{y}_{TCSC}	: TCSC' ye ait kompleks admitans birim değeri
YAK	: Yapay arı koloni

YGDA	: Yüksek gerilimli doğru akım
$Z_{AA_{baz}}$: AA sistemi için baz empedansı gerçek değeri
$Z_{DA_{baz}}$: DA sistemi için baz empedansı gerçek değeri
$Z_{d_{bara}}$: DA sisteme ait bara direnç matrisi
Z_{hat}	: İletim hattı empedansı birim değeri
δ	: AA barasına ait alternatif gerilim açısı
δ_{bara}	: STATCOM' un bağlı olduğu AA barası alternatif gerilim açısı
δ_{ij}	: i. AA barası ile j. AA barası alternatif gerilim açıları arasındaki fark
δ_{kd}	: DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör giriş barası alternatif gerilim açısı
δ_{md}	: DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör çıkış barası alternatif gerilim açısı
δ_{VSC}	: STATCOM' a ait gerilim kaynaklı çevirici çıkış alternatif gerilim açısı
δ_{stat}	: STATCOM' a ait gerilim kaynaklı çevirici çıkış alternatif gerilim açısı ile STATCOM' un bağlı olduğu AA barası alternatif gerilim açısı arasındaki fark
θ	: DA çevirici tetikleme ya da toparlanma (extinction, recovery) açısı
θ_{di}^{min}	: DA çevirici tetikleme ya da toparlanma açısı alt sınırı
θ_{di}^{max}	: DA çevirici tetikleme ya da toparlanma açısı üst sınırı
ϕ_{md}	: DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör çıkış barası alternatif gerilim açısı ile DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör çıkışından DA çeviriciye akan alternatif akım açısı arasındaki fark
Φ_{md}	: DA çeviricinin bağlı olduğu kademe ayarlı transformatör çıkışından DA çeviriciye akan alternatif akım açısı
α_d	: Doğrultucu modunda çalışan DA çevirici tetikleme açısı
α_r	: TCSC' ye ait kritik tristör tetikleme açısı
α_{TCSC}	: TCSC' ye ait tristör tetikleme açısı
α_{TCSC}^{min}	: TCSC' ye ait tristör tetikleme açısı alt sınırı
α_{TCSC}^{max}	: TCSC' ye ait tristör tetikleme açısı üst sınırı

ε_{AA}	: AA güç akışı algoritması için hata toleransı
ε_{AA-DA}	: AA-DA güç akışı algoritması için hata toleransı
ε_{DA}	: DA güç akışı algoritması için hata toleransı
ω	: Açısal frekans
γ_d	: Evirici modunda çalışan DA çevirici toparlanma açısı
λ	: Lagrange çarpanı
σ	: DA çevirici için ağırlık katsayısı
β	: YAK algoritması için $[-1,1]$ aralığında üretilmiş rastgele sayı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Dünya Üzerinde İşletmeye Alınmış Bazı Önemli YGDA Sistemleri.....	2
Şekil 1.2.	YGDA Sistemlerindeki Kapasite Artışının Yıllara Göre Değişimi.....	3
Şekil 2.1.	Statik Kompanzatöre (STATCOM) Ait Şematik Gösterim.....	14
Şekil 2.2.	Statik Kompanzatöre (STATCOM) Ait Eşdeğer Devre Gösterimi.....	15
Şekil 2.3.	48-darbeleri Statik Kompanzatör (STATCOM) Konfigürasyonu.....	16
Şekil 2.4.	48-darbeleri Statik Kompanzatöre (STATCOM) Ait Çıkış Gerilim Dalga Şekli.....	17
Şekil 2.5.	Statik Kompanzatörün (STATCOM) AA-DA Güç Akışı Algoritmasına Dahil Edilmesine Ait İşaret Akış Şeması.....	21
Şekil 2.6.	Tristör Kontrollü Seri Kompanzatöre (TCSC) Ait Şematik Gösterim.....	22
Şekil 2.7.	Slatt-Buckley (ABD) Enerji İletim Hattında Kullanılan Çok Modüllü Tristör Kontrollü Seri Kompanzatörün (TCSC) Yapısı.....	23
Şekil 2.8.	Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) ve Seri Bağlı Olduğu Hattın Ait Tek Hat Şeması.....	23
Şekil 2.9.	Tristör Kontrollü Seri Kompanzatöre (TCSC) Ait Karakteristik Dalga Şekilleri a)- kaynak gerilimi dalga şekli b)- reaktör gerilimi dalga şekli c)- reaktör akımı dalga şekli d)- kapasitör gerilimi dalga şekli e)- kapasitör akımı dalga şekli.....	24

Şekil 2.10.	Tristör Kontrollü Seri Kompanzatöre (TCSC) Ait Eşdeğer Reaktans Parametresinin Tristör Tetikleme Açısına Göre Değişimi.....	26
Şekil 2.11.	Tristör Kontrollü Seri Kompanzatörün (TCSC) AA-DA Güç Akışı Algoritmasına Dahil Edilmesine Ait İşaret Akış Şeması.....	27
Şekil 3.1.	Kademe Ayarlı Transformator Modeli a)- Kademe Ayarlı Transformator Gösterimi b)- Kademe Ayarlı Transformator Eşdeğer Devresi.....	32
Şekil 3.2.	Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) ve Seri Bağlı Olduğu Hatta Ait Eşdeğer Devre Gösterimi.....	35
Şekil 3.3.	AA-DA Sisteminde Genel Amaçlı Bara Gösterimi.....	36
Şekil 3.4.	Optimal Güç Akışı Hesabında Kullanılan AA-DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası Olarak Önerilen AA Güç Akışı Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması.....	48
Şekil 3.5.	DA Çevirici Yapısı a)- 6-darbeli çevirici b)- 12-darbeli çevirici.....	51
Şekil 3.6.	DA Şebeke Yapıları a)- radyal şebekeli DA sistemi b)- ağ şebekeli DA sistemi.....	52
Şekil 3.7.	DA Çevirici Sistem Modeli a)- tek kutuplu DA çevirici sistem modeli b)- çift kutuplu DA çevirici sistem modeli.....	53
Şekil 3.8.	Biri Doğrultucu Diğeri Evirici Olarak Çalışan İki Çevirici İstasyon Şeması.....	54
Şekil 3.9.	Tek Kutuplu DA Çeviricisine Ait Eşdeğer Devre Gösterimi.....	55
Şekil 3.10.	Tek Kutuplu Çok Uçlu DA Sistem Modeli.....	58
Şekil 3.11.	Optimal Güç Akışı Hesabında Kullanılan AA-DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası Olarak Önerilen DA Güç Akışı Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması.....	65
Şekil 3.12.	Optimal Güç Akışı Hesabında Kullanılan Önerilen AA-DA Güç Akışı Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması.....	68

Şekil 4.1.	Elektrik Güç Sistemlerinde Yapılan Optimal Güç Akışı Çalışması Algoritmasına Ait Genel İşaret Akış Şeması.....	73
Şekil 4.2.	Yiyecek Arama Çevrimi.....	76
Şekil 4.3.	YAK Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması.....	83
Şekil 4.4.	AA-DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabı için Uygulanan YAK Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması.....	91
Şekil 4.5.	GA' ya Ait Genel İşaret Akış Şeması.....	96
Şekil 4.6.	GA' ya Ait Detaylı İşaret Akış Şeması.....	101
Şekil 4.7.	AA-DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabı için Uygulanan GA' ya Ait İşaret Akış Şeması.....	107
Şekil 5.1.	Değiştirilmiş IEEE 14 Baralı AA-DA Test Sistemi.....	111
Şekil 5.2.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemi.....	112
Şekil 5.3.	YAK Algoritması ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Amaç Fonksiyonu Değerinin İterasyon Sayısına Göre Değişimi.....	122
Şekil 5.4.	YAK Algoritması ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Jeneratör Üretim Maliyeti ve Toplam Aktif Güç Kaybının İterasyon Sayısına Göre Değişimi.....	122
Şekil 5.5.	GA ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Amaç Fonksiyonu Değerinin İterasyon Sayısına Göre Değişimi.....	128
Şekil 5.6.	GA ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Jeneratör Üretim Maliyeti ve Toplam Aktif Güç Kaybının İterasyon Sayısına Göre Değişimi.....	128

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Yakın Gelecekte Yapılması Planlanan Bazı YGDA Sistemleri.....	3
Tablo 2.1.	V_{VSC} , V_{bara} ve δ_{stat} Değerlerine Göre Statik Kompanzatör (STATCOM) ile AA Şebeke Arasında Akan Aktif ve Reaktif Güçlerin Durumu.....	20
Tablo 4.1.	Örnek Çaprazlama İşlemi.....	99
Tablo 5.1.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait AA Hat Empedans ve Admitans Büyüklükleri.....	113
Tablo 5.2.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait Kademe Ayarlı Transformatör Dataları.....	113
Tablo 5.3.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait AA Yük Değerleri ve Jeneratör Üretim Maliyet Katsayıları.....	114
Tablo 5.4.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait AA Değişkenlerine İlişkin Sınır Değerleri.....	115
Tablo 5.5.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait Statik Kompanzatör (STATCOM) Değerleri.....	115
Tablo 5.6.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) Değerleri.....	115
Tablo 5.7.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Hat Direnç Değerleri.....	116
Tablo 5.8.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Çevirici Komutasyon Direnç Değerleri.....	116
Tablo 5.9.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Değişkenlerine İlişkin Sınır Değerleri.....	116
Tablo 5.10.	Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Çeviriciler İçin Ağırlık Katsayı Değerleri.....	117

Tablo 5.11.	YAK Algoritmasında Kullanılan Parametreler ve Değerleri.....	117
Tablo 5.12.	YAK Algoritması İçin Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	118
Tablo 5.13.	YAK Algoritması için Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının Iraksama ve Yerel Minimuma Takılma Durumları.....	118
Tablo 5.14.	YAK Algoritması ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesabı İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları.....	119
Tablo 5.15.	GA' da Kullanılan Parametreler ve Değerleri.....	123
Tablo 5.16.	GA İçin Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	124
Tablo 5.17.	GA için Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının Iraksama ve Yerel Minimuma Takılma Durumları.....	124
Tablo 5.18.	GA ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesabı İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları.....	125

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Optimal Güç Akışı, Alternatif Akım – Doğru Akım (AA-DA) Sistemi, Kademe Ayarlı Transformator, FACTS, Statik Kompanzator (STATCOM), Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC), Yapay Arı Koloni (YAK) Algoritması, Genetik Algoritma (GA)

Bu tezde, tek kutuplu çok uçlu AA-DA sisteminde optimal güç akışı hesabı için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşımda, optimal güç akışı hesabında kullanılacak yeni bir ayrık AA-DA güç akışı algoritması önerilmiştir. Bu algoritma ile literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, AA sisteminde kullanılan kademe ayarlı transformatorlerin yanı sıra DA sisteminde kullanılan çeviricilere ait kademe ayarlı transformatorlerin de gerçek eşdeğer devreleri ilk kez güç akışı hesabına dahil edilmiştir. Sistemdeki tüm kademe ayarlı transformatorlerin güç akışı algoritması boyunca kademe değişimi etkileri bara admitans matrisine sokulmadan Jacobian matrisine sokulmuştur. Böylelikle daha az program boyutu gereksinimi ve daha hızlı yakınsama sağlanmıştır. Ayrıca algoritmada kademe ayarlı transformatorlerin gerçek ayrık kademe değerleri göz önüne alınmıştır. Böylelikle pratik uygulamalar için daha doğru sonuçların elde edilebilirliği sağlanmıştır. Optimizasyon hesabı için, klasik türev tabanlı hesaplama tekniklerinden farklı olarak sezgisel tabanlı yöntemlerden olan YAK algoritması ve GA ayrı ayrı kullanılmıştır. Böylelikle literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, ilk kez çok uçlu AA-DA sistemlerinde optimizasyon hesabı için sezgisel bir yöntem kullanılmış, YAK algoritması ve GA da bu alanda ilk kez uygulanmıştır. Optimizasyon sonuçlarını iyileştirmek adına FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System – Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi) cihazlarından olan STATCOM ve TCSC, AA-DA sistemine kontrol değişkeni sağlayan eleman olarak ilave edilmiştir. Bu cihazların optimizasyonda kullanılan hesaplamaları detaylı olarak açıklanmıştır. Optimal güç akışı hesabı çalışmasında tüm AA-DA sistemine ait kontrol ve durum değişkenlerine ait değerlerin sınır değerler içinde tutulması amaçlanmıştır. Önerilen yaklaşım ile AA-DA sisteminde yapılan optimal güç akışı hesabı çalışması örnek bir sistem üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

AA-DA sisteminde yapılan optimal güç akışı hesabı çalışmasından elde edilen sonuçlara bakıldığında, tezde önerilen YAK algoritması ve GA kullanılarak, klasik türev bazlı optimizasyon yöntemlerinde karşılaşılabilen, iraksama ve yerel minimuma takılma problemlerinin, ortadan kaldırıldığı görülmektedir. Ayrıca, önerilen bu sezgisel yöntemlerin, global optimum noktasına ulaşmada etkili olduğu, elde edilen sonuçlarla da ispatlanmıştır.

A NEW APPROACH FOR OPTIMAL POWER FLOW CALCULATION IN AC-DC SYSTEM INCLUDING FACTS DEVICES

SUMMARY

Key Words: Optimal Power Flow, Alternating Current – Direct Current (AC-DC) System, Tap Changing Transformer, FACTS, Static Compensator (STATCOM), Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, Genetic Algorithm (GA)

In this thesis, a new approach for optimal power flow calculation in monopolar multi-terminal AC-DC system is presented. In this approach, a new sequential AC-DC power flow algorithm that is used in optimal power flow calculation is proposed. Apart from the similar studies, real equivalent circuits of the converters' tap changing transformers that are used in DC system are included into the power flow calculation for the first time. Tap changing effects of all tap changing transforms in the system during power flow algorithm are included into the Jacobian matrix without including into the bus admittance matrix. So, less program dimension requirement and fast convergence is achieved. Furthermore, real discrete tap values of the tap changing transformers are considered in the algorithm. Thus, attainability of the more accurate results is achieved for practical applications. Apart from the derivative based calculation techniques, ABC algorithm and GA are used for the optimization calculation separately. Thus, apart from the similar studies in the literature, a heuristic method is used for optimization calculation in multi-terminal AC-DC systems for the first time, ABC algorithm and GA are also applied in this are for the first time. STATCOM and TCSC that are one of the FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) devices are included into the AC-DC system as components that provide control variables for the aim of improving the optimization results. The calculations of these devices used in the optimization are described in detail. All of the control and state variables of the AC-DC system are intended to be kept in their limit values in the optimal power flow calculation study. The proposed approach is tested on a sample test system and the obtained results are discussed comparatively. The obtained results have shown that ABC algorithm and GA, which are proposed in the thesis, have overcome the divergence and dropping to local minimum problems encountered in the conventional derivative based optimization methods. Furthermore, it has been proved by the obtained results that these proposed heuristic methods are efficient in reaching to global optimum point.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. AA–DA Enerji İletim Sistemlerine Genel Bakış

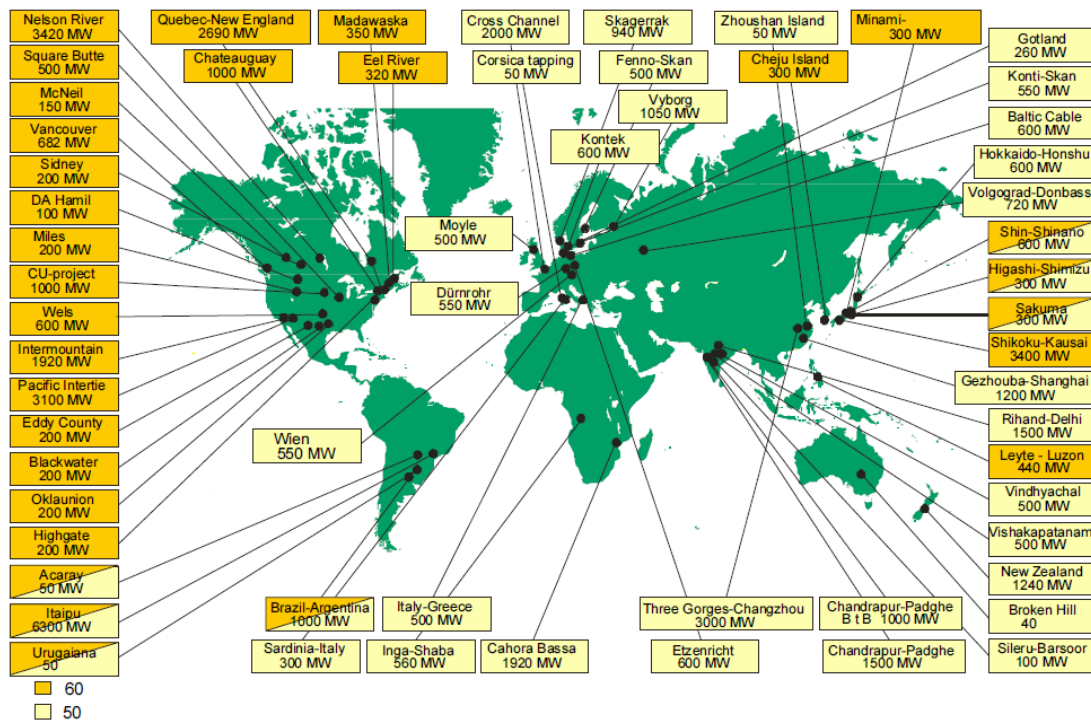
1.1.1. AA–DA sistemlerinin gelişimi

Yüksek gerilimli doğru akım (YGDA) ile enerji iletim sistemlerinin ilk uygulaması; 1882 yılında Almanya’da Miesbach – Münih arasında devreye alınan 2 kV’ luk 2.5 kW’ lık 57 km uzunluğundaki test sistemidir. Bu test sistemi tek makinalı olup, sadece doğru akım (DA) iletim sistemini içermekteydi [1]. Alternatif akım (AA) ve DA sistemlerinin birlikte kullanıldığı ve endüstriyel olarak faydalandığı ilk uygulama, 1889 yılında Thury tarafından gerçekleştirilen yüksek gerilimli çevirici modeli ile yapılmıştır. Bu model AA ve DA makinalarının beraber kullanılmasıyla oluşturulmuş ve 1930’ lara kadar Avrupa’da kullanılmıştır [2]. 1901 yılında Hewitt, ilk civa arklı doğrultucuyu icat etmiş ve bu doğrultucu 1920 ve 1930’ lar boyunca Avrupa ve Amerika’da araştırmacılar tarafından geliştirilerek uygulamaya konulmuştur. 1930’ lardan başlayarak civa arklı çeviricilerin üretiminin artmasıyla ticari rekabet artmış ve dünyanın birçok yerinde YGDA enerji sistemleri kurulmuştur. Ancak, civa arklı çeviriciler nispeten küçük güçlerde imal edilebildiğinden, bu çeviriciler ile çok yüksek güçlü DA iletim yapılamamıştır [3].

Katı hal yarı iletken teknolojisinde 1950’ li yılların başında başlayan gelişme ve bu gelişmeye bağlı olarak, yüksek gerilim ve akım dayanımına sahip yarı iletken anahtarlama elemanlarının üretilmesi, araştırmacıları bu teknolojiyi YGDA iletim sistemlerinde kullanmaya sevk etmiştir. Ticari olarak ilk tristör donanımlı çeviriciler 1970 yılında Gotland Adası ile İsveç ana karası arasında bulunan, deniz aşırı DA iletim sisteminde kullanılmıştır. Bu DA iletim sistemi 150 kV gerilime, 30 MW güç taşıma kapasitesine ve 96 km uzunluğa sahipti [4]. İlerleyen yıllarda daha yüksek gerilim ve akım kapasitelerine sahip tristörlerin üretilmesi ile birlikte, dünyanın birçok yerinde, daha yüksek gerilimli ve güçlü tristör donanımlı DA iletim sistemleri

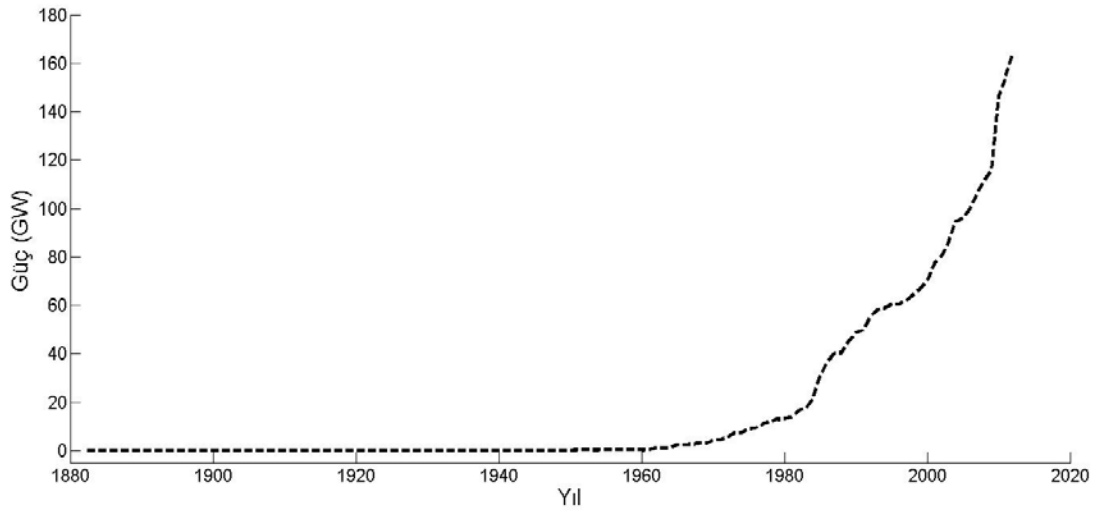
uygulandı ve 1970' li yılların başı itibariyle, civa arklı çeviricilerin yerini aldı. Sonraki yıllarda katı hal yarı iletken teknolojisindeki hızlı gelişmeye paralel olarak tristör ve diğer anahtarlama elemanlarındaki gerilim ve akım kapasitelerinin büyümesi ile YGDA sistemlerinin kullanımı ve güç taşıma kapasiteleri sürekli artış göstermiştir.

2000 yılı itibariyle işletmeye alınmış bazı önemli YGDA sistemlerinin, dünya üzerindeki yerleri ve güç taşıma kapasiteleri Şekil 1.1'de gösterilmiştir [5].



Şekil 1.1. Dünya Üzerinde İşletmeye Alınmış Bazı Önemli YGDA Sistemleri

Şekil 1.2'de, 1882-2012 yılları arasında dünya üzerinde devreye alınan ve işletmeye sokulan, YGDA sistemlerinin, güç taşıma kapasitelerindeki artışın, yıllara göre değişimi verilmiştir [6].



Şekil 1.2. YGDA Sistemlerindeki Kapasite Artışının Yıllara Göre Değişimi

Çin’de bulunan Xianjiaba-Şangay sistemi 1980 km hat uzunluğu, 800 kV anma gerilimi ve 6400 MW güç taşıma kapasitesiyle dünya üzerinde devreye alınan ve aynı zamanda halen işletmede olan en uzun hatta, en yüksek gerilim seviyesine ve en yüksek güç taşıma kapasitesine sahip, YGDA iletim sistemi olma özelliğine sahip bulunmaktadır. Yakın gelecek için yeni DA iletim sistemlerinin yapılması için çalışmalara devam edilmekte olup, yapılması planlanan ya da proje aşamasında olan bazı önemli sistemler Tablo 1.1’ de verilmiştir [7].

Tablo 1.1. Yakın Gelecekte Yapılması Planlanan Bazı YGDA Sistemleri

Sistem Adı	Yer	Hat Uzunluğu (km)	Gerilim (kV)	Güç (MW)	Yıl	Tip
Xiluodu – Hanzhou	Çin	1300	800	6400	2013	Tristör Kontrollü
Nuozhadu - Guangdong	Çin	1500	800	5000	2013	Tristör Kontrollü
Estlink 2	Estonya - Finlandiya	171	± 450	670	2014	Tristör Kontrollü
SylWin1	Almanya	210	± 320	864	2014	IGBT Kontrollü
NordBalt	İsveç - Litvanya	450	300	700	2015	IGBT Kontrollü

Tablo 1.1. Yakın Gelecekte Yapılması Planlanan Bazı YGDA Akım Sistemleri (Devam)

Western HVDC Link	İskoçya - Galler	414	600	2000	2015	Tristör Kontrollü
Jinsha River II - East China	Çin	-	± 800	6400	2016	Tristör Kontrollü
Goupitan - Guangdong	Çin	-	-	3000	2016	Tristör Kontrollü
Jinsha River II - Fujian	Çin	-	± 800	6400	2018	Tristör Kontrollü
Humeng - Liaoning	Çin	-	± 800	6400	2018	Tristör Kontrollü

1.1.2. AA ve AA–DA sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılması

YGDA iletim sistemlerinin, AA iletim sistemlerine entegre edilerek kullanılmasının tercih edilmesi, DA ve AA sistemlerinin teknik ve ekonomik olarak karşılaştırılması ile açıklanabilir. Şüphesiz ki, bir güç sistemi tasarlanırken, önce kararlılığı, daha sonra ise maliyeti göz önüne alınır.

Bir iletkenin AA' da gösterdiği direnç, (akımın sürekli alternans değiştirmesi nedeni ile ortaya çıkan) deri etkisinden (skin effect) dolayı, DA' da gösterdiği dirençten daha büyüktür [8]. Ayrıca bir iletim hattında kullanılan iletkenin AA çalışma durumuna ait endüktif reaktansının, DA çalışma durumunda olamayacağı, bu sebeple hat empedansının daha düşük olacağı da aşikardır. Bu iki durum, genel olarak, AA ile enerji iletimindeki hat kayıplarının, DA ile iletme göre daha yüksek olacağını göstermektedir. Bununla beraber, yüksek güçlü çevirici istasyonlarının maliyetleri oldukça yüksektir. Ancak çok uzun mesafeli DA ile iletimde, hat kayıplarının azaltılması ile elde edilen kazanç, bu maliyetlerin çok üzerindedir. DA hattı ile iletimde, yük durumunun ve yerel şartların farklılığından dolayı, ekonomik iletim mesafesi her hat için değişmekte olup, pratik sonuçlar bu mesafenin ortalama 500 km ve üzerinde olduğunu göstermektedir [9].

Yukarıda bahsedilen deri etkisi olayının DA iletiminde olmaması sebebiyle, DA iletim hattının etkin iletken kesiti arttırılabilir. Böylelikle sistemin güç taşıma kapasitesi de artacaktır [10].

Çevre koşulları sebebiyle, bazen havai hat ile iletim mümkün olamaz. Yer altı kablosu ile AA ile enerji iletiminde ise, kablolardan akan kapasitif akımların oluşturduğu problemler ile karşılaşılır. Yer altı kabloları ile AA ile enerji iletiminde, uzun mesafelerde karşılaşılabilecek kapasitif akımın ortaya çıkartacağı problemleri gidermek için, hattın ortasına çok yüksek maliyetli şönt reaktörlerin konulması gerekmektedir. Ancak, bu yöntem, deniz aşırı iletimde pratik bir çözüm olamaz. DA ile enerji iletiminde ise, kapasitif akımlar olmayacağından, bu tür problemlerle karşılaşılmaz [11].

Aynı mesafedeki iletim için, DA ile iletim, AA iletime göre daha az iletken adedi ile gerçekleştirilebildiğinden, hat maliyeti açısından DA ile enerji iletimi daha ekonomiktir [12].

Özellikle farklı ülkelere ait enterkonnekte sistemler arasındaki enerji alış-verişinde, birbirinden bağımsız AA sistemleri YGDA hatlarıyla birbirlerine bağlanarak, senkron olmayan şartlarda çalıştırılabilir. Özellikle artan güç talebini karşılamak üzere, günümüzde üzerinde önemli şekilde çalışılan yenilenebilir enerji kaynaklarının enterkonnekte şebekelere asenkron olarak bağlanmasında, DA iletim hatları, önemli roller üstlenebilmektedir [13]. Yine AA sistemine ait alt bölgeler arasındaki bağlantı DA hatları ile yapılarak, herhangi bir alt bölgedeki AA temelli problemin, diğer bölgelere sirayet etmesi engellenebilir.

AA sisteminde gerilim değişimlerinden, hatların gereksiz yüklenmesine kadar birçok problemlere yol açan reaktif güç, DA ile iletimde bulunmadığından, reaktif güç temelli olumsuzluklara, DA sisteminde rastlanmaz [14].

Tüketicilerin sayısı ve güç talebi artışı nedeni ile, mevcut AA güç sistemleri gün geçtikçe daha ağır yük koşullarında çalışmaya zorlamakta ve buna bağlı olarak sistem arızalarında ciddi artışlar gözlenmektedir. Aşırı yüklenme ve arıza

durumlarından kaynaklanan gerilim ve açı kararlılığı problemleri, mevcut güç sistemlerinin işletme devamlılığı için büyük tehlike oluşturmaktadır. Kararlılığı bozacak etkilerle karşılaşıldığında, sistemi dengede tutabilmek için, hatlardan akan aktif ve reaktif gücün uygun şekilde kontrol edilmesi gerekir. AA iletim hatları boyunca akan gücün kontrol edilebilmesi için faz açılarının, hatların uç gerilimlerinin ve hat empedanslarının uygun olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Faz açısını değiştirmekte kullanılan jeneratörler ve faz kaydırmalı transformatörler ile gerilim genlik değerini ayarlamakta kullanılan kademe ayarlı transformatörler, reaktörler, kapasitörler ve senkron kondenseler gibi temel AA kontrol üniteleri, yapıları gereği kritik kararlılık problemlerini çözebilecek hızlı değişimler gösteremezler. Hat empedansının ilave elemanlar olmadan değiştirilemeyeceği ise aşikardır. AA sisteminde güç akışının mevcut kontrol üniteleri ile hızlı şekilde kontrol edilememesi probleminin üstesinden gelebilmek için, yarı iletken teknolojisi tabanlı, hızlı cevap verebilen, FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) cihazlarının AA sistemlerine sokulması gerekmektedir. Zira bu cihazlar günümüzde AA sistemlerinin kapasitelerinin artırılmasında ve esnek olarak kontrol edilmesinde, çok önemli roller oynamaktadırlar [15]. DA sisteminde ise çevirici uç gerilimleri çok hızlı bir şekilde değiştirilebilmektedir. Çevirici uç gerilimlerinin uygun değerlerde ve hızlı bir şekilde ayarlanabilmesi nedeni ile, DA iletim hatlarından akacak akımların değerleri ve yönleri kolaylıkla kontrol edilebilir. Dolayısıyla, DA hatlarından akacak gücün değeri ve yönü de, hızlı bir şekilde ayarlanabilir. Uygun tetikleme açıları belirlenerek, çeviriciler, doğrultucu ya da evirici olarak çalıştırılarak, istenilen değerlerde, hızlı bir şekilde, bağlı oldukları AA baralarına güç basabilirler ya da bu baralardan güç çekebilirler. AA sisteminde olduğu gibi DA sisteminde de hat dirençleri değiştirilemez, ancak, çevirici uç gerilimleri uygun şekilde ayarlanarak, hat direnci etkisi dolaylı olarak ayarlanabilir. Bahsedilen bu özellikleri nedeni ile, DA sistemleri ayrıca, entegre edildikleri AA sistemlerinde gerilim ve açı kararlılığını düzeltme amaçlı olarak da kullanılabilir [16,17].

1.1.3. AA–DA güç akışı çalışmaları

Elektrik güç sistemlerinin boyutlandırılması, korunması ve kontrolünün sağlanabilmesi için sisteme ait güç dengesini sağlayan değişken değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Sisteme ait güç dengesinin sağlanabilmesi, güç akışı hesaplamalarının yapılması ile olur. Klasik AA güç sistemlerinde lineer olmayan güç denklemleri içeren güç akışı hesaplamaları için Newton-Raphson ve Gauss-Seidel yöntemleri literatürde sıkça kullanılmış olup, özellikle Newton-Raphson tabanlı geliştirilmiş güç akışı çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır [18,19].

YGDA sistemlerinin, AA sistemlerine entegre edilerek kullanılmasının gündeme gelmesi, AA-DA güç akışı çalışmalarını zorunlu kılmıştır. Özellikle 1950' ler itibariyle, DA sistemlerindeki gelişmeye bağlı olarak, AA-DA güç akışı hesaplamaları için birçok yöntem geliştirilmiş olup, bu alandaki çalışmalara devam edilmektedir. Geliştirilen bu yöntemler temelde iki gruba ayrılmaktadır. Birincisi eşzamanlı (simultaneous) olarak ta nitelendirilen birleşik yöntem [20-23], ikincisi ise ayrık (sequential) yöntemdir [24-27].

Birleşik yöntemde, AA ve DA sistemine ait eşitlikler iç içedir ve birlikte çözülür. Bu yaklaşımın avantajları, AA güç akışı eşitliklerinde herhangi bir değişiklik yapma gereği olmaması, DA güç akışı eşitlikleri için bir DA güç akışı algoritması gerekmemesi, bu eşitliklerin, mevcut AA güç akışı algoritmasına, algoritmada küçük değişiklikler yapılarak sokulabilmesidir. Ancak bu yaklaşımın en büyük dezavantajı, DA sistemine ait eşitliklerin algoritmadaki matris boyutlarını arttırmasıdır. Özellikle Newton-Raphson metodu ile yapılan güç akışı çalışmalarında Jacobian matris boyutunun artması, program belleğini arttırmasının ötesinde, ters matris alınma işlemi sırasında yakınsama hızını büyük ölçüde yavaşlatmaktadır. Stott [28] tarafından önerilen Newton-Raphson tabanlı birleşik yöntemde AA sistemine eklenen ilk DA hattına ait eşitlikler, Jacobian matrisinin boyutunu satır ve sütun sayısında 13 artış gösterecek şekilde büyütülmüştür.

Ayrık yöntemde ise, AA ve DA sistemleri için ayrı güç akışı algoritmaları koşturulur ve yakınsama bu iki güç akışı algoritmasında ileri-geri gidilerek sağlanır. İki güç

akışı arasındaki geçiş değişkenleri, AA devresi için; çeviricilere ait aktif ve reaktif güç değerleri, DA devresi için ise; çeviricilerin bağlı olduğu AA baralarındaki gerilim değerleridir. Bu yöntemde çeviricilere ait aktif ve reaktif güç değerleri, AA güç akışı boyunca sabit yük olarak kabul edilir. Ayrık güç akışı algoritması, her iki algoritmanın tek iterasyonda yakınsaması ile sona erer. Ayrık yaklaşımın birleşik yaklaşıma göre önemli üstünlükleri ve avantajları bulunmaktadır:

- AA ve DA güç akışı için farklı algoritmalar uygulanabilir.
- yazılım geliştirilmesi birleşik yönteme göre daha kolaydır.
- yeni bir DA güç akışı algoritması kullanılmak istenildiğinde mevcut AA güç akışı algoritması değiştirilmeden kullanılabilir.
- matris boyutu küçüldüğünden, bilgisayar belleği gereksinimi azalır.
- DA güç akışı algoritmasında lineer çözüm yöntemleri kullanılabilir.

Yakınsama hızı açısından bakıldığında, ayrık yöntemde iki farklı güç akışı algoritmasının koşturulması ve yakınsamanın bu iki algoritma arasında ileri-geri gidilerek sağlanması, bu yaklaşımın birleşik yönteme göre dezavantajlı görünmesine neden olabilir. Ancak, daha önceden bahsedildiği üzere, DA eşitliklerinin ters matris alma işlemine sokulmaması ve DA güç akışı algoritmasının lineer yöntemlerle çözülebilmesi, ayrık yöntemin birleşik yönteme göre daha hızlı yakınsamasını sağlar [29].

Hem birleşik yöntemde hem de ayrık yöntemde, güç akışının yakınsamasında karşılaşılan ortak sorulardan bir tanesi, DA güç akışı eşitliklerini sağlayacak çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin kademe değerlerinin ayarlanmasıdır. Bu sorunun giderilmesi konusunda her iki yaklaşım için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [30,31]. Ancak bu çalışmaların tamamında çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörler ideal kabul edilmiş olup, bu tarz çalışmaların pratik uygulamalarda bire bir uyumlu olamayacağı aşikardır. Tez çalışmasında, çevirici transformatörleri ideal değil, gerçek eşdeğer gösterimleri kullanılarak hesaplamalara katılmıştır.

1.2. Elektrik Güç Sistemlerinde Optimal Güç Akışı Çalışmaları

Elektrik enerji talebi sürekli artmakta ve bu durum elektrik güç sistemlerinin enerji taşıma kapasitelerini zorlamaktadır. Sürekli artan bu talebi karşılamak ve sistem kapasitesini rahatlatmak için, mevcut güç sistemlerine yeni enerji iletim hatlarının ilave edilmesi gerekmektedir. Yeni enerji iletim hatlarının tesis edilmesi, ekonomik maliyetlerinin çok yüksek olması ve arazi şartlarının elverişsizliği nedeniyle problemlili bir çözümdür. Elektrik enerjisindeki talep artışı, toplam enerji üretim maliyetlerini de arttırmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, mevcut güç sistemlerinin optimal olarak işletilmesi, büyük önem arz etmektedir.

Enerji üretim maliyetini arttıran bir çok etken vardır. Bunların içinde en önemli olanı, buharla tahrik edilen jeneratörlerin (üretmesi gereken aktif gücü sağlayacak) yakıt maliyetidir. Yakıt maliyetinin en aza indirilmesi, optimal aktif güç akışı algoritmaları ile sağlanır [32]. Güç sistemlerinde oluşan aktif güç kayıpları ve hatlardan akan reaktif güçler, iletim hatlarının güç taşıma kapasitesini düşürürler. Güç sistemlerinde oluşan aktif güç kaybının azaltılması, optimal reaktif güç akışı ile sağlanır [33]. Hem yakıt maliyeti hem de hat kayıpları azaltılarak enerji sisteminin en ekonomik şartlarda çalıştırılması (diğer bir ifade ile hem optimal aktif güç akışı hem de optimal reaktif güç akışının birlikte gerçekleştirilmesi) şüphesiz en uygun çözümdür. Bu amaca, çok amaçlı optimizasyon çalışması ile ulaşılabilir. Her iki amaca birlikte ulaşma işlemi, enerji sistemlerinde optimal güç akışı olarak adlandırılır [34].

Elektrik güç sistemlerinde optimizasyon çalışmaları 1930' lardan itibaren araştırılmaya başlanmış olup, özellikle 1950 li yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak hızlı bir şekilde artmıştır [35]. Literatürde AA güç sistemlerinde optimal aktif [36-39], reaktif [40-43] ve aktif-reaktif güç akışı [44-47] için oldukça çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Son yıllarda artan hava kirliliğinin tehlikeli boyutlara ulaşması, dünya otoritelerini bu konuda yaptırımlar uygulamaya zorlamaktadır. Yakıt ve termal kaynaklı güç santrallerinde oluşan CO_2 , SO_2 ve NO_x gibi gazların emisyonu, hava kirliliğine neden olmaktadır. Bundan dolayı santrallerde oluşan bu emisyonların en aza düşürülmesi dünyanın birçok yerinde

zorunlu kılınmıştır. Örneğin, ABD hükümeti, santrallerin oluşturduğu bu emisyonların azaltılması ile ilgili kanun düzenlemesi yapmıştır [48]. Bu sebeple günümüzde klasik optimal güç akışı çalışmaları içine emisyon optimizasyon hesaplamalarının da dahil edildiği yeni çalışmalar yapılmaktadır [49-52].

Bölüm 1.1.3' te bahsedildiği üzere AA-DA sistemlerinde güç akışı problemi için literatürde birçok çalışma bulunmasına rağmen, iki uçlu ya da çok uçlu AA-DA sistemlerinde optimal güç akışı problemi için yeterli çalışma bulunmamaktadır. Mevcut literatürde optimizasyon hesaplamaları için, kuadratik programlama, lineer programlama, karışık tamsayılı lineer olmayan programlama, gradyan yenileme algoritması ve en dik iniş algoritması gibi klasik yöntemler kullanılmıştır [53-60]. Ancak bu tür klasik yöntemlerle yapılan optimal güç akışı algoritmalarında ıraksama ve yerel minimuma takılma problemleri ile karşılaşılabilir [61]. Türev bazlı olan bu klasik yöntemlerde, algoritma başlangıcında tek bir kontrol ve durum değişkenleri seti seçilir ve algoritmaya bu değişkenler seti ile başlanır. Güç akışı algoritmalarının özellikle Newton-Raphson ve benzeri iteratif tabanlı yöntemler olması ve bu yöntemlerin başlangıç koşullarına oldukça bağımlı olması sebebiyle değişkenlerin uygun olarak seçilememesi durumu, ilk güç akışı algoritmasını ıraksamaya götürebilir ve optimizasyon algoritmasının başlamadan sonuçsuz bir şekilde sonlanmasına neden olabilir. ıraksama durumu her zaman algoritma başlangıcında da olmayabilir. İlerleyen iterasyonlar için bir önceki optimizasyon iterasyonu ile güncellenen kontrol değişkenleri ve bu kontrol değişkenleri için seçilen durum değişkenleri ile, yine tek bir değişkenler seti oluşturur. Optimizasyon algoritmasının ilerleyen iterasyonlarında, bu değişkenler seti, bir sonraki iterasyona ait güç akışı algoritması için uygun olmayabilir ve güç akışı algoritması ıraksayabilir [62]. Bazen de ıraksama durumu ile hiç karşılaşılmaz. Ancak algoritmanın herhangi bir iterasyonundan elde edilen güncellenmiş kontrol değişkenleri optimizasyonu yerel minimuma düşürebilir ve sonraki iterasyonlarda daha iyi bir çözüm geliştirilmesini engelleyebilir [63].

Son yıllarda, doğadaki canlıların akıllı davranışlarını göz önüne alarak geliştirilen sezgisel yöntemler optimizasyon problemlerine uygulanmaya başlanmıştır. Yapay Arı Koloni (YAK) algoritması [64,65], Genetik Algoritma (GA) [66,67],

Diferansiyel Evrim (DE) [68,69], Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [70,71] ve Karınca Koloni Algoritması (KKA) [72,73] önemli sezgisel optimizasyon yöntemlerinden olup, bu yaklaşımlar birçok global optimizasyon probleminin çözümüne uygulandığı gibi, AA sistemlerinde optimal güç akışı problemine de başarıyla uygulanmaya başlanmıştır. Sezgisel yöntemlerin yukarıda bahsedilen klasik yöntemlerden farklı olarak iki önemli özelliği bulunmaktadır. Birincisi, popülasyon tabanlı olmaları, ikincisi ise klasik optimizasyon hesaplamalarında sıkça yer alan türev işlemlerine ihtiyaç duymamalarıdır. Bu iki özellik, güç sistemlerinde yapılan optimal güç akışı problemlerinin çözümünde daha önceden bahsedilen optimizasyon yöntemlerinde karşılaşılan ıraksama ve yerel minimuma takılma problemlerinin giderilmesinde, sezgisel yöntemler lehine büyük üstünlük sağlar. Popülasyon tabanlı yapı, optimizasyon algoritmasının her iterasyonunda, birden fazla kontrol ve durum değişkeni setleri üreterek, güç akışı algoritmasının ıraksayarak optimizasyonun olumsuz sonuçlanmasını önler. Popülasyona ait değişkenler seti için belirlenen sınırlar içinde sürekli en iyiyi arama yapıldığından yerel minimuma takılma problemi ortadan kalkmış olur.

1.3. Tezin İçeriği ve Organizasyonu

Bu tezde, tek kutuplu çok uçlu AA-DA sisteminde yakıt maliyetini ve hat kayıplarını optimize eden optimal güç akışı hesabı için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Tez, giriş bölümü (birinci bölüm) dışında beş bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde, optimizasyon sonuçlarını iyileştirmek için AA-DA sistemine ilave edilen FACTS cihazları tanıtılmış ve bunların AA-DA güç akışı algoritmasına ve optimizasyon hesaplamalarına nasıl dahi edileceği detaylı olarak açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak AA-DA güç akışı için yeni bir ayırık güç akışı algoritması önerilmiştir. Önerilen bu algoritma ile benzer çalışmalardan farklı olarak çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek eşdeğer devreleri güç akışına dahil edilmiştir. AA-DA sistemindeki tüm kademe ayarlı transformatörlerdeki kademe değişimi ve Tristör Kontrollü Seri Kompanzatörlerdeki (TCSC) empedans değişimlerini bara admitans matrisine

sokulmadan Jacobian matrisine dahil edecek yeni güç denklemleri ve bu güç denklemlerine bağlı yeni türev denklemleri elde edilmiştir.

Dördüncü bölümde, literatürde çok uçlu AA-DA sistemlerinde optimal güç akışı için ilk kez kullanılacak YAK algoritması ve GA ve bu iki yöntemin önerilen yaklaşıma ayrı ayrı uygulanması detaylı olarak anlatılmıştır [63,74].

Beşinci bölümde, önerilen yaklaşım, örnek sistem olarak seçilen değiştirilmiş IEEE 17 baralı AA-DA test sistemine uygulanmıştır. Elde edilen uygulama sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

Altıncı bölümde, elde edilen uygulama sonuçları detaylı olarak irdelenmiş ve önerilen yaklaşımın üstünlükleri belirtilmiştir.

BÖLÜM 2. FACTS CİHAZLARI

Güç sistemlerinin gelişmesine ve büyümesine paralel olarak, iletim hatları üzerinden daha çok miktarda enerji iletim talebi ve sistem arızaları, araştırmacıları uzun zamandır bu konularda çözüm üretmeye yönlendirmektedir. Enterkonnekte sistemlerde sistem dinamiklerini kontrol etmek için kullanılan şönt/seri reaktörler/kapasitörler, kademe ayarlı transformatörler, faz kaydırıcı transformatörler ve senkron kondenseler gibi klasik AA elemanları, güç sistemlerinde karşılaşılan problemleri düzeltmede ve sistem performansını iyileştirmede çok eskiden beri temel çözüm olmuş ve halen de olmaya devam etmektedirler. Ancak bu elemanların (yapıları itibari ile) çoğu, kritik durumda sistem dinamiklerini değiştirmede hızlı ve hassas değildir [75]. Katı hal yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak, AA sistemini etkin şekilde kontrol etmek için güç elektroniği elemanları içeren cihazlar geliştirilmektedir. Literatüre FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) olarak giren ve esnek AA iletim sistemi olarak adlandırılan kavramın ürünleri olan bu cihazlar, güç sistemlerinin hassas ve hızlı bir şekilde kontrol edilmesinde, yukarıda bahsedilen klasik AA elemanlarının yerini hızlı bir şekilde doldurmaktadır. Amerikan Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü IEEE tarafından, FACTS cihazları, güç sisteminin kontrol edilebilirliğini kolaylaştırmak ve güç iletim kapasitesini arttırmak için kullanılan, güç elektroniği tabanlı bir sistem ya da statik donanım olarak tanımlanmıştır [76]. FACTS cihazları görevlerini, AA sistemine ait bir ya da daha fazla parametreyi kontrol ederek gerçekleştirirler.

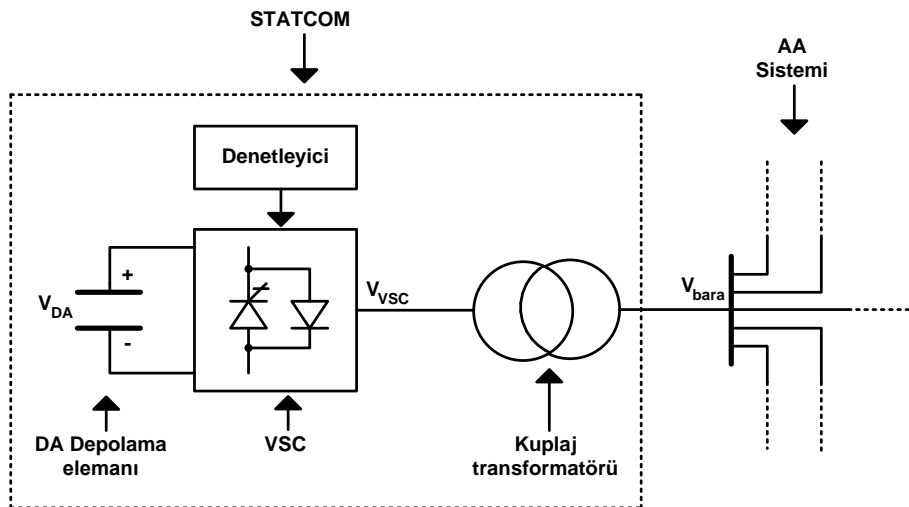
Tristör Kontrollü Reaktör (Thyristor-Controlled Reactor – TCR), Statik VAR Kompanzatorü (Static VAR Compensator – SVC), Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (Thyristor-Controlled Series Compensator – TCSC), Gerilim Kaynaklı Çevirici (Voltage Source Converter – VSC), Statik Kompanzator (Static Compensator – STATCOM), Statik Senkron Seri Kompanzator (Static Synchronous Series Compensator – SSSC) ve Birleşik Güç Akış Kontrolörü (Unified Power Flow

Controller – UPFC) en temel FACTS cihazları olup, bu cihazların amaç bakımından türevleri ya da benzerleri olan cihazlar da FACTS ailesi içinde sayılabilir. Bu tezin ana konusunu oluşturan ve enerji iletimi amaçlı kullanılan "yüksek gerilimli doğru akım sistemi", (Bölüm 1.1.2' de açıklanan özellikleri ve bu özelliklerin sağladığı üstünlükler sebebiyle, AA sistemine ait parametreleri kontrol etmek amaçlı da kullanıldığından) bir FACTS cihazı olarak tanımlanmaktadır [77].

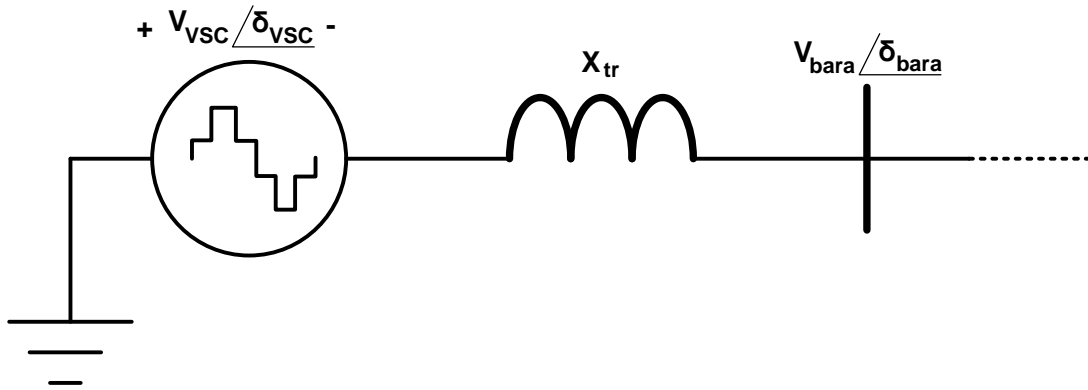
2.1. Statik Kompanzatör (STATCOM)

Statik Kompanzatör (STATCOM), gerilim kaynaklı çevirici tabanlı bir FACTS cihazıdır. STATCOM güç sistemlerinde, gerilim regülasyonu, dinamik kompanzasyon, güç kalitesini iyileştirme, harmonik eliminasyonu, güç faktörünü iyileştirme ve geçici kararlılık sınırlarını artırma amaçlı olarak kullanılmaktadır [77-79]. İşlevsel olarak senkron kondenserin benzeri olmasına rağmen, senkron kondenser gibi hareketli bir donanıma sahip olmadığından, reaktif güç kontrolünü çok daha hızlı bir şekilde yapabilir. Gerilim regülasyonu açısından STATCOM, Statik VAR kompanzatörü (SVC) ile aynı işlevi yerine getirir, fakat SVC'nin kontrolü düşük gerilim seviyelerinde verimli olmaz [77].

STATCOM' a ait şematik gösterim Şekil 2.1' de ve eşdeğer devre gösterimi Şekil 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.1. Statik Kompanzatöre (STATCOM) Ait Şematik Gösterim



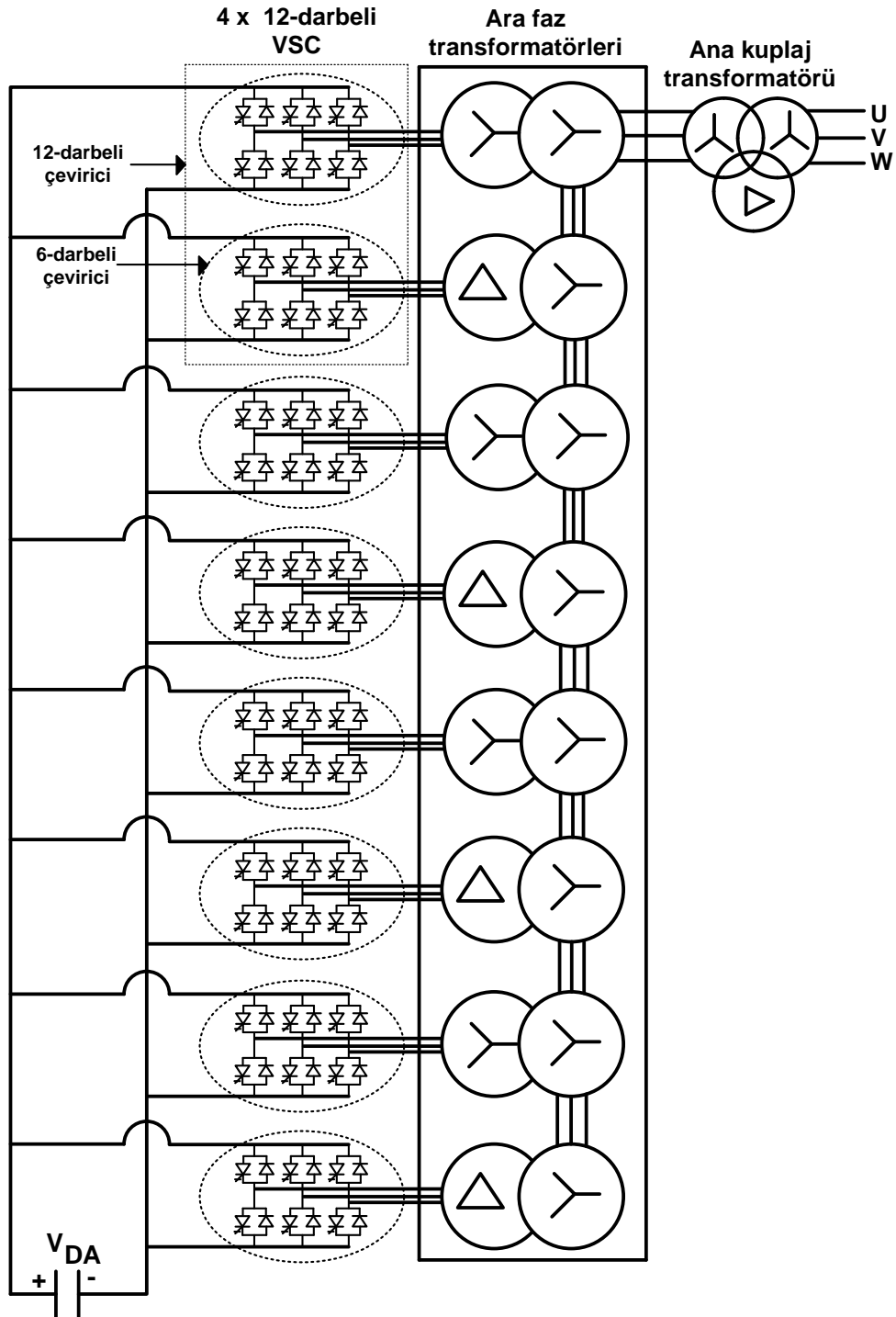
Şekil 2.2. Statik Kompanzatöre (STATCOM) Ait Eşdeğer Devre Gösterimi

Şekil 2.1' de görüldüğü üzere STATCOM dört ana bölümden oluşmaktadır: DA depolama elemanı, VSC, denetleyici ve kuplaj transformatörü.

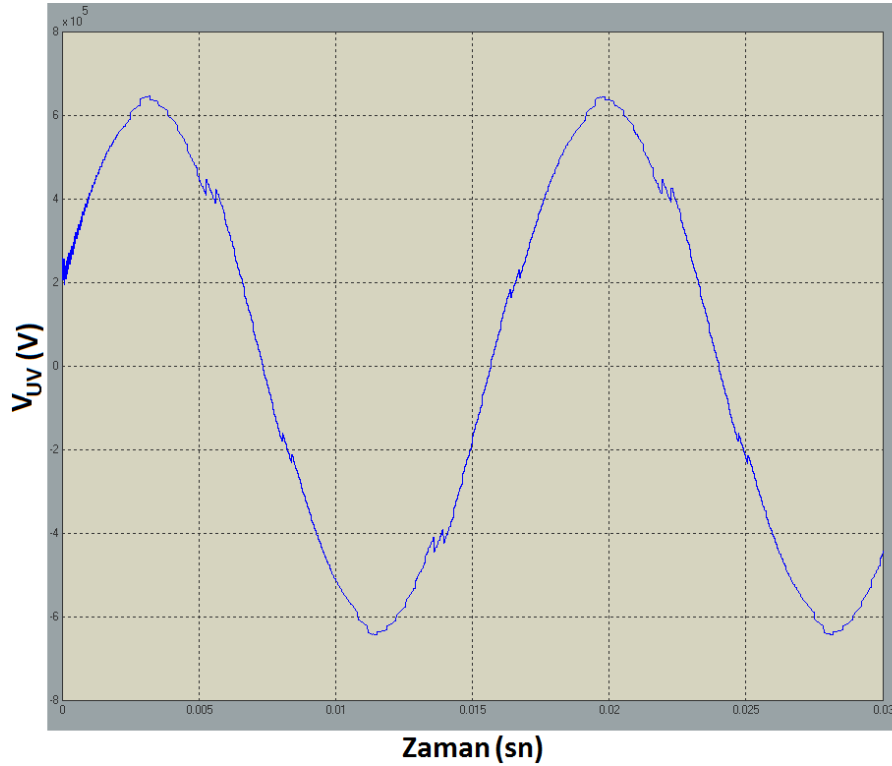
DA depolama elemanı, çıkış doğru gerilimi sabit olan bir batarya ya da (çıkış doğru gerilimi VSC' nin kontrolüne bağlı olarak depoladığı enerji arttırılabilen ya da azaltılabilen) bir kapasitör olabilir. Uygulamada esnek gerilim seviyesi ayarı yapılabilmesi ve uzun ömürlü olması sebebiyle, DA kapasitör ya da kapasitör grubu kullanılmaktadır. V_{DA} gerilimi, VSC' nin evirici olarak üç fazlı V_{VSC} alternatif gerilimi üretmesi için kullanılmaktadır. VSC' ye uygulanacak doğru gerilimin hassas ayarlanabilmesi için çoğu uygulamada, VSC' nin girişinde, alçaltıcı-yükseltici DA-DA çeviriciler kullanılmaktadır [80,81].

VSC; denetleyicinin uygun şekilde kontrol edilmesiyle, V_{DA} geriliminden istenilen V_{VSC} genliğinde ve δ_{VSC} faz açısında, (basamaklı) üç fazlı alternatif gerilim üreten eviricidir. VSC ler, çıkış gerilimlerinde, 6 ve katlarında basamak içeren devrelerdir. 6-darbeli çeviricilerin uygun ardışıl olarak kombinasyonları ile, gerilimdeki basamak sayısı arttırılmaktadır. Bilindiği üzere N adet 6-darbeli çeviricinin kombinasyonu ile üretilen üç fazlı alternatif gerilim, $6Nk \pm 1$ ($k=1,2,3,\dots$) harmonik bileşenlerini içerir. Görüldüğü üzere, darbe sayısının arttırılması, gerilim harmonik bileşenlerini azalttığından, evirici çıkışında sinüse çok daha yakın bir alternatif gerilim elde edilir. Harmonik bileşenlerinin azalması, akım harmoniklerini ve filtre gereksinimi azaltır. Modern VSC' ler, 48-darbeli olarak üretilmektedir. Şekil 2.3' te (2 adet 6-darbeli

çevirici ile elde edilen) 12-darbeli çevirici ve (4 adet 12-darbeli çeviriciden elde edilen) 48-darbeli STATCOM konfigürasyonu gösterilmiştir. Şekil 2.4' te ise 48-darbeli çevirici çıkışına ait gerilim dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.3. 48-darbeli Statik Kompanzator (STATCOM) Konfigürasyonu



Şekil 2.4. 48-darbeli Statik Kompanzatore (STATCOM) Ait Çıkış Gerilim Dalga Şekli

Denetleyicinin görevi; VSC yardımı ile, V_{DA} gerilimini kullanarak, transformatör girişinde, V_{VSC} genliğinde ve δ_{VSC} faz açısında (üç fazlı) alternatif gerilim üretecek (güç elektroniği elemanlarında) tetikleme işaretlerini oluşturmaktır. Anahtarlama yöntemi olarak genellikle darbe genişlik modülasyonu (PWM – Pulse Width Modulation) kullanılmaktadır. PWM yöntemi ile hem ana harmonik ve diğer harmonik genlikleri hem de ana harmonik gerilime ait faz açısı etkili bir şekilde ayarlanabilmektedir.

Şekil 2.1’ de görüldüğü üzere, VSC çıkış gerilimi şebekeye uygulanmadan önce, bir kuplaj transformatörü üzerinden geçirilir. Kuplaj transformatörü; hem şebeke gerilimine görece oldukça küçük olan VSC çıkış gerilim değerini yükseltmek hem de VSC çıkış gerilimi harmoniklerini azaltarak daha sinüsoide yakın bir gerilim dalga şekli elde etmek için manyetik arayüz olarak kullanılır. Çoğu zaman VSC çıkış gerilimi direkt olarak kuplaj transformatörüne uygulanmaz. Şekil 2.3’ te görüldüğü gibi çok basamaklı gerilim elde etmek için birden fazla kullanılan VSC çıkış gerilimleri ara faz transformatörleri ile toplandıktan sonra ana kuplaj

transformatörüne uygulanır. Ara faz transformatörlerinde toplanan VSC çıkış gerilimlerinde harmonik bileşenler azaltılır ve ana kuplaj transformatörüne sinüsoide daha yakın bir gerilim dalga şekli gönderilir. Şekil 2.2' de gösterilen transformatörlere ait kaçak endüktans etkisiyle oluşan x_{tr} kuplaj reaktansı, çevirici reaktif güç değerini etkiler [79]. Kuplaj reaktans değerinin seçimi, şebekenin harmonik durumuyla alakalı olmakla beraber, genellikle, kuplaj transformatörünün sekonderinin şebekeye bağlandığı ortak kuplaj noktasındaki harmonik etkisini azaltmak için bu reaktansın değeri yüksek seçilir [82].

STATCOM; (şebekeye bağlandığı ortak kuplaj noktasındaki şebeke gerilim genliği, bu gerilime ait faz açısı ve kuplaj reaktansı gözetilerek) çevirici gerilim genliği ve bu gerilime ait faz açısı, amaca uygun şekilde ayarlanarak kontrol edilir. Şekil 2.2' den görüldüğü üzere, STATCOM ile şebekeye bağlandığı bara arasında alınıp verilen aktif ve reaktif güç değerleri, birim değer cinsinden;

$$p_{stat} = \frac{v_{bara} v_{vsc}}{x_{tr}} \sin \delta_{stat} \quad (2.1)$$

$$q_{stat} = \frac{v_{bara}^2 - v_{bara} v_{vsc}}{x_{tr}} \cos \delta_{stat} \quad (2.2)$$

olarak ifade edilir. (2.1) ve (2.2) eşitliklerinde belirtilen δ_{stat} açısı, STATCOM' un bağlandığı AA barasına ait gerilim açısı (δ_{bara}) değeri ile STATCOM' a ait VSC çıkış gerilimi açısı (δ_{vsc}) değeri arasındaki farkı göstermek üzere aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\delta_{stat} = \delta_{bara} - \delta_{vsc} \quad (2.3)$$

(2.1) eşitliği $p_{stat} > 0$ için; STATCOM'un şebekeden çektiği aktif güç miktarını bulmak için kullanılır. $p_{stat} < 0$ olması durumunda ise STATCOM şebekeye enerji vermektedir. p_{stat} değerinin pozitif ya da negatif olması, (2.3) eşitliğinde verilen δ_{stat} değerinin işaretine bağlıdır. Bu açı sıfırdan büyük olduğunda şebekeden STATCOM' a, tersi durumda ise STATCOM' dan şebekeye doğru aktif güç akışı sağlanır.

(2.2) eşitliği $q_{stat} > 0$ için; STATCOM' un AA şebekesinden çektiği endüktif reaktif güç değerini bulmak için kullanılır. $q_{stat} < 0$ durumunda ise STATCOM şebekeden kapasitif reaktif güç çekmektedir. Şekil 2.1'de gösterilen "DA kapasitörde" depolanan enerji sonsuz olamayacağından, STATCOM, $p_{stat} < 0$ modunda sürekli olarak çalıştırılmaz. DA depolama elemanı ile ilgili bilgi verilirken açıklandığı gibi, sadece kapasitörün uç gerilimini, dolayısıyla VSC giriş doğru gerilim değerini arttırmak ve azaltmak istenildiğinde aktif güç alış verişi yapılır. STATCOM' dan şebekeye aktif güç verilerek kapasitör gerilimi azaltılabilir ya da şebekeden STATCOM' a aktif güç aktarılarak kapasitör gerilimi arttırılabilir.

STATCOM ile şebeke arasında aktif güç alış verişi olmadan sadece reaktif güç iletimi olması için, (2.1) eşitliğinden görüleceği üzere, $\delta_{stat} = 0$ olması gerekmektedir. Bu durumda, (2.2) eşitliğinden görüleceği üzere STATCOM ile şebeke arasında akacak reaktif güç değerini; STATCOM' ait VSC çıkış gerilimi (V_{VSC}) ve şebekeye bağlandığı noktadaki bara gerilim (V_{bara}) değerleri belirler. Pratikte STATCOM' a ait transformatör sargılarında ve VSC' deki güç elektroniği anahtarlama elemanlarında aktif güç kaybı oluşur. Bu kayıp şebekeden karşılanır ve dolayısıyla V_{VSC} ve V_{bara} 'ya ilişkin fazörler arasında (sürekli olarak) küçük bir faz farkı oluşur. Bu tezde, STATCOM' a ait tüm elemanların ideal olduğu varsayılarak kayıp oluşmadığı kabul edilmiştir. (2.2) eşitliğinde tanımlanan ve $\delta_{stat} = 0$ yapılarak STATCOM ile şebeke arasında akacak reaktif güç değerinin belirlenmesinde, (STATCOM' un şebekeye bağlandığı baraya ait) V_{bara} gerilimi (V_{bara} gerilimi sistem dinamiklerine bağlı olarak sürekli değiştiği için) dolaylı rol oynar. Zira, bu baraya bağlanan STATCOM, şebekeye sağlayacağı reaktif gücü kontrol ederek, V_{bara} gerilimini ayarlamak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla STATCOM' un sağlayacağı reaktif güç değerini belirleyen ana etken; V_{bara} gerilimine göre VSC çıkış gerilimi V_{VSC} değerinin ayarlanmasıdır. Daha önce de açıklandığı gibi, VSC giriş doğru gerilim değerini ve (bu gerilim değerine bağlı olarak) VSC kontrolü uygun şekilde yapılarak, V_{VSC} değeri istenilen değere ayarlanabilir. V_{VSC} , V_{bara} ve δ_{stat} değerlerine

göre, STATCOM ile şebeke arasında akan aktif ve reaktif güçlerin durumu Tablo 2.1’ de gösterilmiştir.

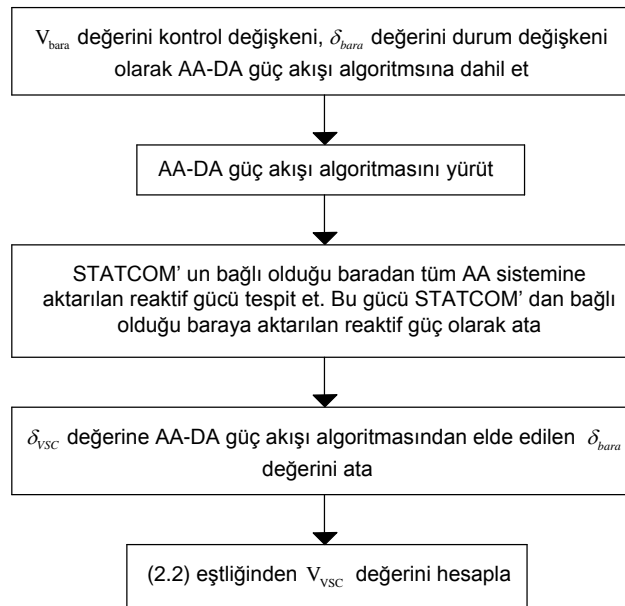
Tablo 2.1. V_{VSC} , V_{bara} ve δ_{stat} Değerlerine Göre Statik Kompanzator (STATCOM) ile AA Şebeke Arasında Akan Aktif ve Reaktif Güçlerin Durumu

Gerilim ve Açılı İlişkisi	Güç Akış Verişi		
	STATCOM	↔	AA Şebeke
$ V_{VSC} > V_{bara} $ ($\delta_{stat} = 0$)	q	(endüktif) →	
$ V_{VSC} < V_{bara} $ ($\delta_{stat} = 0$)		(endüktif) ←	q
$\delta_{stat} < 0$	p	→	
$\delta_{stat} > 0$		←	p

Bu tezde, STATCOM, sisteme senkron kondenser gibi çalışacak şekilde sıfır aktif güç üreten jeneratör olarak dahil edilmiştir. Güç akışı çalışmalarında jeneratörlere ait gerilim genlik değerleri kontrol değişkeni olarak ele alınır. Ürettikleri reaktif güç değerleri ise ancak güç akışı algoritması sona erdiğinde güç dengesinden tespit edilebilir.

STATCOM’ un sisteme senkron kondenser gibi dahil edilmesinde iki farklı yol izlenebilir. Birinci yaklaşımda; V_{VSC} değeri kontrol değişkeni olarak güç akışı algoritmasına dahil edilir. Bu durumda, Şekil 2.2’ den görüleceği üzere VSC çıkışı, sisteme yeni bir bara olarak ilave edilmek durumunda kalır ve x_{tr} reaktansı bara admitans matrisine sokulur. Sistem bara sayısındaki bu artış güç akışı algoritmasında ilave güç hesaplamalarına, bara admitans matrisinin boyutunun büyümesine (dolayısıyla güç akışı algoritmasının program boyutunun artmasına) ve algoritmanın yakınsama süresinin artmasına neden olur. V_{VSC} ’ ye ait faz açısı δ_{VSC} , (STATCOM’ un sisteme bağlandığı bara gerilim genlik değeri) V_{bara} ve bu gerilime ait faz açısı δ_{bara} , güç akışı algoritmasına durum değişkeni olarak dahil edilir. Şebekedeki her STATCOM başına bu üç durum değişkeninin değerleri, ancak algoritma bitiminde bulunabilir. STATCOM’ un ürettiği reaktif güç değeri ise algoritma sona erdikten sonra, güç dengesinden ya da (2.2) den eşitliğinden yola çıkılarak bulunur.

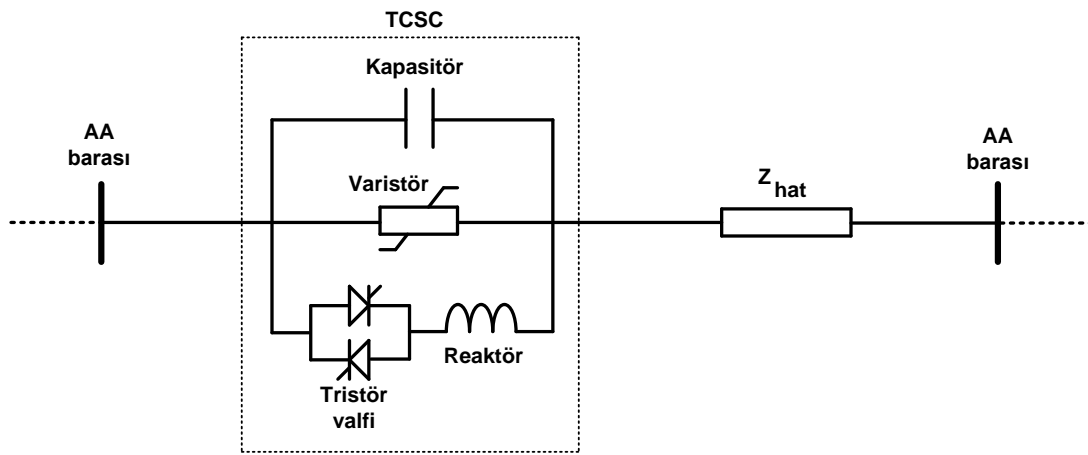
İkinci yaklaşımda ise; sadece STATCOM' un sisteme bağlandığı baraya ait gerilim genlik değeri V_{bara} (güç akışı algoritmasına) kontrol değişkeni olarak, bu gerilime ait faz açısı δ_{bara} ise durum değişkeni olarak dahil edilir. Böylelikle sistem bara sayısında artış olmaz ve x_{tr} değerinin bara admitans matrisine sokulması ile ilave güç hesaplamalarına gerek kalmaz. Güç akışı algoritması sona erdiğinde, STATCOM' un sisteme bağlandığı bu baradaki gerilim faz açısı δ_{bara} ve bu baradan AA sistemine aktarılan reaktif güç değeri hesaplanır. Bu baradan AA sistemine aktarılan reaktif güç, Şekil 2.2' den görüleceği üzere, aynı zamanda, STATCOM' dan bu AA barasına aktarılan reaktif güçtür. STATCOM' un sadece reaktif güç modunda çalışması sebebiyle, δ_{VSC} değerinin δ_{bara} değerine eşit olması gerektiğinden, (algoritma sona erdiğinde) δ_{bara} açısı artık bilineceğinden dolayı, $\delta_{\text{bara}} = \delta_{VSC}$ eşitliği ile δ_{VSC} değeri kolaylıkla bulunur. Son olarak, STATCOM' a ait VSC çıkış gerilim genlik değeri V_{VSC} , (2.2) eşitliğinden (q_{stat} değeri güç akışı sonunda bulunduğu için) kolaylıkla hesaplanabilir. Bu tezde, birinci yaklaşıma göre sağladığı üstünlükler nedeni ile, ikinci çözüm yolu kullanılmıştır. Şekil 2.5' te, tezde sunulan AA-DA güç akışı algoritmasına, STATCOM hesaplamalarının nasıl dahil edildiğini gösteren işaret akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.5. Statik Kompanzatrün (STATCOM) AA-DA Güç Akışı Algoritmasına Dahil Edilmesine Ait İşaret Akış Şeması

2.2. Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC)

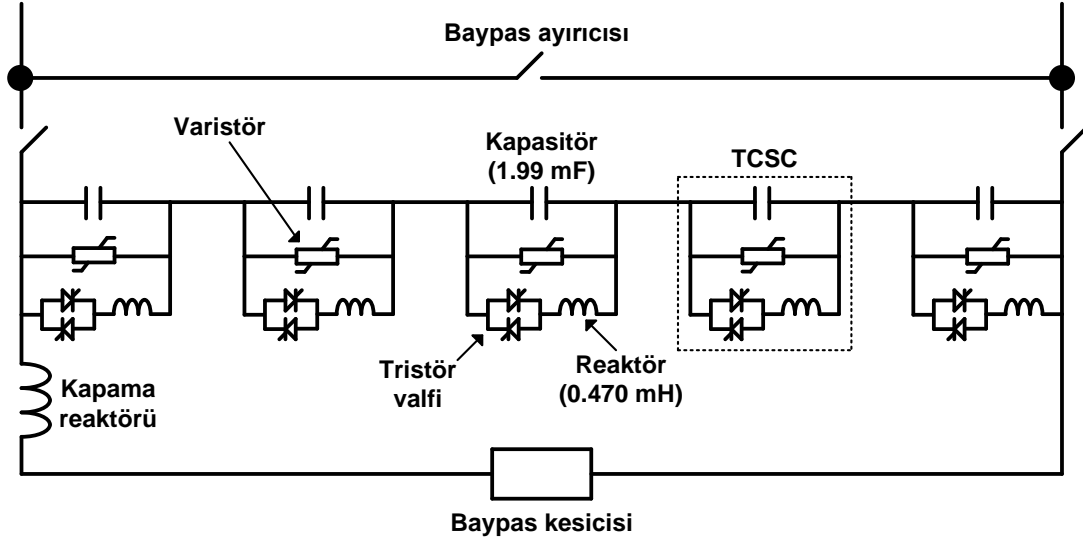
Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) reaktans değeri kontrol edilebilen bir FACTS cihazıdır. Şekil 2.6' da görüldüğü üzere bu cihaz, (AA sisteminde) iletim hattına seri olarak bağlanarak, bağlandığı iletim hattının empedansını (Z_{hat}) kompanze eder. Bu yolla tüm sistemin bara admitans yapısı değiştirilebilir. TCSC; AA sisteminde senkron altı rezonans risklerinin yok edilmesinde, aktif güç osilasyonlarının söndürülmesinde, kararlılığın iyileştirilmesinde ve dinamik güç akışının sağlanmasında etkin şekilde kullanılmaktadır [83-86].



Şekil 2.6. Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) Ait Şematik Gösterim

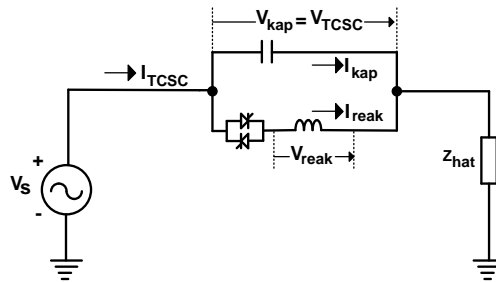
Şekil 2.6' dan görüleceği üzere TCSC dört temel elemandan oluşmaktadır: sabit kapasitör, her iki alternansta iletim sağlayabilen zıt yönlü paralel bağlanan iki adet tristörden oluşmuş valf, bu tristör valfine seri bağlı reaktör ve varistör. Tristör valfi ve reaktörden oluşan bölüm tristör kontrollü reaktördür (TCR) [87]. TCSC' nin temel çalışma prensibi, sabit kapasitör reaktansına göre, reaktöre ait etkin reaktans değerini uygun şekilde ayarlayarak, eşdeğer reaktansın esnek bir şekilde ayarlanması prensibi üzerine kurulmuştur. Reaktöre seri bağlı tristör valfinin tetikleme açıları uygun şekilde ayarlanıp, reaktör uçlarındaki gerilim ve reaktörden akan akım kontrol edilerek, reaktörün etkin reaktans değeri arzu edilen değere getirilir. Varistör; genellikle metal oksitten yapılan, doğrusal olmayan bir dirençtir ve nominal çalışma durumunda, ideal olarak sonsuz dirence sahiptir. Herhangi bir arıza sebebiyle oluşan

ve eşik geriliminin üzerinde maruz kaldığı aşırı gerilimlerde, varistör direnç değeri hızlı bir şekilde düşer. Böylelikle TCSC olası aşırı gerilimlere karşı korunur. Pratikte, TCSC birden fazla modülden oluşur. Slatt-Buckley (ABD) iletim hattında kullanılan çok modüllü TCSC yapısı, Şekil 2.7' de verilmiştir [88].



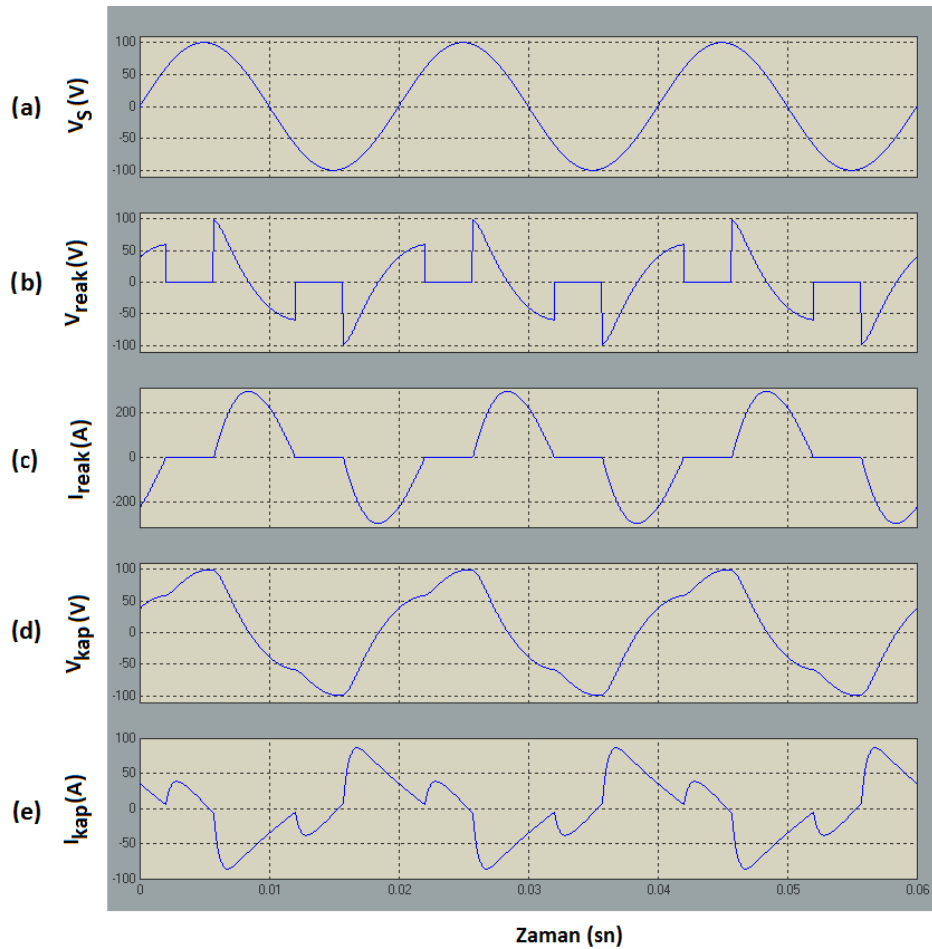
Şekil 2.7. Slatt-Buckley (ABD) Enerji İletim Hattında Kullanılan Çok Modüllü Tristör Kontrollü Seri Kompanzatörün (TCSC) Yapısı

TCSC' nin çalışma prensibi Şekil 2.8' deki tek hat şemasından açıklanabilir. Burada görülen V_s kaynak gerilimi; TCSC'nin bağlı olduğu hattın iki ucundaki baralar arasındaki gerilim farkını temsil etmektedir. Daha öncede açıklandığı üzere, TCSC' ye ait reaktör gerilimi (V_{reak}) ve dolayısı ile reaktör akımı (I_{reak}) da, tristörlerin uygun tetiklenmesiyle kontrol edilebilir.



Şekil 2.8. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) ve Seri Bağlı Olduğu Hattın Ait Tek Hat Şeması

Tristör valfi tetiklenerek kapasitör gerilimi (V_{kap}) üzerinden reaktör gerilimi üretilir. Kapasitör gerilimi, aynı zamanda TCSC gerilimi olan V_{TCSC} ' dir. Reaktör gerilimi, tristörler kontrol edilerek değiştirilir. I_{reak} akımı saf endüktif karakteristiğinde olduğundan, V_{reak} gerilimini kontrol eden tristörlerin tetikleme aralığı; $90^\circ < \alpha_{TCSC} < 180^\circ$ dir. 90 derece altında, reaktör akımı sürekli olacağından, akım kontrol edilemez. Ters yönde ve paralel bağlı tristörlerden her biri, farklı alternanslarda kontrol edilir. Dolayısıyla her bir tristörün tetikleme açıları arasında 180° faz farkı olacak şekilde ayarlanması gerekliliği aşikardır. TCSC tristörlerinin dengeli ve 90 dereceden büyük bir açıda (130 derece) tetiklenmesi durumunda elde edilen eğriler, Şekil 2.9' da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatöre (TCSC) Ait Karakteristik Dalga Şekilleri

- a)- kaynak gerilimi dalga şekli b)- reaktör gerilimi dalga şekli c)- reaktör akımı dalga şekli
- d)- kapasitör gerilimi dalga şekli e)- kapasitör akımı dalga şekli

Tristör tetikleme açısı (α_{TCSC}) değerine bağlı olarak, sürekli çalışma koşullarında, TCSC' ye ait ana harmonik eşdeğer reaktans parametresi [77];

$$x_{TCSC} = -x_C + K_1 \left\{ 2(\pi - \alpha_{TCSC}) + \sin \left[2(\pi - \alpha_{TCSC}) \right] \right\} + K_2 \cos^2(\pi - \alpha_{TCSC}) \left\{ \varpi \tan \left[\varpi(\pi - \alpha_{TCSC}) \right] - \tan(\pi - \alpha_{TCSC}) \right\} \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilebilir. (2.4) eşitliğinde x_C ; TCSC' ye ait kapasitörün reaktans genliğini, α_{TCSC} ; TCSC' ye ait tristör tetikleme açısını (radyan cinsinden) ifade etmektedir. (2.4) eşitliğinde kullanılan K_1 , K_2 ve ϖ değerleri (2.5)-(2.7) eşitlikleri ile verilmiştir;

$$K_1 = \frac{x_C + x_{LC}}{\pi} \quad (2.5)$$

$$K_2 = -\frac{4x_{LC}^2}{x_L \pi} \quad (2.6)$$

$$\varpi = \sqrt{\frac{x_C}{x_L}} \quad (2.7)$$

(2.7) eşitliğindeki x_L değeri, TCSC' ye ait reaktörün reaktans genliğidir. Yukarıdaki eşitliklerde görülen x_{LC} değeri ise;

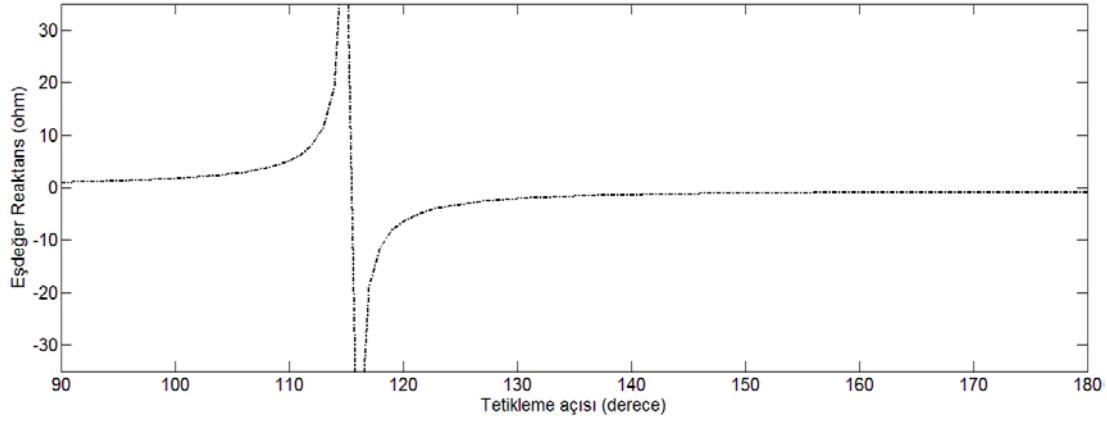
$$x_{LC} = \frac{x_C x_L}{x_C - x_L} \quad (2.8)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanır. x_{TCSC} reaktans parametresi, yukarıda bahsedilen x_C ve x_L reaktans genliklerinden farklı olarak, pozitif ve negatif değerler alabilir. (2.4)-(2.8) eşitliklerinde görülen tüm reaktans değerleri, ana harmonik frekans değerine göre hesaplanmalıdır.

Uygulamada x_L değeri x_C değerinden yeterli derecede küçük seçilerek TCSC' nin hem kapasitif hem de endüktif bölgede çalışması sağlanır. Zira, x_C değeri, x_L değerinden küçük seçilirse, TCSC her durumda sadece kapasitif bölgede çalışır.

TCSC' ye ait kapasitör ve reaktörün seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer ve en önemli nokta; 90° ve 180° arasındaki tristör tetikleme açısı için sadece tek bir noktada paralel rezonans durumunun sağlanmasıdır [89]. Uygun seçilmeyen

kapasitör ve reaktör değerleri için bu aralıkta birden fazla paralel rezonans durumu ile karşılaşılabilir [90]. Şekil 2.10' da, tristör tetikleme açısı α_{TCSC} 'nin değişimine bağlı olarak, TCSC eşdeğer reaktans parametresinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatöre (TCSC) Ait Eşdeğer Reaktans Parametresinin Tristör Tetikleme Açısına Göre Değişimi

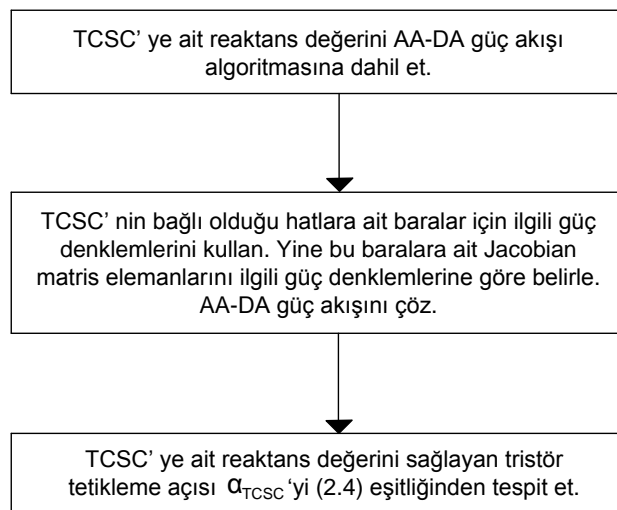
(2.4) eşitliği ile verilen eşdeğer TCSC reaktans parametresini, ideal olarak sonsuza götürerek TCSC' yi paralel rezonansa sokan α_{TCSC} tetikleme açıları (radyan cinsinden);

$$\alpha_r = \pi - \frac{(2n-1)\sqrt{LC}\pi w}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.9)$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada, L, C ve w sırasıyla, TCSC' ye ait reaktörün endüktans değerini, TCSC'ye ait kapasitörün kapasite değerini ve açısal frekansı ifade etmektedir.

Bu tezde yapılacak olan AA-DA sistemi için optimal güç akışı çalışmasında TCSC eşdeğer reaktans değeri, optimizasyon çalışmasına, kontrol değişkeni olarak sokulmuştur. Sisteme ait admitans değerleri, bara admitans matrisi içine sokularak, güç akışı hesaplamalarına dahil edilirler. Enerji iletim hatlarına ait seri ve şönt admitans değerleri sürekli aynı kaldıklarından, sadece bu admitans değerlerini içeren sistemlerde yapılacak güç akışı ya da optimal güç akışı çalışmalarında bara admitans matrisinin bir kere oluşturulması yeterlidir. Ancak, sistemde kademe ayarlı transformatör ve TCSC gibi farklı çalışma durumlarında admitans değerleri

değişkenlik gösteren elemanlar var ise bu durumda, güç akışı ya da optimal güç akışı çalışmalarında, bu elemanlara ait admitans değer değiştirdiğinde, sisteme ilişkin bara admitans matrisinin yeniden oluşturulması gerekir. Bu tezde yapılacak çalışmada, TCSC'ye ait reaktans değeri, optimizasyon çalışması için kontrol değişkeni olarak her optimizasyon iterasyonunda güncelleneceğinden, her yeni reaktans değeri için bir sonraki optimizasyon algoritmasına ait güç akışı algoritmasından önce, bara admitans matrisinin yeniden oluşturulması gerekmektedir. Bu durum, güç akışı algoritmasına ilave yük getirir ve algoritmanın yakınsama süresini uzatır. Bu sebeple bu tezde, TCSC'ye ait reaktans değişimi etkisi, bara admitans matrisine sokulmadan, güç akışı algoritması esnasında, Jacobian matrisine dahil edilmiştir. Böylelikle bara admitans matrisinin sürekli yeniden oluşturulması zorunluluğu ortadan kaldırılarak, güç akışı algoritmasının hızlı bir şekilde yakınsaması sağlanmıştır. Zira, Jacobian matris her güç akışı iterasyonunda zaten yeniden inşa edildiğinden, bu yöntemin yakınsama zamanına olumsuz yönde bir etkisi olmayacaktır. TCSC reaktans değişimi etkisinin, Jacobian matrisine dahil edilebilmesi için, Bölüm 3' te, yeni güç denklemleri ve bu güç denklemlerine bağlı yeni türev denklemleri elde edilmiştir. Optimizasyon programı yakınsadığında (kontrol değişkeni olan) TCSC reaktans değeri bilineceğinden, bu reaktans değeri (2.4) eşitliğinde yerine konularak, α_{TCSC} tetikleme açısı bulunabilir. Şekil 2.11'de, TCSC'nin reaktans değişiminin, güç akışı algoritmasına dahil edilmesine ilişkin işaret akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.11. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatörün (TCSC) AA-DA Güç Akışı Algoritmasına Dahil Edilmesine Ait İşaret Akış Şeması

BÖLÜM 3. ÖNERİLEN AA-DA GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMI

Bu bölümde, optimal güç akışı hesabında kullanılacak yeni bir AA-DA güç akışı yaklaşımı sunulmuştur. Önerilen AA-DA güç akışı için ayrık yöntem uygulanmıştır. Ayrık AA-DA güç akışı algoritmasının parçası olarak önerilen AA ve DA güç akışı algoritmaları sırasıyla Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2' de detaylı olarak anlatılmıştır. Bölüm 3.3' te önerilen ayrık AA-DA güç akışı algoritması verilmiştir. AA güç akışı hesaplamaları için Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Kademe ayarlı transformatörlerin kademe değişimi ile TCSC' ye ait reaktans değişimi etkileri bara admitans matrisine sokulmadan Jacobian matrise dahil edilmiştir. Bu amaçla yeni güç denklemleri ve Jacobian matris elemanı hesaplamaları için yeni türev denklemleri elde edilmiştir. DA güç akışı hesaplamaları için Gauss iterasyon yöntemi kullanılmıştır. DA sistemine ait çeviricilerin kademe ayarlı transformatörleri için gerçek eşdeğer devreleri kullanılmış, buna bağlı olarak yeni DA denklemleri elde edilmiştir. DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değeri DA güç akışı ile, kademe değişimine bağlı etkiler AA güç akışı ile hesaplanmıştır.

Güç akışı hesaplamalarında hem AA hem de DA sistemi için birim değerler kullanılmıştır. Hesaplamalar sürekli hal çalışma için yapılmış olup AA değerleri için ana harmonik bileşen haricinde harmoniklerin olmadığı, ana harmonik değerlerinin dengeli olduğu ve DA değerleri için dalgalanmaların olmadığı kabul edilmiştir.

3.1. Ayrık AA-DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası Olarak Önerilen AA Güç Akışı Yaklaşımı

AA sistemlerinde güç akışı hesaplamaları, her bir AA barasında güç dengesinin sağlanması ile yapılır. Güç akışı hesaplamalarında kontrol değişkenlerine (u_{AA}) bağlı durum değişkenleri (x_{AA}) hesaplanır. Bunun için güç akışı boyunca kontrol değişkenleri sabit tutulur.

AA sistemine ait bir baranın özellikleri dört değişken ile belirlenir. Bunlar; baradan tüm AA hatlarına aktarılan aktif güç p_{hat} , baradan tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güç q_{hat} , baraya ait gerilim genliği v ve baraya ait gerilim açısı δ değerleridir. Güç akışı algoritmasında bu değişkenlerden iki tanesinin bilindiği kabul edilerek, diğer iki değişken bulunmaya çalışılır. Bu değişkenlere bağlı olarak AA baraları üç farklı gruba ayrılır: salınım (slack) barası, p_v barası ve p_q barası.

Salınım barası ya da slack bara, genellikle sistemdeki en güçlü jeneratörün bağlı olduğu baradır. Bu bara türünde v ve δ değerleri bilinir, yani güç akışı algoritmasında sabit tutulur. Buna karşılık olarak p_{hat} ve q_{hat} bulunmaya çalışılır. Güç akışı çalışmalarında 1 numaralı bara genellikle salınım barası olarak tanımlanır ve bu baraya ait δ değeri sıfır alınır.

p_v barası, p_{hat} ve v değerinin bilindiği ve buna karşılık q_{hat} ve δ değerinin arandığı jeneratör barası veya gerilim kontrollü baradır. Salınım barası haricindeki tüm jeneratörler ile gerilim kontrolünü sağlayan şönt reaktif güç üreteçlerinin (senkron kondenser, STATCOM, statik VAR kompanzatörleri vs.) bağlı olduğu baralar bu gruba girer.

p_q barası, p_{hat} ve q_{hat} değerinin bilindiği ve buna karşılık v ve δ değerinin arandığı yük barasıdır. Şehir ve sanayi baraları bu gruba girer.

3.1.1. AA güç akışı eşitlikleri

Önerilen AA güç akışı yaklaşımında, DA çeviricilere ait aktif ve reaktif güçler, bu çeviricilerin bağlandığı AA baralarında sabit yük olarak kabul edilmiştir. Bu kabul ile i numaralı AA barasından bu baraya bağlı tüm AA hatlarına aktarılan kompleks güç değeri;

$$\bar{s}_i = p_i + jq_i = \bar{v}_i \sum_{j=1}^{nb} \bar{v}_j^* (g_{bara_{ij}} - jb_{bara_{ij}}) \quad (i = 1, \dots, n_b) \quad (3.1)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada n_b , p_i , q_i , \bar{v}_i ve \bar{v}_j^* sırasıyla, AA bara sayısını, i. baradan bu baraya bağlı AA hatlarına aktarılan aktif gücü, i. baradan bu baraya bağlı AA hatlarına aktarılan reaktif gücü, i. baraya ait gerilimin kompleks değerini ve j. baraya ait gerilimin kompleks eşlenik değerini ifade etmektedir. (3.1) eşitliğindeki \bar{v}_i ve \bar{v}_j^* ifadeleri;

$$\bar{v}_i = v_i (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (3.2)$$

$$\bar{v}_j^* = v_j (\cos \delta_j - j \sin \delta_j) \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu ifadelerde v_i , δ_i , v_j ve δ_j sırasıyla, i. baraya ait gerilim genlik değerini, i. baraya ait gerilimin açı değerini, j. baraya ait gerilim genlik değerini ve j. baraya ait gerilimin açı değerini tanımlamaktadır. (3.1) eşitliğindeki $g_{bara_{ij}}$ ve $b_{bara_{ij}}$ sırasıyla, AA sistemine ait bara admitans matrisinin (i,j) elemanının;

$$y_{bara_{ij}} = g_{bara_{ij}} + jb_{bara_{ij}} \quad (3.4)$$

kondüktans ve suseptans değeridir.

Bu tezde, kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayarı ve TCSC'lerin tristör tetikleme açıları değişimine bağlı olarak empedanslarının da değişmesi sebebiyle, bara admitans matrisi oluşturulurken, bu elemanlara ait admitans değerlerinin tamamı, bara admitans matrisine dahil edilmemiş, sadece kademe ayarlı transformatörlerin seri admitans değeri bara admitans matrisine dahil edilmiştir. TCSC'ye ait admitans değeri ise sıfır alınmış, sadece TCSC'nin seri olarak bağlı olduğu hattın admitans değeri, bara admitans matrisine dahil edilmiştir. Böylelikle bara admitans matrisi, optimizasyon çalışması başında bir kere hesaplanarak, (kademe ayarlı transformatörün) kademe ve (TCSC'nin) tristör tetikleme açısı değişimi sebebiyle, her iterasyonda bara admitans matrisinin yeniden oluşturulması gerekliliği ortadan kaldırılmıştır. Kademe ayarlı transformatörlerin kademe değişimi nedeni ile değişen (seri ve şönt bağlı) admitans değerleri ve TCSC'lerin tetikleme açısı değişimi nedeni ile değişen admitans etkileri, hem bu elemanlara ilişkin p ve q eşitliklerine hem de Jacobian matriste ilgili satırlara direkt olarak aktarılmıştır. Bu nedenle, hem p ve q eşitliklerinde, hem de Jacobian matrise ilişkin denklemlerde,

kademe ayarlı transformatörlerin ve TCSC'lerin bağlı olduğu baralar ve bunların bağlı olmadığı baralara göre, farklı tiplerde eşitliklere ihtiyaç vardır.

Kademe ayarlı transformatörlerin ve TCSC'lerin bağlı olmadığı baralardan, AA hatlarına aktarılan kompleks güç değeri, (3.2) ve (3.3) eşitliği kullanılarak (3.1) eşitliği üzerinden;

$$\begin{aligned} \bar{s}_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) \\ + j v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) \quad (i = 1, \dots, n_b) \end{aligned} \quad (3.5)$$

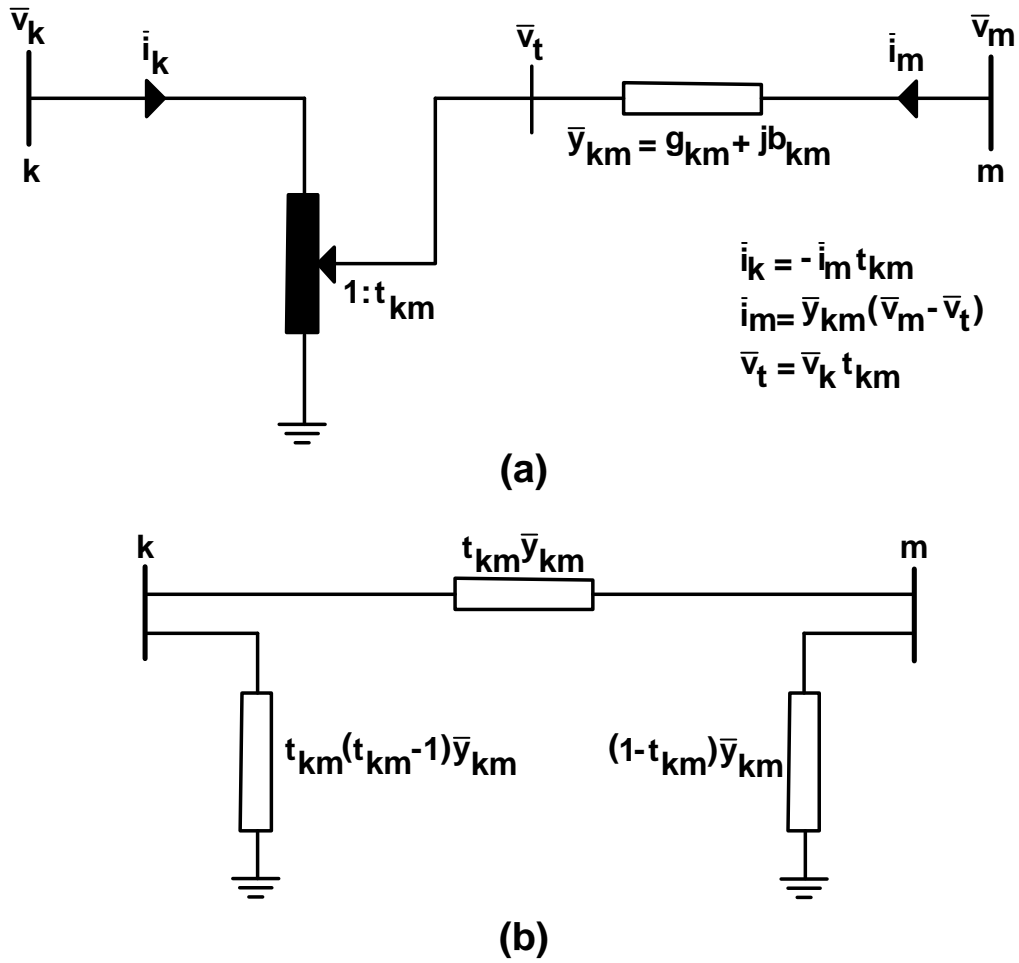
olarak yazılabilir. (3.5) eşitliğinde δ_{ij} , i. bara gerilim açısı değeri ile j. bara gerilim açısı değeri arasındaki fark olup;

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (3.6)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. (3.5) eşitliği, gerçel ve sanal kısımlarına ayrılırsa, i. baradan (bu baraya bağlı) AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri bulunabilir:

$$p_i = \text{Re} \left(\bar{s}_i \right) = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) \quad (3.7)$$

$$q_i = \text{Im} \left(\bar{s}_i \right) = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) \quad (3.8)$$



Şekil 3.1. Kademe Ayarlı Transformatör Modeli a)- Kademe Ayarlı Transformatör Gösterimi

b)- Kademe Ayarlı Transformatör Eşdeğer Devresi

Kademe ayarlı transformatör ve eşdeğer devresi Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Burada \bar{y}_{km} ; kademe ayarlı transformatöre ait seri admitansı, t_{km} ; kademe ayarlı transformatöre ait kademe ayar değerini, \bar{v}_k ; kademe ayarlı transformatörün girişinin bağlı olduğu kompleks bara gerilimini, \bar{v}_m ; kademe ayarlı transformatörün çıkışının bağlı olduğu kompleks bara gerilimini, \bar{i}_k ; kademe ayarlı transformatörün girişinin bağlı olduğu baradan transformatöre akan kompleks akımı, \bar{i}_m ; kademe ayarlı transformatörün çıkışının bağlı olduğu baradan transformatöre akan kompleks akımı ve \bar{v}_t ; kademe ayarlı transformatör kompleks ideal çıkış gerilimini göstermektedir. Literatürde, birçok çalışmada, kademe ayarlı transformatörlerin ideal olduğu kabul edilmektedir. Bu tezde Şekil 3.1' de gösterilen transformatör eşdeğer devresi esas

alınmıştır. Bu tip transformatörlerin (daha önce de belirtildiği gibi) transformatörün çevirme oranından bağımsız seri admitans değeri \bar{y}_{km} 'nin bara admitans matrisine dahil edilmesi fakat kademe ayar değeri ile değişen (transformatörün) diğer admitans değerlerinin ise p ve q eşitliklerine sokulması ile, k ve m baraları için bu baralara bağlı AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri;

$$\begin{aligned}
p_k &= v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \\
&+ v_k v_m t_{km} \left(g_{bara_{km}} \cos \delta_{km} + b_{bara_{km}} \sin \delta_{km} \right) \\
&+ v_k^2 \left[g_{bara_{kk}} - (t_{km}^2 - 1) g_{bara_{km}} \right]
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
q_k &= v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \\
&+ v_k v_m t_{km} \left(g_{bara_{km}} \sin \delta_{km} - b_{bara_{km}} \cos \delta_{km} \right) \\
&+ v_k^2 \left[-b_{bara_{kk}} + (t_{km}^2 - 1) b_{bara_{km}} \right]
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
p_m &= v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\
&+ v_m v_k t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} + b_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} \right) \\
&+ v_m^2 g_{bara_{mm}}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
q_m &= v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\
&+ v_m v_k t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} \right) \\
&- v_m^2 b_{bara_{mm}}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

olarak yazılabilir. Bir baraya birden fazla kademe ayarlı transformatörün bağlandığı durumlar olabilir. Aynı baraya N adet farklı kademe ayarlı transformatörlerin "girişlerinin" bağlanması durumunda (3.9) ve (3.10) eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
p_k &= v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \\
&+ v_k \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(g_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} \right) \\
&+ v_k^2 \left[g_{bara_{kk}} - \sum_{n=1}^N (t_{km_n}^2 - 1) g_{bara_{km_n}} \right]
\end{aligned} \tag{3.13}$$

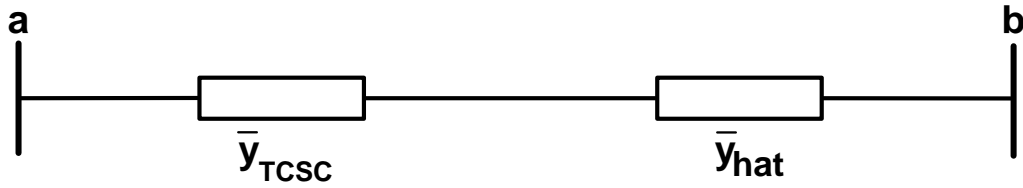
$$\begin{aligned}
q_k &= v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \\
&+ v_k \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(g_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} - b_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} \right) \\
&+ v_k^2 \left[-b_{bara_{kk}} + \sum_{n=1}^N (t_{km_n}^2 - 1) b_{bara_{km_n}} \right]
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Aynı baraya N adet farklı kademe ayarlı transformatörlerin "çıkışlarının" bağlanması durumunda (3.11) ve (3.12) eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
p_m &= v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k_1, k_2, \dots, k_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\
&+ v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} \right) \\
&+ v_m^2 g_{bara_{mm}}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
q_m &= v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k_1, k_2, \dots, k_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\
&+ v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} - b_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} \right) \\
&- v_m^2 b_{bara_{mm}}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

TCSC' nin seri bağlı olduğu iletim hattına ait eşdeğer devre gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir. Burada \bar{y}_{TCSC} ; TCSC' ye ait admitans değerini ve \bar{y}_{hat} ; iletim hattı seri admitans değerini göstermektedir. Daha önceden belirtildiği üzere, TCSC admitans değeri \bar{y}_{TCSC} ' nin bara admitans matrisine dahil edilmeden, sadece bağlı olduğu hattın seri admitans değerinin bara admitans matrisine dahil edilmesi durumu için;



Şekil 3.2. Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) ve Seri Bağlı Olduğu Hatta Ait Eşdeğer Devre Gösterimi

$$\bar{y}_{fark} = g_{TCSC} + jb_{TCSC} = \frac{(-y_{bara_{ab}})^2}{-y_{bara_{ab}} + \bar{y}_{TCSC}} \quad (3.17)$$

olarak gösterilmek üzere, a ve b baralarından bu baralara bağlı AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri;

$$p_a = v_a \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} \right) + v_a v_b \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ab} + b_{TCSC} \sin \delta_{ab} \right) - v_a^2 g_{TCSC} \quad (3.18)$$

$$q_a = v_a \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} \right) + v_a v_b \left(g_{TCSC} \sin \delta_{ab} - b_{TCSC} \cos \delta_{ab} \right) + v_a^2 b_{TCSC} \quad (3.19)$$

$$p_b = v_b \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} \right) + v_b v_a \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ba} + b_{TCSC} \sin \delta_{ba} \right) - v_b^2 g_{TCSC} \quad (3.20)$$

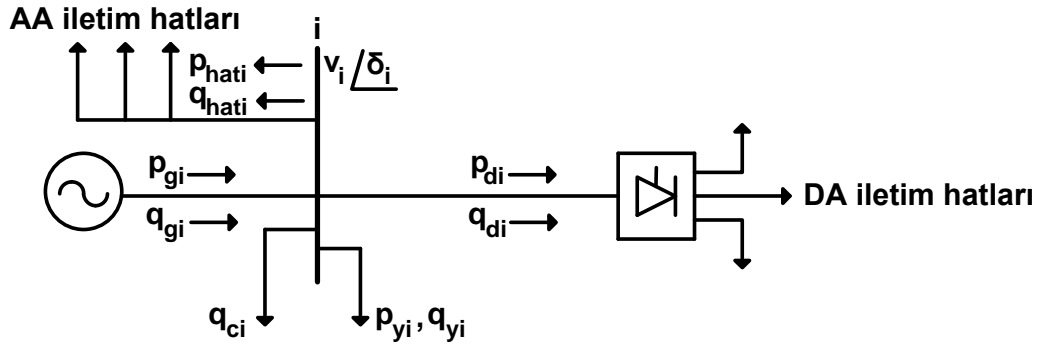
$$q_b = v_b \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} \right) + v_b v_a \left(g_{TCSC} \sin \delta_{ba} - b_{TCSC} \cos \delta_{ba} \right) + v_b^2 b_{TCSC} \quad (3.21)$$

eşitlikleri ile verilebilir. (3.18)-(3.21) eşitlikleri, TCSC' nin bulunduğu hatta ait baralara kademe ayarlı transformatörlerin bağlı olmadığı koşulu ile geçerlidir. Zira

bu tezdeki çalışmada incelenecek AA-DA test sistemi, söz konusu koşulu sağlamaktadır. Aksi durum için (3.18)-(3.21) eşitliklerinin düzenlenmesi gerekmektedir.

3.1.2. AA güç akışı hesaplamaları

Güç sistemlerinde, güç akışı algoritmasının tamamlanması, her bir baradaki aktif ve reaktif güç dengesinin sağlanması ile olur. AA-DA sistemine ait genel amaçlı bara gösterimi Şekil 3.3' te verilmiştir.



Şekil 3.3. AA-DA Sisteminde Genel Amaçlı Bara Gösterimi

Şekil 3.3' te P_{gi} , q_{gi} , P_{di} , q_{di} , P_{yi} , q_{yi} , q_{ci} , P_{hati} ve q_{hati} sırasıyla i. baraya bağlı, jeneratörün aktif gücünü, gerilim kontrollü kaynağın reaktif gücünü, DA çeviricinin aktif gücünü, DA çeviricinin reaktif gücünü, yükün aktif gücünü, yükün reaktif gücünü, şönt reaktif güç üreticinin reaktif gücünü, i. baradan bu baraya bağlı AA hatlarına aktarılan aktif gücü ve i. baradan bu baraya bağlı AA hatlarına aktarılan reaktif gücü göstermektedir. Şekil 3.3' te, i. bara için aktif ve reaktif güç dengesi;

$$P_{gi} = P_{yi} + P_{di} + P_{hati} \quad (3.22)$$

$$q_{gi} + q_{ci} = q_{yi} + q_{di} + q_{hati} \quad (3.23)$$

eşitliklerinin sağlanması ile mümkündür. (3.22) ve (3.23) eşitliklerinden, i. baradan AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri;

$$P_{hati} = P_{gi} - P_{yi} - P_{di} \quad (3.24)$$

$$q_{hati} = q_{gi} + q_{ci} - q_{yi} - q_{di} \quad (3.25)$$

eşitlikleri yardımı ile hesaplanır. Güç akışı çalışmasına ait algoritmanın sonlanabilmesi için, kontrol değişkenleri (u_{AA}) ve durum değişkenlerini (x_{AA}) içeren güç denklemlerinin;

$$p_i - p_{hati} = g_{pi}(x_{AA}, u_{AA}) = 0 \quad (i = 2, \dots, n_b) \quad (3.26)$$

$$q_i - q_{hati} = g_{qi}(x_{AA}, u_{AA}) = 0 \quad (i = n_g + 1, \dots, n_b) \quad (3.27)$$

eşitliklerini sağlaması gerekir. (3.26) eşitliğinde aktif güç dengesinin 1. bara haricindeki baralarda aranmasının sebebi, 1. baranın slack (salınım) bara olarak seçilmesidir. Salınım barasına ait jeneratörün üreteceği aktif güç değeri, güç akışı algoritması bitmeden bilinemez. (3.27) eşitliğindeki n_g ifadesi, sistemdeki gerilim kontrollü bara sayısını göstermektedir. Jeneratör, senkron kondenser ve STATCOM' un bağlı olduğu baralar gerilim kontrollü baralardır. (3.27) eşitliğinde reaktif güç dengesinin gerilim kontrollü baralar haricindeki baralarda aranmasının sebebi, gerilim kontrollü baralarda üretilecek reaktif gücün değerinin ancak güç akışı algoritması tamamlandıktan sonra bulunabilmesidir.

Yapılan AA güç akışı çalışması için, salınım barası dışında kalan baralardaki jeneratörlere ait aktif güç değerleri, gerilim kontrollü baralardaki gerilim genlik değerleri, tüm AA sisteminde kullanılan ve DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlere ait kademe ayar değerleri ve tüm TCSC' lere ait admitans değerleri, "kontrol değişkeni" olarak ele alınmıştır. Salınım barası haricindeki baralara ait gerilim açısı değerleri ile gerilim kontrollü baralar haricindeki baralara ait gerilim genlik değerleri ise "durum değişkeni" olarak alınmıştır:

$$x_{AA}^T = \left[\delta_2 \quad \delta_3 \quad \dots \quad \delta_{n_b} \quad v_{n_g+1} \quad v_{n_g+2} \quad \dots \quad v_{n_b} \right] \quad (3.28)$$

$$u_{AA}^T = \left[p_{g_2} \quad p_{g_3} \quad \dots \quad p_{g_{n_g}} \quad v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_{n_g} \quad t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_{n_t} \quad t_{d_1} \quad t_{d_2} \quad \dots \quad t_{d_{n_{td}}} \quad \bar{y}_{TCSC_1} \quad \bar{y}_{TCSC_2} \quad \dots \quad \bar{y}_{TCSC_{m_{TCSC}}} \right] \quad (3.29)$$

(3.29) eşitliğinde, t , n_t , n_{td} ve n_{TCSC} sırasıyla, kademe ayarlı transformatör kademe ayar değerini, AA sisteminde kullanılan kademe ayarlı transformatörlerin sayısını, DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin sayısını ve AA sisteminde kullanılan TCSC' lerin sayısını belirtmektedir.

(3.29) eşitliğinde değerleri bilinen kontrol değişkenleri kullanılarak, (3.28) eşitliği ile verilen durum değişken değerleri, Newton-Raphson yaklaşımı ile bulunabilir. $(k+1)$. iterasyona ait x_{AA} durum değişken değerleri, k . iterasyona ait verilerden faydalanılarak bulunabilir.

$$x_{AA}^{k+1} = x_{AA}^k - \left[J(x_{AA}^k, u_{AA}) \right]^{-1} \left[g(x_{AA}^k, u_{AA}) \right] \quad (3.30)$$

(3.30) eşitliğinde, J ; Jacobian matrisi ve $g(x_{AA}, u_{AA})$; (3.26) ve (3.27) eşitliği ile elde edilen sütun vektörü ifade etmektedir. (3.30) eşitliği (3.28) ve (3.29) eşitliğindeki durum ve kontrol değişkenleri cinsinden, daha açık şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ v \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ v \end{bmatrix}^k - \left[J(x_{AA}^k, u_{AA}) \right]^{-1} \begin{bmatrix} g_p(x_{AA}^k, u_{AA}) \\ g_q(x_{AA}^k, u_{AA}) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

J Jacobian matrisi, (3.26) ve (3.27) eşitlikleri ile verilen güç dengesi ifadelerinin, durum değişkenlerine göre türevlerinden oluşmaktadır. Jacobian matris (J_1, J_2, J_3 ve J_4 alt matrisler olmak üzere);

$$J(x, u) = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial \delta} & \frac{\partial p}{\partial v} \\ \frac{\partial q}{\partial \delta} & \frac{\partial q}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

olarak yazılır. (3.31) eşitliği daha detaylı biçimde aşağıdaki gibi de verilebilir:

$$\begin{bmatrix} \delta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_{nb} \\ v_{ng+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{nb} \end{bmatrix}_{(k+1)} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_{nb} \\ v_{ng+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{nb} \end{bmatrix}_{(k)} - \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{\partial \delta_2} & \cdot & \frac{\partial p_2}{\partial \delta_{nb}} & \frac{\partial p_2}{\partial v_{ng+1}} & \cdot & \frac{\partial p_2}{\partial v_{nb}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial p_{nb}}{\partial \delta_2} & \cdot & \frac{\partial p_{nb}}{\partial \delta_{nb}} & \frac{\partial p_{nb}}{\partial v_{ng+1}} & \cdot & \frac{\partial p_{nb}}{\partial v_{nb}} \\ \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial \delta_2} & \cdot & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial \delta_{nb}} & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial v_{ng+1}} & \cdot & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial v_{nb}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial q_{nb}}{\partial \delta_2} & \cdot & \frac{\partial q_{nb}}{\partial \delta_{nb}} & \frac{\partial q_{nb}}{\partial v_{ng+1}} & \cdot & \frac{\partial q_{nb}}{\partial v_{nb}} \end{bmatrix}_{(k)}^{-1} \begin{bmatrix} p_2 - (p_{g2} - p_{y2} - p_{d2}) \\ \cdot \\ \cdot \\ p_{nb} - (p_{gnb} - p_{ynb} - p_{dnb}) \\ q_{ng+1} - (q_{g(ng+1)} + q_{c(ng+1)} - q_{y(ng+1)} - q_{d(ng+1)}) \\ \cdot \\ \cdot \\ q_{nb} - (q_{gnb} + q_{cnb} - q_{ynb} - q_{dnb}) \end{bmatrix}_{(k)} \quad (3.33)$$

(3.32) eşitliği ile tanımlanan Jacobian matris elemanları, (3.7)–(3.21) eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Kademe ayarlı transformatörlerin ve TCSC'lerin bağlı olmadığı baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları (3.34)–(3.41) eşitlikleri ile bulunabilir:

$$\frac{\partial p_i}{\partial \delta_i} = J_1(i-1, i-1) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial \delta_j} = J_1(i-1, j-1) = v_i v_j \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial v_i} = J_2(i-1, i-n_g) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) + 2v_i g_{bara_{ii}} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial v_j} = J_2(i-1, j-n_g) = v_i \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \delta_i} = J_3(i-n_g, i-1) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \delta_j} = J_3(i-n_g, j-1) = -v_i v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial v_i} = J_4(i-n_g, i-n_g) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) - 2v_i b_{bara_{ii}} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial v_j} = J_4(i-n_g, j-n_g) = v_i \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) \quad (3.41)$$

Kademe ayarlı transformatörlerin bağlı olduğu fakat TCSC' lerin bağlı olmadığı baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları, (3.42)–(3.73) eşitlikleri ile bulunabilir. Bu eşitliklerde j alt indisi, kademe ayarlı transformatörün ya da transformatörlerin bağlı olduğu k ve m baraları "haricindeki" baraları ifade etmektedir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_k}{\partial \delta_k} = J_1(k-1, k-1) = & v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \\ & + v_k v_m t_{km} \left(-g_{bara_{km}} \sin \delta_{km} + b_{bara_{km}} \cos \delta_{km} \right) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Şayet k barasına N adet kademe ayarlı transformatörün "girişi" bağlı ise, (3.42) eşitliği yerine (3.43) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_k}{\partial \delta_k} = J_1(k-1, k-1) = v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \\ + v_k \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(-g_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} \right) \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial \delta_m} = J_1(k-1, m-1) = v_k v_m t_{km} \left(g_{bara_{km}} \sin \delta_{km} - b_{bara_{km}} \cos \delta_{km} \right) \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial \delta_j} = J_1(k-1, j-1) = v_k v_j \left(g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_m}{\partial \delta_m} = J_1(m-1, m-1) = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k}}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\ + v_m v_k t_{mk} \left(-g_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} + b_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} \right) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Şayet m barasına N adet kademe ayarlı transformatörün "çıkışı" bağlı ise, (3.46) eşitliği yerine (3.47) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_m}{\partial \delta_m} = J_1(m-1, m-1) = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k_1, k_2, \dots, k_N}}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\ + v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(-g_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} \right) \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \delta_k} = J_1(m-1, k-1) = v_m v_k t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} \right) \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \delta_j} = J_1(m-1, j-1) = v_m v_j \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_k}{\partial v_k} = J_2(k-1, k-n_g) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \\ + v_m t_{km} \left(g_{bara_{km}} \cos \delta_{km} + b_{bara_{km}} \sin \delta_{km} \right) \\ + 2v_k \left[g_{bara_{kk}} - (t_{km}^2 - 1) g_{bara_{km}} \right] \end{aligned} \quad (3.50)$$

Şayet k barasına, N adet kademe ayarlı transformatörün "girişi" bağlı ise, (3.50) eşitliği yerine (3.51) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_k}{\partial v_k} = J_2(k-1, k-n_g) = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \\ & + \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(g_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} \right) \\ & + 2v_k \left[g_{bara_{kk}} - \sum_{n=1}^N \left(t_{km_n}^2 - 1 \right) g_{bara_{km_n}} \right] \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial v_m} = J_2(k-1, m-n_g) = v_k t_{km} \left(g_{bara_{km}} \cos \delta_{km} + b_{bara_{km}} \sin \delta_{km} \right) \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial v_j} = J_2(k-1, j-n_g) = v_k \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_m}{\partial v_m} = J_2(m-1, m-n_g) = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\ & + v_k t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} + b_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} \right) \\ & + 2v_m g_{bara_{mm}} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Şayet m barasına, N adet kademe ayarlı transformatörün "çıkışı" bağlı ise, (3.54) eşitliği yerine (3.55) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_m}{\partial v_m} = J_2(m-1, m-n_g) = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k_1, k_2, \dots, k_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\ & + \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} \right) \\ & + 2v_m g_{bara_{mm}} \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial v_k} = J_2(m-1, k-n_g) = v_m t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} + b_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} \right) \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial v_j} = J_2(m-1, j-n_g) = v_m \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \quad (3.57)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_k}{\partial \delta_k} = J_3(k-n_g, k-1) = & v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \\ & + v_k v_m t_{km} \left(g_{bara_{km}} \cos \delta_{km} + b_{bara_{km}} \sin \delta_{km} \right) \end{aligned} \quad (3.58)$$

Şayet k barasına, N adet kademe ayarlı transformatörün "girişi" bağlı ise, (3.58) eşitliği yerine (3.59) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_k}{\partial \delta_k} = J_3(k - n_g, k - 1) = v_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \\ + v_k \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(g_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} \right) \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial \delta_m} = J_3(k - n_g, m - 1) = v_k v_m t_{km} \left(-g_{bara_{km}} \cos \delta_{km} - b_{bara_{km}} \sin \delta_{km} \right) \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial \delta_j} = J_3(k - n_g, j - 1) = v_k v_j \left(-g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_m} = J_3(m - n_g, m - 1) = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\ + v_m v_k t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} + b_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} \right) \end{aligned} \quad (3.62)$$

Şayet m barasına, N adet kademe ayarlı transformatörün "çıkışı" bağlı ise, (3.62) eşitliği yerine (3.63) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_m} = J_3(m - n_g, m - 1) = v_m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k_1, k_2, \dots, k_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\ + v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} \right) \end{aligned} \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \delta_k} = J_3(m - n_g, k - 1) = v_m v_k t_{mk} \left(-g_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} \right) \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \delta_j} = J_3(m - n_g, j - 1) = v_m v_j \left(-g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_k}{\partial v_k} = J_4(k - n_g, k - n_g) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \\ + v_m t_{km} \left(g_{bara_{km}} \sin \delta_{km} - b_{bara_{km}} \cos \delta_{km} \right) \\ + 2v_k \left[-b_{bara_{kk}} + (t_{km}^2 - 1)b_{bara_{km}} \right] \end{aligned} \quad (3.66)$$

Şayet k barasına, N adet kademe ayarlı transformatörün "girişi" bağlı ise, (3.66) eşitliği yerine (3.67) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_k}{\partial v_k} = J_4(k-n_g, k-n_g) = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \\ & + \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(g_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} - b_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} \right) \\ & + 2v_k \left[-b_{bara_{kk}} + \sum_{n=1}^N (t_{km_n}^2 - 1) b_{bara_{km_n}} \right] \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial v_m} = J_4(k-n_g, m-n_g) = v_k t_{km} \left(g_{bara_{km}} \sin \delta_{km} - b_{bara_{km}} \cos \delta_{km} \right) \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial v_j} = J_4(k-n_g, j-n_g) = v_k \left(g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial v_m} = J_4(m-n_g, m-n_g) = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\ & + v_k t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} \right) \\ & - 2v_m b_{bara_{mm}} \end{aligned} \quad (3.70)$$

Şayet m barasına, N adet kademe ayarlı transformatörün "çıkışı" bağlı ise, (3.70) eşitliği yerine (3.71) eşitliği yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial v_m} = J_4(m-n_g, m-n_g) = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m, k_1, k_2, \dots, k_N}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\ & + \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} - b_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} \right) \\ & - 2v_m b_{bara_{mm}} \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial v_k} = J_4(m-n_g, k-n_g) = v_m t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} \right) \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial v_j} = J_4(m-n_g, j-n_g) = v_m \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \quad (3.73)$$

TCSC'lerin bağlı olduğu fakat kademe ayarlı transformatörlerin bağlı olmadığı baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları (3.74)–(3.97) eşitlikleri ile bulunabilir. Bu eşitliklerde j alt indisi, TCSC' nin bağlı olduğu a ve b baraları "haricindeki" baraları ifade etmektedir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_a}{\partial \delta_a} = J_1(a-1, a-1) &= v_a \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} \right) \\ &+ v_a v_b \left(-g_{TCSC} \sin \delta_{ab} + b_{TCSC} \cos \delta_{ab} \right) \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_a}{\partial \delta_b} = J_1(a-1, b-1) &= v_a v_b \left(g_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab} - b_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab} \right) \\ &+ v_a v_b \left(g_{TCSC} \sin \delta_{ab} - b_{TCSC} \cos \delta_{ab} \right) \end{aligned} \quad (3.75)$$

$$\frac{\partial p_a}{\partial \delta_j} = J_1(a-1, j-1) = v_a v_j \left(g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} \right) \quad (3.76)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_b}{\partial \delta_b} = J_1(b-1, b-1) &= v_b \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} \right) \\ &+ v_b v_a \left(-g_{TCSC} \sin \delta_{ba} + b_{TCSC} \cos \delta_{ba} \right) \end{aligned} \quad (3.77)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_b}{\partial \delta_a} = J_1(b-1, a-1) &= v_b v_a \left(g_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba} - b_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba} \right) \\ &+ v_b v_a \left(g_{TCSC} \sin \delta_{ba} - b_{TCSC} \cos \delta_{ba} \right) \end{aligned} \quad (3.78)$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial \delta_j} = J_1(b-1, j-1) = v_b v_j \left(g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} \right) \quad (3.79)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_a}{\partial v_a} = J_2(a-1, a-n_g) &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} \right) \\ &+ v_b \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ab} + b_{TCSC} \sin \delta_{ab} \right) \\ &+ 2v_a \left(g_{bara_{aa}} - g_{TCSC} \right) \end{aligned} \quad (3.80)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_a}{\partial v_b} = J_2(a-1, b-n_g) &= v_a \left(g_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab} + b_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab} \right) \\ &+ v_a \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ab} + b_{TCSC} \sin \delta_{ab} \right) \end{aligned} \quad (3.81)$$

$$\frac{\partial p_a}{\partial v_j} = J_2(a-1, j-n_g) = v_a \left(g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} \right) \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_b}{\partial v_b} = J_2(b-1, b-n_g) &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} \right) \\ &+ v_a \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ba} + b_{TCSC} \sin \delta_{ba} \right) \\ &+ 2v_b \left(g_{bara_{bb}} - g_{TCSC} \right) \end{aligned} \quad (3.83)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_b}{\partial v_a} = J_2(b-1, a-n_g) &= v_b \left(g_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba} + b_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba} \right) \\ &+ v_b \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ba} + b_{TCSC} \sin \delta_{ba} \right) \end{aligned} \quad (3.84)$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial v_j} = J_2(b-1, j-n_g) = v_b \left(g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} \right) \quad (3.85)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_a}{\partial \delta_a} = J_3(a-n_g, a-1) &= v_a \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} \right) \\ &+ v_a v_b \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ab} + b_{TCSC} \sin \delta_{ab} \right) \end{aligned} \quad (3.86)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_a}{\partial \delta_b} = J_3(a-n_g, b-1) &= -v_a v_b \left(g_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab} + b_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab} \right) \\ &- v_a v_b \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ab} + b_{TCSC} \sin \delta_{ab} \right) \end{aligned} \quad (3.87)$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial \delta_j} = J_3(a-n_g, j-1) = -v_a v_j \left(g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} \right) \quad (3.88)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_b}{\partial \delta_b} = J_3(b-n_g, b-1) &= v_b \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} \right) \\ &+ v_b v_a \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ba} + b_{TCSC} \sin \delta_{ba} \right) \end{aligned} \quad (3.89)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_b}{\partial \delta_a} = J_3(b-n_g, a-1) &= -v_b v_a \left(g_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba} + b_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba} \right) \\ &- v_b v_a \left(g_{TCSC} \cos \delta_{ba} + b_{TCSC} \sin \delta_{ba} \right) \end{aligned} \quad (3.90)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial \delta_j} = J_3(b-n_g, j-1) = -v_b v_j \left(g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} \right) \quad (3.91)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_a}{\partial v_a} = J_4(a-n_g, a-n_g) &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} \right) \\ &+ v_b \left(g_{TCSC} \sin \delta_{ab} - b_{TCSC} \cos \delta_{ab} \right) \\ &- 2v_a \left(b_{bara_{aa}} - b_{TCSC} \right) \end{aligned} \quad (3.92)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_a}{\partial v_b} = J_4(a-n_g, b-n_g) &= v_a \left(g_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab} - b_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab} \right) \\ &+ v_a \left(g_{TCSC} \sin \delta_{ab} - b_{TCSC} \cos \delta_{ab} \right) \end{aligned} \quad (3.93)$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial v_j} = J_4(a-n_g, j-n_g) = v_a \left(g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} \right) \quad (3.94)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_b}{\partial v_b} = J_4(b-n_g, b-n_g) &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j (g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj}) \\ &+ v_a (g_{TCSC} \sin \delta_{ba} - b_{TCSC} \cos \delta_{ba}) \\ &- 2v_b (b_{bara_{bb}} - b_{TCSC}) \end{aligned} \quad (3.95)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_b}{\partial v_a} = J_4(b-n_g, a-n_g) &= v_b (g_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba} - b_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba}) \\ &+ v_b (g_{TCSC} \sin \delta_{ba} - b_{TCSC} \cos \delta_{ba}) \end{aligned} \quad (3.96)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial v_j} = J_4(b-n_g, j-n_g) = v_b (g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj}) \quad (3.97)$$

İteratif olarak devam eden güç akışı algoritması, her iterasyon sonunda (3.30) eşitliği ile elde edilen son durum değişkenleri ile bir önceki iterasyona ait durum değişkenleri arasındaki farkın belli bir tolerans değerinden küçük ya da eşit olma durumuna kadar devam eder:

$$x_{AA}^{k+1} - x_{AA}^k \leq \varepsilon_{AA} \quad (3.98)$$

(3.98) ifadesi sağlandığında, (3.26) ve (3.27) eşitlikleri de sağlanmış olur. Güç akışı algoritması tamamlandıktan sonra, bilinmeyen salınım barasına ait kaynakların ürettiği aktif güç değeri ile gerilim kontrollü baralara ait kaynakların ürettiği reaktif güç değerleri bulunabilir. Tüm kontrol ve durum değişkenleri bilindiğine göre, salınım barasından AA hatlarına aktarılan aktif güç değeri p_1 , salınım barasının bağlanma durumuna göre, (3.7), (3.9), (3.11), (3.13), (3.15), (3.18) veya (3.20) eşitlikleri ile tespit edilebilir. Salınım barasına ait jeneratörün üretmesi gereken aktif güç değeri ise (3.22) eşitliği kullanılarak tespit edilebilir:

$$p_{g_i} = p_1 + p_{y_i} + p_{d_i} \quad (3.99)$$

i numaralı gerilim kontrollü baradan AA hatlarına aktarılan reaktif güç değeri q_i , bu baraların bağlantı durumlarına göre; (3.8), (3.10), (3.12), (3.14), (3.16), (3.19) veya (3.21) eşitlikleri ile hesaplanabilir. Gerilim kontrollü baralara ait kaynakların ürettiği reaktif güç değeri, (3.23) eşitliği kullanılarak tespit edilebilir:

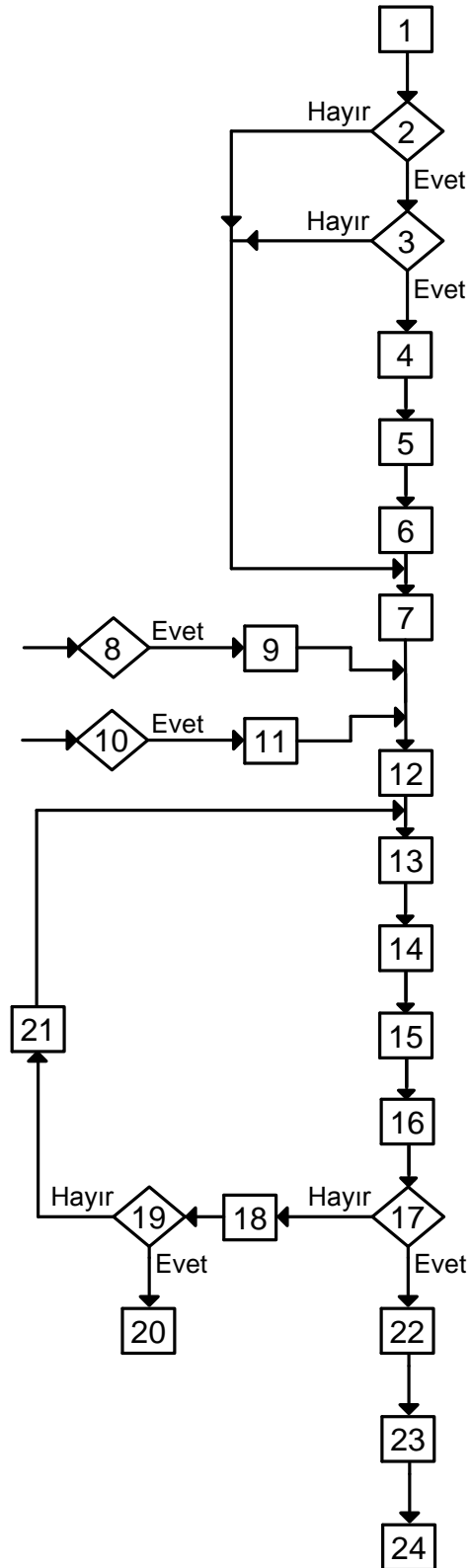
$$q_{g_i} = q_i + q_{y_i} + q_{d_i} - q_{c_i} \quad (3.100)$$

STATCOM' a ait evirici gerilim değeri V_{VSC} ve bu gerilim açısı değeri δ_{VSC} , güç akışı sonunda tespit edilebilir. Bu konu ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.1' de verilmiştir.

Bölüm 2.2' de bahsedildiği gibi TCSC' ye ait tristör tetikleme açısı ise güç akışı sonunda tespit edilebilir.

3.1.3. AA güç akışı algoritması

Bu bölümde, eşitlikleri ve hesaplamaları Bölüm 3.1.1 ve Bölüm 3.1.2'de detaylı olarak verilen, optimal güç akışı hesabında kullanılan ayrık AA-DA güç akışı algoritmasının bir parçası olan AA güç akışı yaklaşımına ait algoritma, Şekil 3.4' te gösterilen işaret akış şeması üzerinden detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.4. Optimal Güç Akışı Hesabında Kullanılan AA-DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası
Olarak Önerilen AA Güç Akışı Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması

Adım 1. AA-DA güç akışı algoritması başlangıcında belirlenen AA kontrol değişkenlerini ve DA kontrol değişkenlerini (sabit aktif güç modunda çalışacak çeviricilere ait aktif güç değerleri) okuyarak algoritmaya başla.

Adım 2. İlk optimizasyon algoritması iterasyonu mu?

Adım 3. İlk AA-DA güç akışı algoritması mı?

Adım 4. Data dosyasından AA güç akışı yakınsama tolerans değerini oku ve hafızaya al.

Adım 5. Data dosyasından AA hatlarına ait seri ve şönt admitans değerlerini, yük baralarına ait aktif ve reaktif güç değerlerini oku ve hafızaya al.

Adım 6. Bara admitans matrisi y_{bara} 'yı oluştur ve hafızaya al.

Adım 7. Sabit aktif güç modunda çalışmayacak çeviricilere ait aktif güç ve tüm çeviricilere ait reaktif güç değerleri için tahminde bulun. Çeviricilere ait kademe ayarlı transformatör kademe ayar değerlerini data dosyasında belirtilen alt sınır değerleri olarak ayarla.

Adım 8. AA-DA güç akışı algoritmasına ait ilk iterasyon tamamlandı mı?

Adım 9. AA-DA güç akışı algoritmasından gelen tüm çevirici aktif ve reaktif güç değerleri ile çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin güncellenmiş kademe ayar değerlerini yeni değerler olarak ata.

Adım 10. AA-DA güç akışı algoritmasına ait ilk iterasyon tamamlandı mı?

Adım 11. AA-DA güç akışı algoritmasından gelen tüm çeviricilere ait aktif ve reaktif güç değerlerini yeni değerler olarak ata.

Adım 12. AA durum değişkenleri için tahminde bulun ve iterasyona başla ($ite_{AA} = 1$).

Adım 13. Salınım barası haricindeki baralaradan tüm AA hatlarına aktarılan aktif güçleri (p_i), bu baraların bağlanma durumuna göre (3.7), (3.9), (3.11), (3.13), (3.15), (3.18) veya (3.20) eşitlikleri ile bul. Gerilim kontrollü baralar haricindeki baralaradan tüm AA hatlarına aktarılan reaktif güçleri (q_i) bu baraların bağlanma durumuna göre (3.8), (3.10), (3.12), (3.14), (3.16), (3.19) veya (3.21) eşitlikleri ile bul.

Adım 14. (3.26) ve (3.27) eşitliklerini hesapla.

Adım 15. (3.34)-(3.97) eşitliklerini kullanarak Jacobian matrisi hesapla.

Adım 16. (3.30) eşitliği ile yeni durum değişkenlerini bul.

Adım 17. (3.98) eşitsizliğinin durumunu araştır.

Adım 18. İterasyon sayısını arttır ($ite_{AA} = ite_{AA} + 1$).

Adım 19. İterasyon sayısının limit değerini aşma durumunu araştır ($ite_{AA} > ite_{AA}^{max}$).

Adım 20. AA-DA güç akışını sonlandır ve optimizasyon algoritmasına dön.

Adım 21. Adım 16' de elde edilen yeni durum değişkenleri ile Adım 13' e git ve algoritmaya yeniden başla.

Adım 22. AA güç akışı algoritması sona erdi.

Adım 23. Bilinmeyen değerleri hesapla.

Adım 24. Tüm verilerle DA güç akışı algoritmasına git.

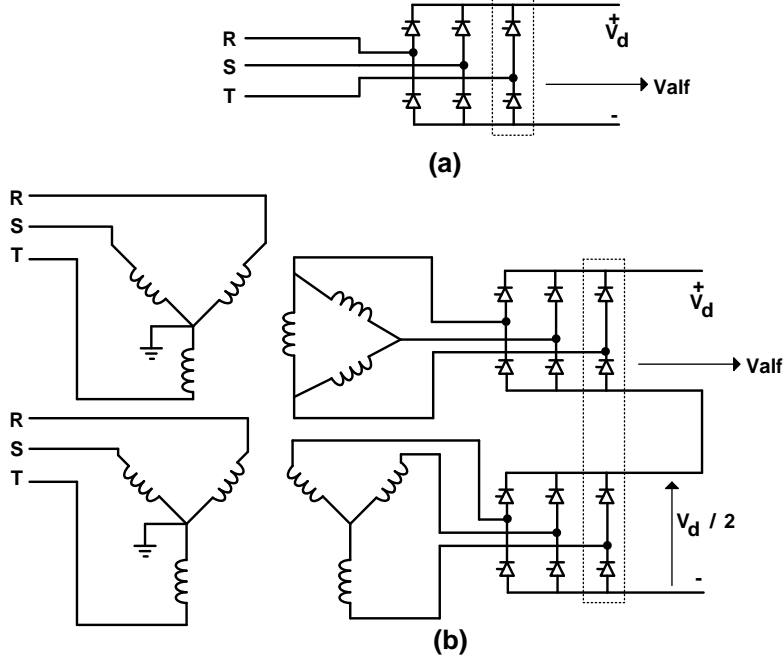
Adım 19' da yapılan işlemlerle, AA güç akışının ıraksamaya gitmesi durumunda, optimizasyon algoritmasının problemlerini iterasyonu atlanır. AA güç akışı algoritmasının maksimum iterasyon sayısını aşması durumunda AA-DA güç akışı algoritması yakınsama sağlanamadan sonlanır. Bu ise AA-DA güç akışına ilişkin yeni iterasyon sonuçlarının elde edilememesi anlamına gelir. Bu problem, AA güç akışı algoritmasının 20. adımı üzerinden optimizasyon algoritmasına dönülüp jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybı için rastgele (nispeten çok büyük) değerler verilerek aşılır. Bu işlemin arka planı Bölüm 4' te YAK algoritması ve GA ile AA-DA optimal güç akışı hesaplamaları anlatılırken açıklanacaktır.

3.2. Ayrık AA–DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası Olarak Önerilen DA Güç Akışı Yaklaşımı

Bu bölümün başında da belirtildiği üzere, çeviricilere ait denklemlerde, güç akışı işlemleri boyunca, AA büyüklüklerinin sadece ana harmonik bileşenlerinin göz önüne alındığı, ana harmonik bileşenlerin dengeli olduğu, DA değişkenlerinde dalgalılık olmadığı, çeviricilerde kullanılan güç elektroniği anahtarlama elemanlarının ideal olduğu (çevirici kayıplarının oluşmadığı) kabul edilmiştir. DA güç akışı çalışması, tek kutuplu çok uçlu DA sistemi için yapılmıştır.

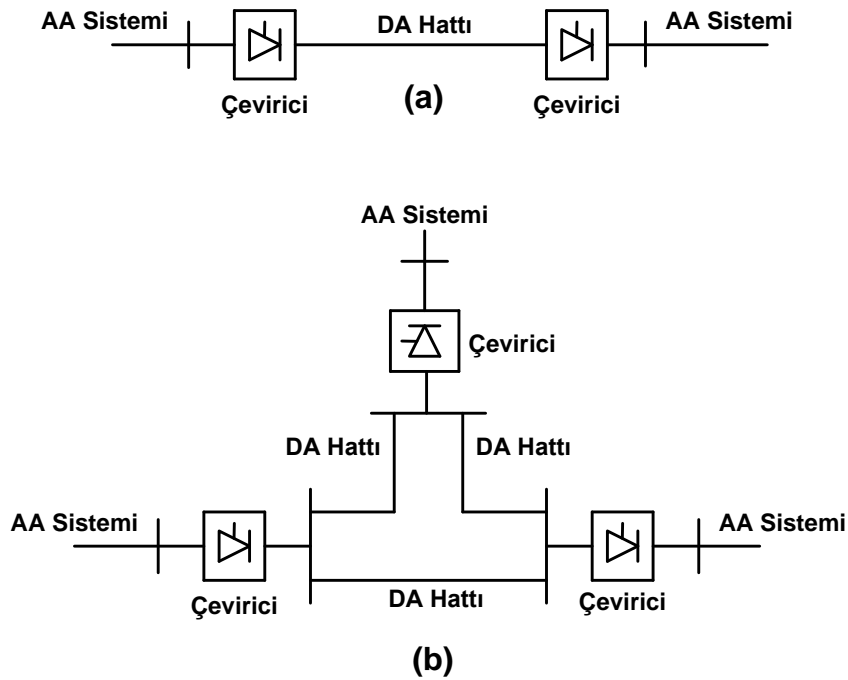
3.2.1. DA güç akışı eşitlikleri

DA iletim sistemlerinin en temel iki elemanı çeviriciler ve DA hatlarıdır. Çeviriciler yardımıyla AA ve DA sistemi arasında alış verişi yapılan enerji, DA hatları ile iletilir. Bu çalışmada çevirici, tam dalga tam kontrollü doğrultucudan oluşmaktadır. Kontrollü doğrultucu, uygun şekilde kontrol edilerek evirici modunda çalıştırılabilir. Çevirici doğrultucu modunda çalışırken, bağlı olduğu AA barasından çektiği aktif gücü bağlı olduğu DA hatlarına iletir. Evirici modunda ise, çevirici bağlı olduğu DA hatlarından çektiği aktif gücü AA sistemine aktarır. Çevirici ister doğrultucu isterse de evirici modda çalışsın, ihtiva ettiği güç elektroniği anahtarlama elemanlarının yapısında bulunan jonksiyon kapasiteleri sebebiyle AA sisteminden endüktif reaktif güç çeker. Çeviriciler, genellikle 6-darbeli ya da 6-darbeli doğrultucuların uygun şekilde bağlanmasıyla, 12-darbeli, 24-darbeli veya 48-darbeli olarak çalıştırılabilmektedir. Çevirici darbe sayısı artırılarak, çevirici çıkış gerilimi dalgalılık katsayısı en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Şekil 3.5(a)' da 6-darbeli çevirici ve Şekil 3.5(b)' de ise çıkışları seri bağlı 2 adet 6-darbeli çeviriciden oluşturulmuş 12-darbeli çevirici yapısı gösterilmiştir.



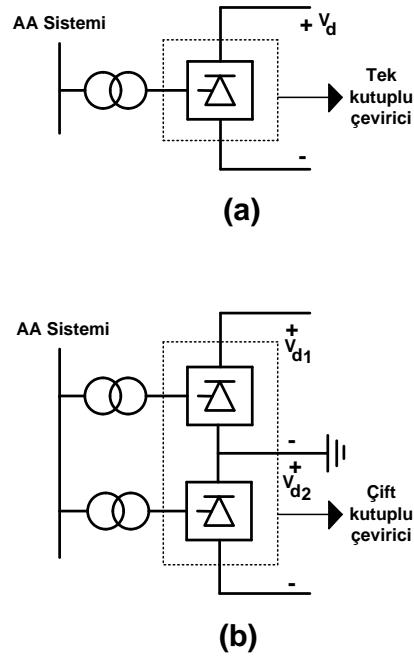
Şekil 3.5. DA Çevirici Yapısı a)- 6-darbeli çevirici b)- 12-darbeli çevirici

Doğru akım dağıtım sistemi iki farklı yapıda tasarlanabilir: radyal şebeke ve ağ şebeke. Şekil 3.6' dan görüleceği üzere radyal şebekeler, iki uçlu DA sistemini oluştururlar. Bu sistemde tek bir DA iletim hattı ve iki adet çevirici bulunur. Çeviricilerden biri doğrultucu olarak çalışırken, diğeri evirici olarak çalışır ve enerji akışı tek yönlüdür. Ağ şebekeler ise çok uçlu DA sisteminden oluşurlar. Bu sistemlerde enerji akış yönü için (radyal şebekelerden farklı olarak) birden fazla seçenek bulunmaktadır. Böylelikle daha esnek bir güç akışı sağlanır.



Şekil 3.6. DA Şebeke Yapıları a)- radyal şebekeli DA sistemi b)- ağ şebekeli DA sistemi

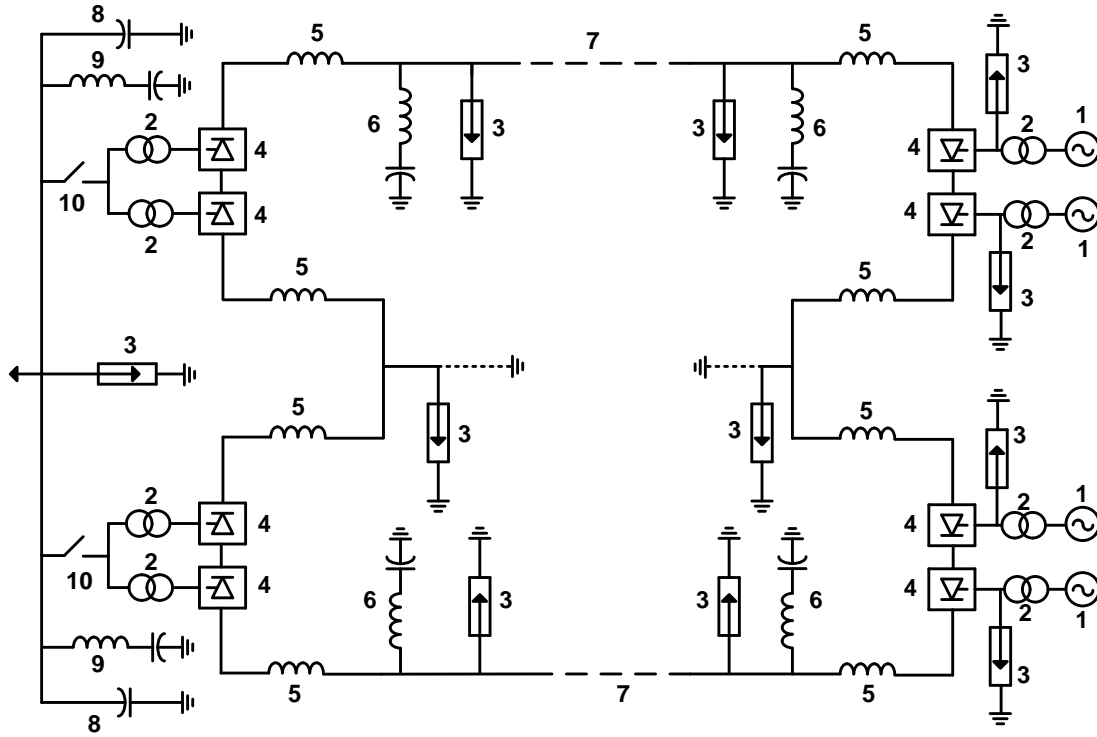
DA çeviriciler tek kutuplu ve çift kutuplu olarak tasarlanırlar. Tek kutuplu ve çift kutuplu DA çevirici sistem modeli Şekil 3.7' de verilmiştir. Şekil 3.7' den görüleceği



Şekil 3.7. DA Çevirici Sistem Modeli a)- tek kutuplu DA çevirici sistem modeli b)- çift kutuplu DA çevirici sistem modeli

üzere, çift kutuplu bir çevirici, iki adet tek kutuplu çeviricinin seri bağlanması ile oluşturulur. İki çeviricinin birbirlerine bağlantı noktası nötr noktası olarak isimlendirilir ve genellikle topraklanır. Birden fazla çift kutuplu çeviricilerin DA hattı ile oluşturdukları yapılarda bu toprak uçları birleştirilir. Toprak ucu çift kutuplu çalışmada akım dönüşü yoludur. Bu yol, çeviricilerin uygun kontrolü ile sürekli olarak ya da acil durumlarda geçici olarak kullanılır. Toprak uçları metalik bağlantı ile olduğu gibi toprak üzerinden de bağlanır. Toprak üzerinden tamamlanan dönüş yolu metalik bağlantı ile olana göre oldukça düşük dirence sahiptir.

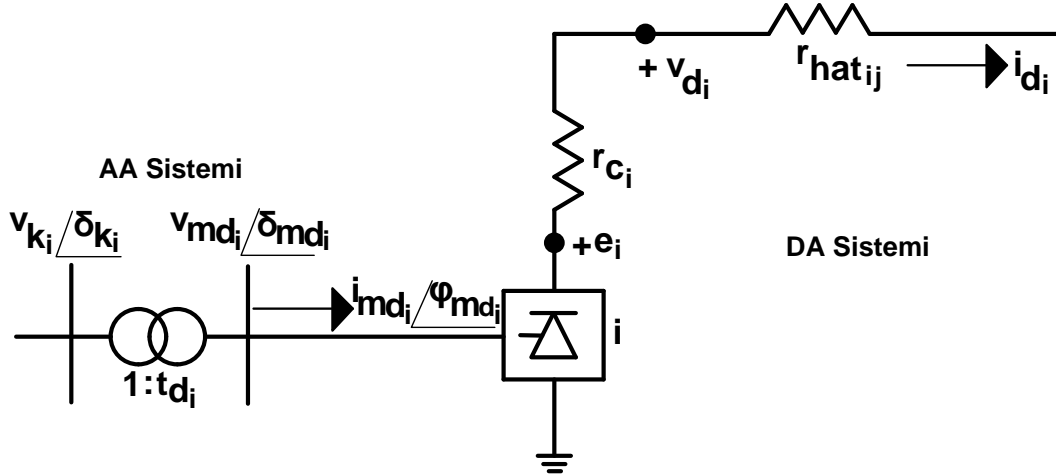
Pratikte DA çevirici istasyonları, çeviriciler ve DA hatlarından başka birçok kontrol ve koruma elemanı ihtiva ederler. Şekil 3.8' de biri jeneratör barasına diğeri yük barasına bağlı, çift kutuplu iki uçlu bir DA sistemine ait iki çevirici istasyon şeması verilmiştir.



Şekil 3.8. Biri Doğrultucu Diğeri Evirici Olarak Çalışan İki Çevirici İstasyon Şeması [91]

- 1)- jeneratör 2)- çevirici kademe ayarlı transformatörü 3)- parafudr 4)- çevirici 5)- reaktör
6)- filtre 7)- DA hattı 8)- şönt kapasitör 9)- AA filtresi 10)- kesici

Tek kutuplu DA çeviricisine ait eşdeğer devresi Şekil 3.9' da verilmiştir. Burada e_i , v_{d_i} , i_{d_i} , r_{c_i} , $r_{hat_{ij}}$, t_{d_i} , v_{kd_i} , v_{md_i} , i_{md_i} , δ_{kd_i} , δ_{md_i} ve φ_{md_i} sırasıyla, i. çevirici açık devre doğru gerilim değerini, i. çevirici uç çıkış doğru gerilim değerini, i. çevirici doğru akım değerini, i. çevirici komutasyon direnç değerini, i. çevirici ile j. çevirici arasındaki DA hat direnç değerini, i. çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör kademe ayar değerini, i. çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör girişi alternatif gerilim değerini, i. çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışı alternatif gerilim değerini, i. çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışından çeviriciye akan AA değerini, i. çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör girişi alternatif gerilim açısı değerini, i. çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışı alternatif gerilim açısı değerini ve i. çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışından çeviriciye akan AA açısı değerini göstermektedir.



Şekil 3.9. Tek Kutuplu DA Çeviricisine Ait Eşdeğer Devre Gösterimi

Bölüm 3.1’ de açıklandığı üzere, kademe ayarlı transformatörün gerçek eşdeğer devre modeli kullanıldığında, transformatörün giriş ve çıkışı ayrı bir AA barası olarak ele alınır. Bu sebeple, Şekil 3.9’ a dikkat edilecek olursa, çeviriciye ait kademe ayarlı transformatörün çıkışı ayrı bir AA barası olarak gösterilmiştir. Çeviriciye ait kademe ayarlı transformatörü ideal kabul eden DA güç akışı çalışmalarında, transformatör çıkışı ayrı bir bara olarak ele alınmaz. Bu sebeple, literatürde çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin ideal kabul edildiği çalışmalarda kullanılan test sistemleri, çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek eşdeğer devrelerinin göz önüne alındığı (bu tezdeki gibi) çalışmada kullanıldığında, AA bara sayısı, çevirici sayısı kadar artacaktır.

DA güç akışı eşitliklerini vermeden önce DA büyüklere ait birim değerlerin AA büyüklüklere ait birim değerler ile ilişkisinin verilmesi uygun olacaktır. AA sistemi için baz güç olarak $P_{AA_{baz}}$ ve baz gerilim olarak $V_{AA_{baz}}$ (faz arası etkin değer) seçilirse, baz akım ve baz empedans değerleri;

$$I_{AA_{baz}} = \frac{P_{AA_{baz}}}{\sqrt{3}V_{AA_{baz}}} \quad (3.101)$$

$$Z_{AA_{baz}} = \frac{V_{AA_{baz}}}{\sqrt{3}I_{AA_{baz}}} \quad (3.102)$$

olacaktır. DA sistemi için baz güç olarak $P_{DA_{baz}}$ ve baz gerilim olarak $V_{DA_{baz}}$ (çevirici uç çıkış doğru gerilim değeri) seçilmiştir. $P_{DA_{baz}}$ değeri ve $P_{AA_{baz}}$ değeri eşit alınmıştır.

$$P_{AA_{baz}} = P_{DA_{baz}} \quad (3.103)$$

Bu şartlar altında DA sistemine ait baz gerilim değeri, AA sistemi baz gerilim değeri cinsinden;

$$V_{DA_{baz}} = K_{baz} V_{AA_{baz}} \quad (3.104)$$

olarak yazılabilir. (3.104) eşitliğinde K_{baz} dönüşüm katsayısı, n_{cs} seri bağlı 6-darbeli çevirici sayısını göstermek üzere;

$$K_{baz} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_{cs} \quad (3.105)$$

olarak yazılabilir. DA sistemine ait baz akım ve baz empedans değerleri AA baz değerleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_{DA_{baz}} = \frac{\sqrt{3} I_{AA_{baz}}}{K_{baz}} \quad (3.106)$$

$$Z_{DA_{baz}} = K_{baz}^2 Z_{AA_{baz}} \quad (3.107)$$

DA sistemine ait büyüklükler Şekil 3.9 yardımı ile hesaplanabilir. Çevirici açık devre doğru gerilimi;

$$e_i = v_{md_i} \cos \theta_i \quad (3.108)$$

olarak yazılabilir. (3.108) ifadesinde θ_i ; (doğrultucu modunda çalışan i. çevirici için) anahtar tetikleme açısı α_{d_i} ' yi, veya (evirici modunda çalışan i. çevirici için) toparlanma (extinction, recovery) açısı γ_{d_i} ' yi ifade etmektedir. (3.108) eşitliğinde kullanılan θ_i açısı içine, literatürdeki genel eğilime uyularak, komutasyon açı etkisi dahil edilmemiştir.

Çevirici uç çıkış doğru gerilim değeri;

$$v_{d_i} = e_i - r_{c_i} i_{d_i} \quad (3.109)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Çevirici komutasyon direnci r_c , doğrultucu ve evirici modu için işaret değiştirir. Doğrultucu modu için r_c pozitif değer alırken, evirici modu için negatif değer alır. Çevirici uç çıkış doğru gerilim değeri aynı zamanda;

$$v_{d_i} = v_{md_i} \cos \phi_{md_i} \quad (3.110)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. (3.110) ifadesinde ϕ_{md_i} ; çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışı alternatif gerilim açısı değeri ile çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışı AA açısı değeri arasındaki farkı göstermektedir:

$$\phi_{md_i} = \delta_{md_i} - \varphi_{md_i} \quad (3.111)$$

(3.111) eşitliği ile elde edilen ϕ_{md_i} açısı, (3.110) eşitliği kullanılarak;

$$\phi_{md_i} = \arccos \left(\frac{v_{d_i}}{v_{md_i}} \right) \quad (3.112)$$

ifadesiyle de hesaplanabilir.

Çeviricinin AA sisteminden çektiği aktif güç değeri;

$$P_{d_i} = v_{d_i} i_{d_i} \quad (3.113)$$

formülü ile hesaplanabilir. Daha önceden bahsedildiği üzere, r_c komutasyon direnç değeri, doğrultucu ve evirici modunda işaret değiştirir. Bu durum, çevirici doğru akım değerinin işaret değiştirmesine neden olur. Doğrultucu modunda, çevirici doğru akımı, çeviriciden DA sistemine doğru akar ve işareti pozitiftir. Evirici modunda ise çevirici doğru akımı, DA sisteminden çeviriciye doğru akar ve işareti negatiftir. Çevirici çıkışı doğru gerilim değeri sürekli pozitif değerde olduğundan, (3.113) eşitliğinden görüleceği üzere, çevirici doğrultucu modunda çalışırken AA sisteminden aktif güç çeker, evirici modunda ise AA sistemine aktif güç verir.

Çeviricinin AA sisteminden çektiği reaktif güç değeri;

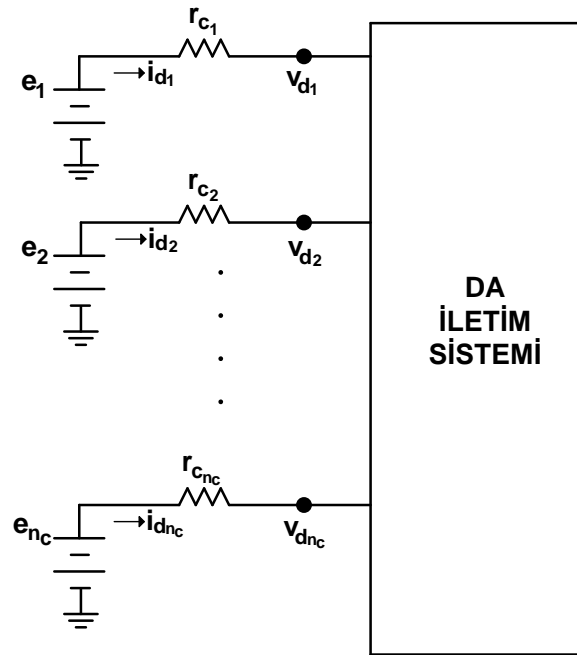
$$q_{d_i} = \left| P_{d_i} \tan \phi_{md_i} \right| \quad (3.114)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. (3.114) eşitliğinden görüleceği üzere, ister doğrultucu modunda, isterse de evirici modunda çalışsın, AA sisteminden çevirici daima endüktif reaktif güç çeker. Çekilen bu reaktif güç, daha önceden belirtildiği üzere,

çeviriciye ait güç elektroniği anahtarlama elemanlarının jonksiyon kapasiteleri tarafından kullanılır.

3.2.2. DA güç akışı hesaplamaları

Tek kutuplu çok uçlu DA sistemlerinde yapılacak güç akışı çalışması için sistem modeline ihtiyaç vardır. Şekil 3.9' da verilen tek kutuplu çevirici modelinden faydalanarak elde edilen tek kutuplu çok uçlu DA sistem modeli Şekil 3.10' da gösterilmiştir. Ele alınan sistem modelinde, çeviriciye seri bağlı süzme reaktörünün direnç değerinin sıfır olduğu ve çeviricinin topraklama direncinin olmadığı kabul edilmiştir.



Şekil 3.10. Tek Kutuplu Çok Uçlu DA Sistem Modeli

Şekil 3.10' da verilen DA sistemine ait çevirici çıkışı doğru gerilim değerleri ve çevirici akımları, düğüm gerilimleri yöntemi ile hesaplanabilir. Kaynak gerilimi olarak e_i ; çevirici açık devre gerilim değeri alınması durumunda (r_{c_i}) komutasyon direnç değerlerinin, DA sistemine ait bara admitans matrisine ($y_{d_{bara}}$) dahil edilmesi gerekmektedir. DA güç akışı algoritmasına ait iterasyonlarda, çeviricilerin çalışma

modunun değişmesi durumunda (doğrultucu modundan evirici moduna geçiş ya da tersi), komutasyon dirençleri işaret değiştireceğinden, DA bara admitans matrisinin yeniden oluşturulması gerekecektir. Bu durum algoritma süresinin uzamasına neden olacaktır. Kaynak gerilimi olarak çevirici ucu çıkış doğru gerilim değerleri (v_{d_i}) seçilirse, komutasyon dirençlerinin bara admitans matrisine sokulması gerekmez. 1. çevirici çıkışı doğru gerilim değeri referans bara olarak seçilirse, n_c çevirici sayısını ve $r_{hat_{ij}}$ i. ve j. çevirici arasındaki DA hat direncini göstermek üzere, DA sistemine ait bara admitans matrisi;

$$y_{d_{bara}} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{r_{hat_{21}}} + \frac{1}{r_{hat_{23}}} + \dots + \frac{1}{r_{hat_{2n_c}}} \right) & \left(-\frac{1}{r_{hat_{23}}} \right) & \dots & \left(-\frac{1}{r_{hat_{2n_c}}} \right) \\ \left(-\frac{1}{r_{hat_{32}}} \right) & \left(\frac{1}{r_{hat_{31}}} + \frac{1}{r_{hat_{32}}} + \dots + \frac{1}{r_{hat_{3n_c}}} \right) & \dots & \left(-\frac{1}{r_{hat_{3n_c}}} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(-\frac{1}{r_{hat_{n_c 1}}} \right) & \left(-\frac{1}{r_{hat_{n_c 2}}} \right) & \dots & \left(\frac{1}{r_{hat_{n_c 1}}} + \frac{1}{r_{hat_{n_c 2}}} + \dots + \frac{1}{r_{hat_{n_c n_c-1}}} \right) \end{bmatrix}_{(n_c-1 \times n_c-1)} \quad (3.115)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Bu durumda 1. çevirici haricindeki çeviricilere ait çıkış doğru gerilim değerleri ile doğru akım değerleri arasındaki ilişki;

$$\begin{bmatrix} y_{d_{bara}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d_2} - v_{d_1} \\ v_{d_3} - v_{d_1} \\ \vdots \\ v_{d_{n_c}} - v_{d_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{d_2} \\ i_{d_3} \\ \vdots \\ i_{d_{n_c}} \end{bmatrix} \quad (3.116)$$

olarak yazılabilir. DA sistemine ait bara direnç matrisi;

$$z_{d_{bara}} = y_{d_{bara}}^{-1} \quad (3.117)$$

olarak gösterilir ve (3.116) eşitliğinin her iki tarafı soldan $y_{d_{bara}}^{-1}$ ile çarpılırsa;

$$\begin{bmatrix} v_{d_2} \\ v_{d_3} \\ \vdots \\ v_{d_{n_c}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{d_{bara}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_2} \\ i_{d_3} \\ \vdots \\ i_{d_{n_c}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} v_{d_1} \quad (3.118)$$

eşitliği elde edilir. (3.118) eşitliği, (3.109) eşitliği kullanılarak düzenlenirse, açık devre gerilim değerleri;

$$e_i = e_1 - r_{c_1} i_{d_1} + r_{c_i} i_{d_i} + \sum_{j=2}^{n_c} r_{bara_{ij}} i_{d_j} \quad (i = 2, \dots, n_c) \quad (3.119)$$

eşitliği ile bulunur. (3.119) ifadesinde $r_{bara_{ij}}$; bara direnç matrisinin (i, j) elemanını göstermektedir. Çeviricilere ait çıkış doğru gerilim değerleri, bilinen açık devre doğru gerilim değerleri yardımı ile;

$$v_{d_i} = e_i - r_{c_i} i_{d_i} \quad (i = 1, \dots, n_c) \quad (3.120)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

Şekil 3.10' da sistem modeli verilen tek kutuplu çok uçlu DA sisteminde güç dengesinin sağlanması, çeviricilerden DA iletim sistemine verilen-alınan doğru akımların cebrik toplamalarının sıfır olmasına bağlıdır:

$$\sum_{i=1}^{n_c} i_{d_i} = 0 \quad (3.121)$$

Yapılan DA güç akışı çalışması için, referans çevirici olarak seçilen 1. çevirici haricindeki çeviricilere ait aktif güç değerleri, kontrol değişkeni olarak ele alınmıştır. Çeviricilere ait çıkış doğru gerilimleri ile doğru akım değerleri ise durum değişkeni olarak alınmıştır:

$$x_{DA}^T = \left[v_{d_1} \quad v_{d_2} \quad \dots \quad v_{d_{n_c}} \quad i_{d_1} \quad i_{d_2} \quad \dots \quad i_{d_{n_c}} \right] \quad (3.122)$$

$$u_{DA}^T = \left[p_{d_2} \quad p_{d_3} \quad \dots \quad p_{d_{n_c}} \right] \quad (3.123)$$

DA güç akışı algoritması boyunca, kontrol değişkenleri sabit tutularak, durum değişkenleri bulunmaya çalışılır. (3.123) eşitliğinden görüleceği üzere, kontrol değişkeni olarak çevirici aktif güç değerleri alındığı için, ilgili çeviriciler sabit aktif güç modunda çalıştırılacaktır. DA güç akışı tamamlandığında, DA sisteme ait tüm büyüklükler elde edilir. Bilinen büyüklükler kullanılarak, tüm çeviricilere ait tetikleme ya da toparlanma açıları, 1. çeviriciye ait aktif güç değeri ve tüm çeviricilere ait AA sisteminden çekilen reaktif güç değerleri hesaplanabilir.

3.2.3. DA güç akışı algoritması

Tek kutuplu çok uçlu DA sisteminde yapılacak güç akışı algoritması için çeviricilere ait aktif güç değerleri üzerinden Gauss iterasyon yöntemi kullanılmıştır. Yapılan güç akışı algoritmasına ait ana adımlar aşağıdaki gibi verilebilir:

i. İlk önce tüm çeviricilere ait çevirici çıkışı doğru gerilimi değerleri (v_{d_i}) için başlangıç değeri belirlenir ve **ii.** adıma gönderilir. Başlangıç değerleri olarak, data dosyasında verilen, çevirici çıkış gerilimi alt ve üst limit değerleri arasından değerler seçilebilir. Bu tezde, çevirici uç çıkış gerilimleri başlangıç değerleri için nominal çalışma gerilim değerleri seçilmiştir. DA güç akışı algoritması sonucunda elde edilecek çevirici çıkışı doğru gerilim değerlerinin, bu adımda belirlenen başlangıç değerleri civarında olması amaçlanmaktadır.

$$v_{d_i}^{\min} \leq (v_{d_i}^{ilk} = v_{d_i}^{nom}) \leq v_{d_i}^{\max} \quad (3.124)$$

(3.124) ifadesinde $v_{d_i}^{\min}$, $v_{d_i}^{\max}$, $v_{d_i}^{nom}$ ve $v_{d_i}^{ilk}$ sırasıyla, i. çeviriciye ait çıkış doğru geriliminin alt sınır değerini, üst sınır değerini, nominal çalışma değerini ve başlangıç değerini göstermektedir.

ii. Bu adıma gönderilen gerilim değerleri, tahmini çevirici çıkışı doğru gerilim değerleri v'_{d_i} olarak atanır.

iii. Tüm çeviricilere ait tahmini çıkış doğru akım değerleri, AA güç akışı algoritmasından gelen çevirici aktif güç değerleri ve **ii.** adımda tahmin edilen çevirici çıkış doğru gerilim değerleri kullanılarak elde edilir:

$$i'_{d_i} = \frac{P_{d_i}}{v'_{d_i}} \quad (i = 1, \dots, n_c) \quad (3.125)$$

iv. Çevirici çıkışına ilişkin gerçek doğru akım değerleri, **iii.** adımda elde edilen tahmini değerler kullanılarak belirlenir. Bunun için akım dengeleme yöntemi kullanılmıştır [92]. Bu yöntem, tezde, sistemde sabit aktif güç modunda çalışan çeviricilerin bulunması durumuna göre uyarlanmıştır.

Sabit aktif güç modunda çalışan çeviricilere ait çıkış doğru akım değeri;

$$i_{di} = p_{di}^{set} / v_{di}' \quad (i = 1, \dots, n_c^{set}) \quad (3.126)$$

ifadesiyle bulunur. Burada p_{di}^{set} ve n_c^{set} sırasıyla sabit aktif güç modunda çalışan çeviricilere ait aktif güç değerini ve sabit aktif güç modunda çalışan çevirici sayısını göstermektedir.

Sabit aktif güç modunda çalışmayan çeviricilere ait çıkış doğru akım değeri ise,

$$i_{di} = \left(i_{di}' - \frac{\eta}{\sigma_i} \right) + \frac{p_{di}}{\sum_{j=1}^{n_c^{set}} p_{dj}^{set}} \cdot \left(\sum_{k=1}^{n_c^{set}} i_{dk}' - \frac{\lambda}{\sigma_k} - i_{dk} \right) \quad (i = n_c^{set} + 1, \dots, n_c) \quad (3.127)$$

olarak bulunur. Burada λ ve σ_i sırasıyla Lagrange çarpanı ve ağırlık katsayısıdır.

Ağırlık katsayısı σ_i , sistem çalışma prosedürü ve çevirici güç oranları göz önüne alınarak seçilir. Lagrange çarpanı λ ise;

$$\lambda = \left(\sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{\sigma_i} \right)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{n_c} i_{dj}' \quad (3.128)$$

ifadesiyle bulunur.

v. Komutasyon dirençlerinin işaretleri, iv. adımda tespit edilen çevirici çıkış doğru akım değerlerine bağlı olarak belirlenir:

$$r_{c_i} = \frac{|r_{c_i} i_{d_i}|}{i_{d_i}} \quad (3.129)$$

vi. Çeviricilere ait açık devre doğru gerilim değerleri, (3.119) ve (3.120) eşitlikleri kullanılarak tespit edilir:

$$e_1 = v_{d_1} + r_{c_1} i_{d_1} \quad (3.130)$$

$$e_i = e_1 - r_{c_1} i_{d_1} + r_{c_i} i_{d_i} + \sum_{j=2}^{n_c} r_{bar_{a_j}} i_{d_j} \quad (i = 2, \dots, n_c) \quad (3.131)$$

vii. Çeviricilere ait uç çıkış doğru gerilim değerleri, (3.120) eşitliği kullanılarak tespit edilir:

$$v_{d_i} = e_i - r_{c_i} i_{d_i} \quad (i = 1, \dots, n_c) \quad (3.132)$$

viii. DA güç akışı algoritması sonunda elde edilecek çevirici çıkışı doğru gerilim değerlerinin i. adımdaki başlangıç değerleri civarında kalmasını sağlamak için, vi. adımda elde edilen çevirici açık devre doğru gerilim değerleri, vii. adımda elde edilen uç çıkış doğru gerilim değerlerini kullanarak ayarlanır. Bunun için:

$$\left[v_{dfark} \right] = \left[v_{d_1} - v_{d_1}^{ilk} \quad v_{d_2} - v_{d_2}^{ilk} \quad \dots \quad v_{d_{n_c}} - v_{d_{n_c}}^{ilk} \right] \quad (3.133)$$

(3.133) eşitliği ile elde edilen fark vektörünün mutlak değerinin en küçük elemanı;

$$v_{dfark}^{\min} = \min \left[\left| v_{dfark} \right| \right] \quad (3.134)$$

olarak gösterilmek üzere,

$$e_i = \begin{cases} e_i - v_{dfark}^{\min}, v_{d_i} > v_{d_i}^{ilk} \\ e_i + v_{dfark}^{\min}, v_{d_i} < v_{d_i}^{ilk} \end{cases} \quad (3.135)$$

eşitliği kullanılarak, çevirici açık devre doğru gerilim değerleri güncellenir. (3.135) eşitliği ile güncellenen çevirici açık devre gerilim değerleri kullanılarak (3.132) eşitliği ile çevirici uç çıkış doğru gerilim değerleri yeniden hesaplanır.

ix. Çevirici çıkışı doğru gerilimleri için viii. adımda elde edilen değerler ile ii. adımda belirlenen tahmini değerler arasındaki fark, belirlenen bir tolerans değerinin altında ise;

$$v_{d_i} - v_{d_i}' \leq \varepsilon_{DA} \quad (3.136)$$

DA güç akışı algoritması sona erer, aksi takdirde, vii. adımda elde edilen değerler, ii. adıma gönderilerek, DA güç akışı algoritmasına devam edilir.

DA güç akışı algoritması tamamlandıktan sonra çeviricilere ait tetikleme ya da toparlanma açıları, aktif güç değerleri ve reaktif güç değerleri bulunabilir. Çeviricilere ait tetikleme ya da toparlanma açıları (3.108) eşitliği yardımı ile,

$$\theta_i = \arccos \left(\frac{e_i}{v_{md_i}} \right) \quad (i = 1, \dots, n_c) \quad (3.137)$$

olarak bulunabilir.

Çeviricilere ait aktif güç değerleri (3.113) eşitliği kullanılarak;

$$P_{d_i} = v_{d_i} i_{d_i} \quad (i = 1, \dots, n_c) \quad (3.138)$$

eşitliği ile bulunur.

Çeviricilere ait kademe ayarlı transformatör çıkışı alternatif gerilim açısı değeri ile transformatör çıkışı AA açısı değeri arasındaki fark;

$$\phi_{md_i} = \arccos\left(\frac{v_{d_i}}{v_{md_i}}\right) \quad (i = 1, \dots, n_c) \quad (3.139)$$

eşitliği ile bulunur. Çeviricilere ait reaktif güç değerleri (3.138) ve (3.139) eşitlikleri kullanarak;

$$Q_{d_i} = \left| P_{d_i} \tan \phi_{md_i} \right| \quad (i = 1, \dots, n_c) \quad (3.140)$$

eşitliği ile bulunur.

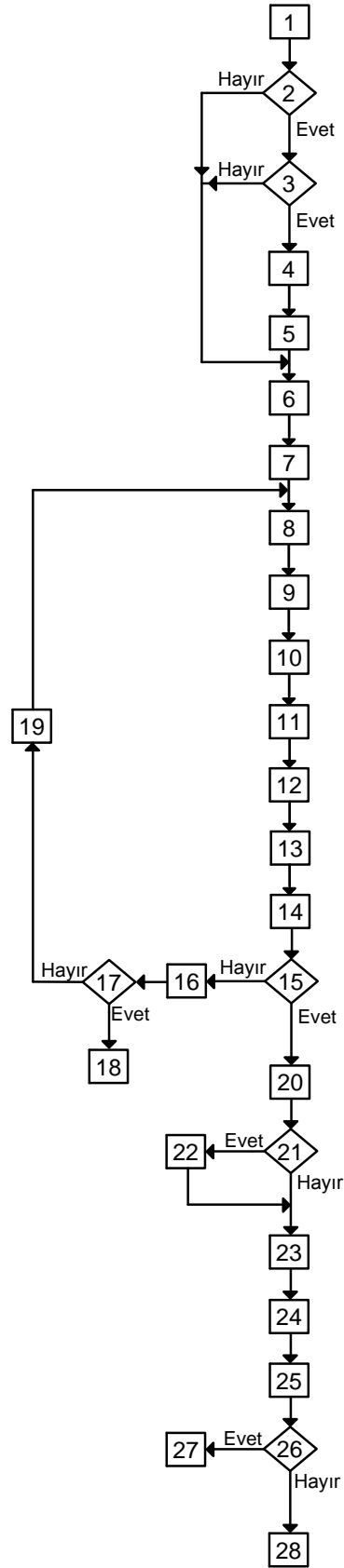
DA iletim hatlarından akan aktif güç değerleri;

$$P_{dhat_{ij}} = \frac{v_{d_i} - v_{d_j}}{r_{hat_{ij}}} \quad (i, j = 1, \dots, n_c) \quad (i \neq j) \quad (3.141)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Bu tezdeki çalışmada olduğu gibi, literatürdeki tüm DA güç akışı çalışmalarında karşılaşılan en büyük problem, (3.137) eşitliği ile tespit edilen çevirici tetikleme ya da toparlanma açılarının, sanal değer olarak bulunmasıdır. Bu durumun matematiksel sebebinin, (3.137) eşitliğinden görüleceği üzere, çevirici açık devre doğru gerilim değerinin, çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışı alternatif gerilim değerinden büyük olmasıdır. (3.108) eşitliğinden görüleceği üzere, çevirici açık devre doğru gerilim değerinin, çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkışı alternatif gerilim değerinden büyük olması, teorik olarak mümkün değildir. Dolayısıyla, bu olumsuz durum, kademe ayar değeri artırılarak giderilmelidir.

Eşitlikleri ve hesaplamaları Bölüm 3.2.1 ve Bölüm 3.2.2’de detaylı olarak anlatılan, (optimal güç akışı hesabında kullanılan ve ayrık AA-DA güç akışı algoritmasının bir parçası olan) DA güç akış algoritması, Şekil 3.11’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Optimal Güç Akışı Hesabında Kullanılan AA-DA Güç Akışı Algoritmasının Bir Parçası Olarak Önerilen DA Güç Akışı Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması

Adım 1. AA güç akışı algoritmasından çeviricilere ait kademe ayarlı transformatör çıkış alternatif gerilim değerlerini, bu transformatörlere ait kademe ayar değerlerini ve çeviricilere ait aktif ve reaktif güç değerlerini okuyarak almaya başla.

Adım 2. İlk optimizasyon algoritması iterasyonu mu?

Adım 3. İlk AA-DA güç akışı algoritması mı?

Adım 4. Data dosyasından çeviricilere ait komutasyon direnç değerlerini, DA hat direnç değerlerini, çeviricilere ait uç çıkış doğru gerilim alt ve üst sınır değerlerini, DA güç akışı yakınsama tolerans değerini, η ve σ_i değerlerini oku ve hafızaya al.

Adım 5. (3.115) ve (3.117) eşitliklerini kullanarak bara direnç matrisini oluştur ve hafızaya al.

Adım 6. İterasyona başla ($ite_{DA} = 1$).

Adım 7. Çeviricilere ait uç çıkış doğru gerilimleri başlangıç değerleri $v_{d_{iik}}$ için (3.124) eşitliğini kullanarak değer ata ve bu değerleri Adım 8' e gönder.

Adım 8. Bu adıma gönderilen değerleri çevirici ucu çıkış doğru gerilimleri tahmini değerleri v'_{d_i} olarak ata.

Adım 9. Tüm çeviricilere ait çıkış doğru akımları için (3.125) eşitliğini kullanarak tahmini değerleri bul.

Adım 10. Tüm çeviricilere ait gerçek çıkış doğru akım değerlerini (3.126)-(3.128) eşitliklerini kullanarak hesapla.

Adım 11. Tüm çeviricilere ait komutasyon dirençlerinin işaretlerini (3.129) eşitliğini kullanarak tespit et.

Adım 12. Tüm çeviricilere ait açık devre doğru gerilim değerlerini (3.130) ve (3.131) eşitliklerini kullanarak hesapla.

Adım 13. Tüm çeviricilere ait uç çıkış doğru gerilim değerlerini (3.132) eşitliğini kullanarak hesapla.

Adım 14. Tüm çeviricilere ait açık devre doğru gerilim değerlerini (3.133)-(3.135) eşitliklerini kullanarak güncelle. Güncellenmiş açık devre doğru gerilim değerlerini kullanarak çevirici uç çıkış doğru gerilim değerlerini (3.132) eşitliği ile yeniden hesapla.

Adım 15. Adım 14' te elde edilen ve Adım 8' de belirlenen çevirici uç çıkış doğru gerilim değerleri arasındaki farkın belirlenen tolerans değerinden küçük olup olmadığını (3.136) eşitsizliğini kullanarak kontrol et.

Adım 16. İterasyon sayısını arttır ($ite_{DA} = ite_{DA} + 1$).

Adım 17. İterasyon sayısının limit değerini aşma durumunu araştır ($ite_{DA} > ite_{DA}^{max}$).

Adım 18. AA-DA güç akışını sonlandır ve optimizasyon algoritmasına dön.

Adım 19. Adım 14' te elde edilen çevirici uç çıkış doğru gerilim değerlerini Adım 8' e taşı.

Adım 20. DA güç akışı algoritması yakınsadı. Tüm çeviricilere ait tetikleme ya da toparlanma açılarını (3.137) eşitliğini kullanarak hesapla.

Adım 21. Adım 20' de elde edilen çevirici kontrol açılarının herhangi birinde sanal ya da data dosyasında belirlenen alt sınır değerinin altında çıkma durumu var mı?

Adım 22. Adım 20' de elde edilen çevirici kontrol açılarında sanal ya da data dosyasında belirlenen alt sınır değerinin altında olan çeviricilere ait kademe ayar değerlerini üst sınır değerlerine ulaşmamışsa bir kademe arttır. Bahsi geçen çevirici kontrol açı değerlerini data dosyasında belirlenen alt sınır değerleri olarak güncelle.

Adım 23. Tüm çeviricilere ait aktif güç değerlerini (3.138) eşitliğini kullanarak hesapla.

Adım 24. Tüm çeviricilere ait kademe ayarlı transformatör çıkış alternatif gerilim açı değeri ile çeviriciye ait kademe ayarlı transformatör çıkış AA açı değeri arasındaki farkı (3.139) eşitliğini kullanarak tespit et.

Adım 25. Tüm çeviricilere ait reaktif güç değerlerini (3.140) eşitliğini kullanarak hesapla.

Adım 26. DA güç akışı algoritması Adım 22' den geçti mi?

Adım 27. Adım 23 ve Adım 25' ten elde edilen çevirici aktif ve reaktif güç değerleri ve adım 22' de güncellenen kademe ayar değerleri ile AA-DA güç akışı algoritmasına git.

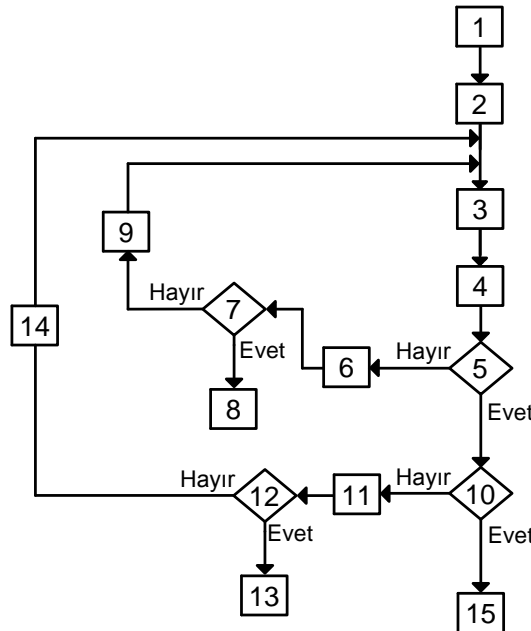
Adım 28. Adım 20 ve Adım 22' den elde edilen çevirici aktif ve reaktif güç değerleri ile AA-DA güç akışı algoritmasına git.

Adım 17' de yapılan kontrol ile, DA güç akışının ıraksamaya gitmesi durumunda, optimizasyon algoritmasının problemlili iterasyonu atlayarak, çözüm arayışına devam etmesi sağlanır. DA güç akışı algoritmasının maksimum iterasyon sayısını aşması, AA-DA güç akışı algoritmasının yakınsama sağlanamadan sonlandırılması anlamına gelecektir. Adım 17' de yapılan kontrol yardımı ile, DA güç akışı algoritmasının 18.

adımı üzerinden optimizasyon algoritmasına dönülürken, jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybı için rastgele (nispeten çok büyük) değerler verilir. Bunun nedeni, Bölüm 4’ te YAK algoritması ve GA ile AA-DA optimal güç akışı hesaplamaları anlatılırken açıklanacaktır.

3.3. Önerilen Ayırık AA–DA Güç Akışı Algoritması

Bu bölümde, Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2’ de verilen AA ve DA güç akışı algoritmaları kullanılarak üretilen ayırık AA-DA güç akışı algoritması verilmiştir. Ayırık AA-DA güç akışı algoritması, bağımsız AA ve DA güç akışı algoritmaları arasında gidip-gelme mantığına dayalıdır. Güç dengesi açısından bakıldığında, AA ve DA güç akışı algoritmaları için ortak nokta çeviricilere ait aktif ve reaktif güç değerleridir. Bu sebeple, AA-DA güç akışı algoritmasının yakınsaması, AA güç akışı algoritması boyunca sabit tutulan çevirici aktif ve reaktif güç değerleri ile DA güç akışı sonucunda elde edilen çevirici aktif ve reaktif güç değerlerinin, belirlenen bir tolerans farkıyla eşit olmasını gerektirmektedir. Optimal güç akışı hesabında kullanılan (önerilen) AA-DA güç akışı algoritması, Şekil 3.12’ de verilmiştir.



Şekil 3.12. Optimal Güç Akışı Hesabında Kullanılan Önerilen AA-DA Güç Akışı Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması

Adım 1. (3.29) eşitliği ile tanımlanan AA kontrol değişkenlerinden DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değerleri haricinde olanları için değerlerini belirle.

Adım 2. İterasyona başla ($ite_{AA-DA} = 1$). 1. adımda belirlenen kontrol değişkenleri ile AA güç akışı algoritmasının 1. adımına git.

Adım 3. AA güç akışı algoritmasını yap.

Adım 4. DA güç akışı algoritmasını yap.

Adım 5. Bu adıma DA güç akışı algoritmasının 28. adımından mı gelindi?

Adım 6. İterasyon sayısını arttır ($ite_{AA-DA} = ite_{AA-DA} + 1$).

Adım 7. İterasyon sayısının limit değerini aşma durumunu araştır ($ite_{AA-DA} > ite_{AA-DA_{max}}$).

Adım 8. AA-DA güç akışını sonlandır ve optimizasyon algoritmasına dön.

Adım 9. DA güç akışı algoritmasının 27. adımından gelen çevirici aktif ve reaktif güç değerleri ve güncellenmiş kademe ayar değerleri ile AA güç akışı algoritmasının 8. adımına git.

Adım 10. AA güç akışı algoritması boyunca sabit tutulan tüm çeviricilere ait aktif ve reaktif güç değerleri ile DA güç akışı algoritmasının 28. adımından gelen çevirici aktif ve reaktif güç değerleri arasındaki fark belirlenen bir tolerans değerinden (ε_{AA-DA}) küçük mü?

Adım 11. İterasyon sayısını arttır ($ite_{AA-DA} = ite_{AA-DA} + 1$).

Adım 12. İterasyon sayısının limit değerini aşma durumunu araştır ($ite_{AA-DA} > ite_{AA-DA}^{max}$).

Adım 13. AA-DA güç akışını sonlandır ve optimizasyon algoritmasına dön.

Adım 14. DA güç akışı algoritmasının 28. adımından gelen çevirici aktif ve reaktif güç değerleri ile AA güç akışı algoritmasının 10. adımına git.

Adım 15. AA-DA güç akışı algoritması sona erdi. AA-DA güç akışı sonuçları ile optimizasyon algoritmasına dön.

Adım 7 ve Adım 12' de yapılan kontrol ile, DA güç akışının ıraksamaya gitmesi durumunda, optimizasyon algoritmasının problemlili iterasyonu atlayarak, çözüm arayışına devam etmesi sağlanır. DA güç akışı algoritmasının maksimum iterasyon

sayısını aşması, AA-DA güç akışı algoritmasının yakınsama sağlanmadan sonlandırılması anlamına gelecektir. Yapılan kontroller yardımı ile, DA güç akışı algoritmasının 8. ve 13. adım üzerinden optimizasyon algoritmasına dönülürken, jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybı için rastgele (nispeten çok büyük) değerler verilir. Bunun nedeni Bölüm 4' te YAK algoritması ve GA ile AA-DA optimal güç akışı hesaplamaları anlatılırken açıklanacaktır.

BÖLÜM 4. ÖNERİLEN OPTİMAL AA-DA GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMI

4.1. AA-DA Sistemine Ait Optimal Güç Akışı Problemi

Bir güç sisteminde yapılan optimal güç akışına ait optimizasyon problemi genel olarak;

$$\begin{cases} g(x,u) \text{ ve } h(x,u) \text{ fonksiyonlarını sağla} \\ f(x,u) \text{ fonksiyonunu minimize et} \end{cases} \quad (4.1)$$

şeklinde verilebilir. (4.1) eşitliğinde; $f(x,u)$, $g(x,u)$ ve $h(x,u)$, x ve u sırası ile; minimize edilecek amaç fonksiyonunu, güç akışı eşitliklerini, sistem kısıtlamalarını, durum değişkenlerini ve kontrol değişkenlerini ifade etmektedir.

Bu tezde yapılan AA-DA sisteminde optimal güç akışı çalışmasında yakıt ile tahrik edilen jeneratörlerin üretim maliyeti ve AA-DA sistemine ilişkin toplam aktif güç kaybının minimize edilmesi amaçlanmıştır. AA-DA sistemine ait jeneratörlerin üretim maliyeti fonksiyonu;

$$f_{\text{maliyet}}(x,u) = \text{maliyet} = \sum_{i=1}^{n_g} a_{g_i} p_{g_i}^2 + b_{g_i} p_{g_i} + c_{g_i} \quad (4.2)$$

eşitliği ile verilebilir. (4.2) eşitliğinde, a_{g_i} , b_{g_i} ve c_{g_i} sırası ile; jeneratör üretim maliyet katsayılarını göstermektedir. AA-DA sistemine ait toplam aktif güç kayıp fonksiyonu;

$$f_{\text{kayıp}}(x,u) = P_{\text{kayıp}} = \sum_{i=1}^{n_g} P_{g_i} - \sum_{i=1}^{n_b} P_{y_i} - \sum_{i=1}^{n_c} P_{d_i} \quad (4.3)$$

eşitliği ile verilebilir.

(4.4)-(4.6) ile verilen ve güç akışı eşitlikleri olarak tanımlanan $g(x,u)$ eşitliklerinin nasıl sağlandığı, Bölüm 3'te açıklanmıştır.

$$p_{g_i} - p_{y_i} - p_{d_i} = 0 \quad (4.4)$$

$$q_{g_i} + q_{c_i} - q_{y_i} - q_{d_i} = 0 \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^{n_c} i_{d_i} = 0 \quad (4.6)$$

Sistem kısıtlamaları olarak tanımlanan $h(x, u)$ fonksiyonu ise, AA-DA sistemine ait büyüklüklerinin alt ve üst sınır değerlerine ilişkin kısıtları içermektedir. AA sistemine ait kısıtlamalar;

$$p_{g_i}^{\min} \leq p_{g_i} \leq p_{g_i}^{\max} \quad (4.7)$$

$$q_{g_i}^{\min} \leq q_{g_i} \leq q_{g_i}^{\max} \quad (4.8)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \quad (4.9)$$

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad (4.10)$$

olarak verilirken, DA sistemine ait kısıtlamalar ise;

$$p_{d_i}^{\min} \leq p_{d_i} \leq p_{d_i}^{\max} \quad (4.11)$$

$$v_{d_i}^{\min} \leq v_{d_i} \leq v_{d_i}^{\max} \quad (4.12)$$

$$t_{d_i}^{\min} \leq t_{d_i} \leq t_{d_i}^{\max} \quad (4.13)$$

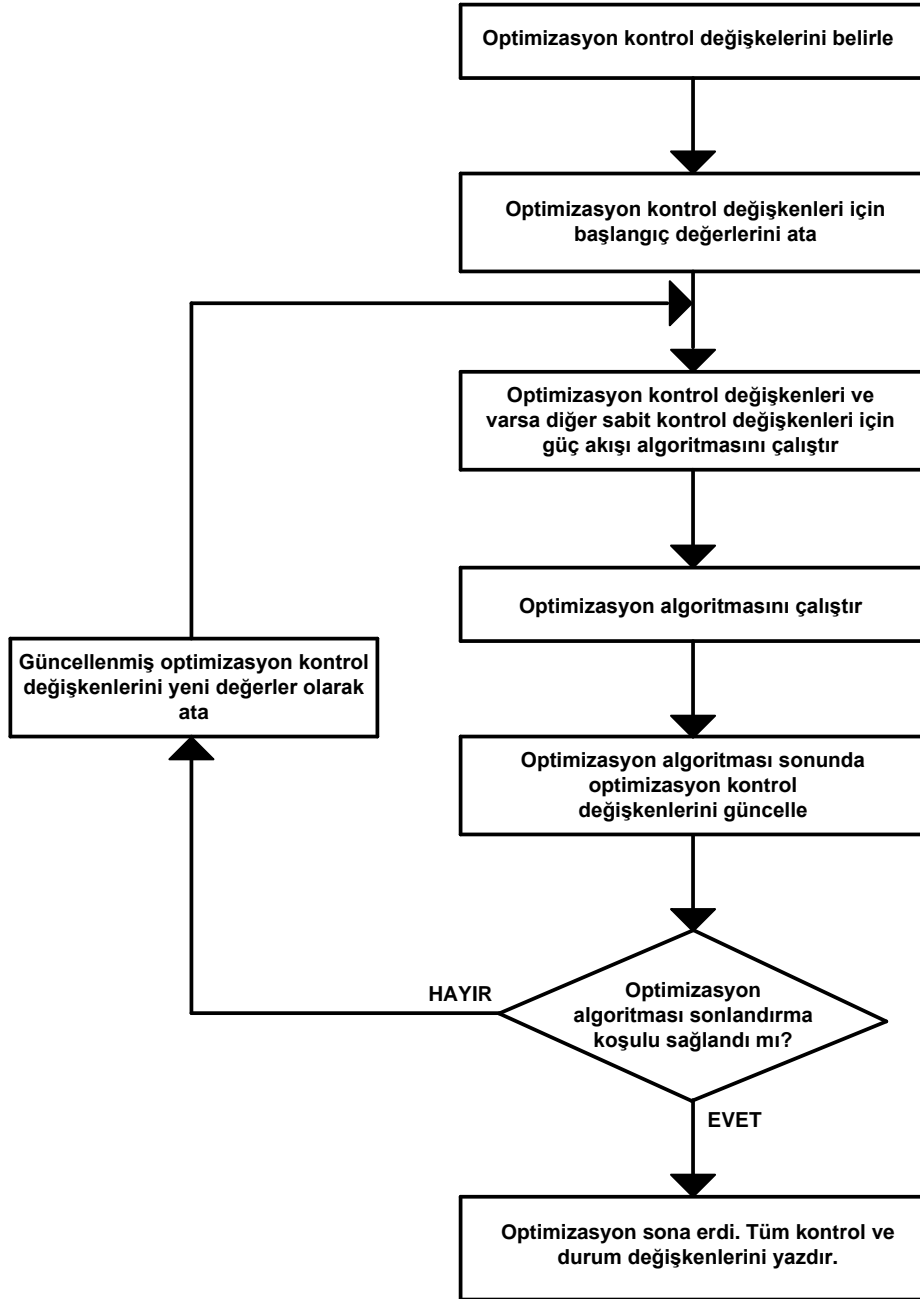
$$\theta_{d_i}^{\min} \leq \theta_{d_i} \leq \theta_{d_i}^{\max} \quad (4.14)$$

olarak yazılabilir.

Optimal güç akışı çalışmalarında, sistem kısıtlamalarını sağlayan, belirlenen amaç fonksiyonunu minimum yapan kontrol değişkenleri tespit edilmeye çalışılır. Bu sebeple, optimizasyon algoritmasında sürekli güncellenecek kontrol değişkenlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Optimizasyon algoritmasına ilişkin kontrol değişkenleri, güç akışına ait değişkenler içinden seçilir ve optimizasyon algoritmasının alt parçası olan güç akışı iterasyonları boyunca değerleri sabit tutulur. Uygulamada kontrol değişkenleri içinden bazılarının (sabit bir değerde tutularak) kontrol edilmesi istenmeyebilir.

Bu tezde kullanılan optimizasyon kontrol değişkenleri (4.15) eşitliğinde gösterilen vektör içinde tanımlanmıştır:

$$u_{opt}^T = \left[p_{g_2} \ p_{g_3} \ \dots \ p_{g_{n_g}} \ v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{n_g} \ t_1 \ t_2 \ \dots \ t_n \ \bar{y}_{TCSC_1} \ \bar{y}_{TCSC_2} \ \dots \ \bar{y}_{TCSC_{n_{TCSC}}} \ p_{d_2} \ p_{d_3} \ \dots \ p_{d_{n_c}} \right] \quad (4.15)$$



Şekil 4.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Yapılan Optimal Güç Akışı Çalışması Algoritmasına Ait Genel İşaret Akış Şeması

DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değerleri (Bölüm 3' te açıklandığı üzere), teorik olarak AA güç akışı algoritması için bir kontrol değişkeni olması gerekir. Fakat, önerilen DA güç akışı algoritmasının yapısı gereği, transformatör kademe ayar değerleri, bu algoritma içinde güncellenen değişkenler olduğundan, AA-DA güç akışı algoritması boyunca sabit tutulamaz. Açıklanan nedenden dolayı, bu değişkenler, optimizasyon algoritmasında kontrol değişkeni olarak seçilmemiştir. Optimal güç akışı çalışmasına ait optimizasyon kontrol değişkenlerinin güncellenmesi ve güç akışına dahil edilmesi, Şekil 4.1' de verilen işaret akış şemasında açık bir şekilde gösterilmiştir.

Yukarıda yapılan açıklamalar ışığında, optimizasyon algoritmasına ait genişletilmiş amaç fonksiyonu;

$$\begin{aligned}
f(x, u) = & c_1 f_{\text{maliyet}}(x, u) + c_2 f_{\text{kayıp}}(x, u) + c_3 \sum_{i=1}^{n_g} |p_{gi} - p_{gi}^{\text{lim}}| + c_4 \sum_{i=1}^{n_g} |q_{gi} - q_{gi}^{\text{lim}}| \\
& + c_5 \sum_{i=1}^{n_b} |v_i - v_i^{\text{lim}}| + c_6 \sum_{i=1}^{n_c} |p_{di} - p_{di}^{\text{lim}}| + c_7 \sum_{i=1}^{n_c} |v_{di} - v_{di}^{\text{lim}}| + c_8 \sum_{i=1}^{n_c} |\theta_{di} - \theta_{di}^{\text{lim}}| \\
& + c_9 \sum_{i=1}^{n_t} |t_i - t_i^{\text{lim}}| + c_{10} \sum_{i=1}^{n_c} |t_{di} - t_{di}^{\text{lim}}|
\end{aligned} \quad (4.16)$$

eşitliği ile verilebilir. (4.16) eşitliğinde c_i , hata katsayısını göstermektedir. Üst indisi “lim” olan ifadeler;

$$(x, u)^{\text{lim}} = \begin{cases} (x, u), & (x, u)_{\min} \leq (x, u) \leq (x, u)_{\max} \\ (x, u)_{\min}, & (x, u) < (x, u)_{\min} \\ (x, u)_{\max}, & (x, u) > (x, u)_{\max} \end{cases} \quad (4.17)$$

seçeneklerini içermektedir. (4.16) eşitliği ilerleyen bölümlerde önerilecek optimizasyon yöntemlerine göre güncellenecektir.

4.2. YAK Algoritması ve AA-DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabına Uygulanması

Bu bölümde sezgisel tabanlı YAK algoritması ve bu algoritmanın AA-DA sisteminde optimal güç akışı hesabına uygulanması açıklanmıştır.

4.2.1. YAK algoritması ve genel optimizasyon hesaplamalarına uygulanması

YAK algoritması bal arılarının akıllı yiyecek arama davranışlarının modellenmesi ile elde edilen popülasyon tabanlı sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır ve Karaboğa tarafından 2005 yılında önerilmiştir [93].

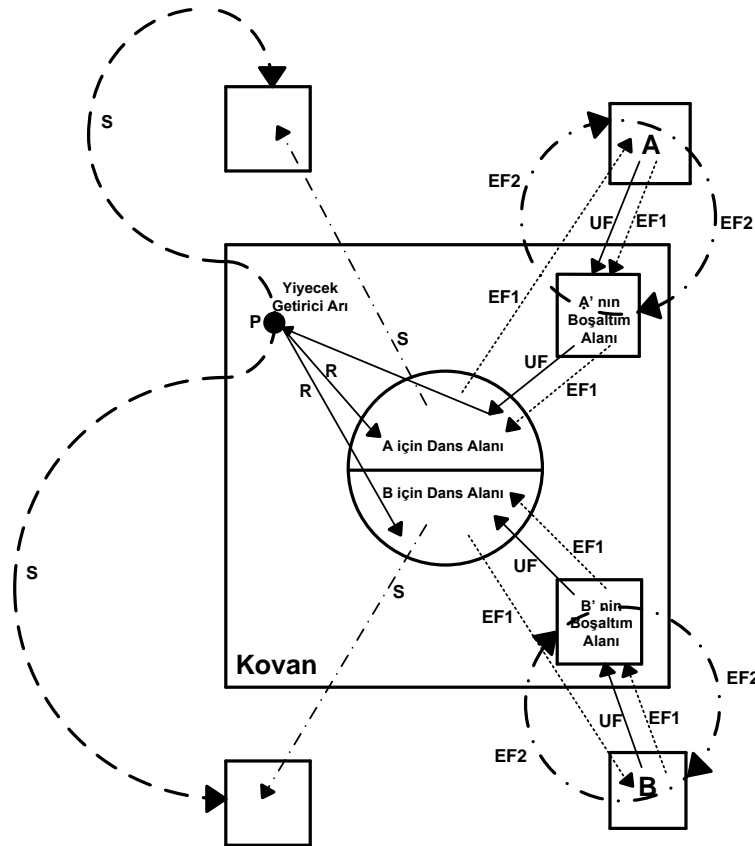
Popülasyon tabanlı optimizasyon algoritmaları doğada bulunan canlılara ait sürü zekası mantığı ile çalışmaktadır. Bir sürüye ait bireyler, sürü için belirlenen bir faaliyeti, minimal seviyede enerji kullanımı gerektirecek ve maksimum seviyede fayda sağlayacak şekilde yürütürler. Bunu sağlamak için sürü zekasının temel bileşenleri olan; iş bölümü, bilgi alışverişinde bulunma ve kendi kendine organize olma kurallarını uygularlar.

Bal arıları buldukları çevrede, en iyi kalitede ve maksimum seviyede nektar toplamak için, en zengin yiyecek kaynaklarına ulaşmaya çalışırlar. Her bir arının iş paylaşımına göre kendi sorumluluğunda bir işi vardır. Herhangi bir otorite olmadan bu iş dağılımını yapabildiklerinden, kendi kendine organize olmaktadır. Yaptıkları işle ilgili sonuçlar hakkında birbirleriyle bilgi alışverişinde bulunarak, en iyi yiyecek kaynaklarını tespit etmeye çalışırlar. Arıların kendi kendine organize olmaları dört özellik ile açıklanabilir: pozitif geri besleme, negatif geri besleme, dalgalanmalar ve çoklu etkileşimler. Pozitif geri besleme, koloni içerisindeki arıların çoğunun besin değeri daha yüksek kaynaklara yönelmesi durumudur. Negatif geri besleme, tükenen kaynakların arılar tarafından bırakılması durumudur. Dalgalanmalar, negatif geri besleme ile tükenen kaynakların bırakılmasından sonra arılar tarafından rastgele yeni kaynaklara yönelme durumudur. Çoklu etkileşimler ise, yiyecek kaynaklarına ait bilgilerin kovadaki dans alanında arılar arasında paylaşılma durumudur. Arılar gittikleri yiyecek kaynağına ait bilgileri, kovadaki dans alanında, uygun dans figürleriyle gözlemci arılara aktarırlar. Yiyecek kaynağına ait bilgi, kaynağın nektar miktarı ve pozisyon bilgisinden oluşmaktadır.

Bir bal arısı kolonisine ait arılar tarafından gerçekleşen yiyecek arama modelinin, üç temel bileşeni bulunmaktadır: yiyecek kaynakları, görevi belirli işçi arılar ve görevi belirsiz işçi arılar. Yiyecek kaynakları, arıların bal üretmek için temin ettikleri nektar

kaynaklarıdır. Bir yiyecek kaynağının değeri, gerçekte sahip olduğu nektarın kalitesi, konsantrasyonu, miktarı, çıkarılma kolaylığı ve kaynağın kovana yakınlığı gibi faktörler bir arada değerlendirilerek belirlenir. Kolaylık açısından kaynağın zenginliği tek bir kriter olarak alınabilir. Görevi belirli işçi arılar, görevli olduğu yiyecek kaynağından topladığı nektarları kovana taşırlar ve bu kaynağa ait bilgileri kovandaki diğer arılar ile paylaşırlar. Görevi belirsiz işçi arılar iki gruba ayrılırlar: gözcü arılar ve kaşif arılar. Gözcü arılar, dans alanında, gittikleri yiyecek kaynağına ait bilgileri paylaşan, görevi belirli işçi arıları gözlerler ve bu bilgiler ışığında tarif edilen kaynağın komşuluğundaki besin kaynaklarını ararlar. Kaşif arılar ise içsel ya da dışsal etkilere bağlı olarak buldukları çevrede rastgele yiyecek kaynağı ararlar. Kaşif arıların koloni içerisindeki oranı genellikle %5-10 civarındadır.

Bal arılarına ait yiyecek arama modeli, Akay [94] tarafından Şekil 4.2' de verilen "yiyecek arama çevrimi" üzerinden açıklanabilir.



Şekil 4.2. Yiyecek Arama Çevrimi

Şekil 4.2' de A ve B keşfedilmiş iki adet besin kaynağını göstermektedir. Kovanın dışında bulunan ve içi boş olarak gösterilen diğer iki kutucuk ise henüz keşfedilmemiş yiyecek kaynaklarını temsil etmektedir. Yiyecek arama sürecinin başlangıcında, kovanın etrafındaki kaynaklardan haberi olmayan görevli belirsiz bir işçi arı, kaynak aramaya başlar. Görevi belirsiz bu işçi arı için, gözcü arı (S) ya da kaşif arı (R) olmak dışında bir alternatif yoktur. Bu arı, bulunduğu kaynakla ilgili pozisyon ve nektar bilgisini hafızasına alır ve artık görevli işçi arı olarak kaynaktan nektar toplar. Topladığı nektarı kovandaki boşaltma alanında yiyecek depolayıcılara aktarır. Yiyecek depolayıcılara nektar aktarma işleminden sonra bu arı için üç durum söz konusudur:

- Nektar topladığı kaynağı bırakarak kaşif arı olabilir (UF). Bu durum mevcut kaynağın tükendiğini göstermektedir.
- Nektar topladığı kaynağa geri dönmeye önce dans ederek kovandaki arılara bilgi aktararak kovandaki gözcü arıları bu kaynağa yönlendirebilir (EF1).
- Nektar topladığı kaynağa diğer gözcü arılara bilgi vermeden ve onları yönlendirmeden geri döner (EF2).

Karaboğa, arıların yiyecek arama faaliyetlerini modelleyerek, optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılacak YAK algoritmasını geliştirmiştir. Bu modelde gerçek arı kolonisi üzerinden bazı kabuller yapılmıştır:

- Bir yiyecek kaynağının nektarı sadece bir görevli işçi arı tarafından toplanmaktadır. Dolayısıyla görevli işçi arı sayısı toplam yiyecek kaynağı sayısına eşit olmaktadır.
- Gözcü arıların sayısı görevli işçi arıların sayısına eşittir.
- Kaynağı tükenmiş görevli işçi arılardan sadece bir tanesi kaynağını terk ederek kaşif arı olarak görevlendirilmektedir.

Yiyecek kaynaklarına ait pozisyon bilgileri optimizasyon problemine ait olası çözüm kümesine, kaynakların nektar miktarları ise olası çözüm kümesinin sağladığı sonucun uygunluk değerine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla optimizasyon problemine ait çözüm kümesi parametrelerinin sınır değerleri, arıların yiyecek kaynağı arama bölgesinin sınırlarını belirlemiş olur. Böylelikle YAK algoritması, nektar miktarı en yüksek olan yiyecek kaynağının pozisyonunu, yani optimize edilecek problem için en optimal sonucu (belirlenen koşulları sağlayan aralıktaki

minimum ya da maksimum değerleri) sağlayan parametrelere ait çözüm kümesini bulmaya çalışır.

YAK algoritmasına ait temel adımlar aşağıdaki gibi verilebilir:

- i. Başlangıç yiyecek kaynaklarını (n_f adet) üret.
- ii. İşçi arıları ($n_{i\text{şçi}}$ adet) yiyecek kaynaklarına gönder.
- iii. Gözcü arıların ($n_{gözcü}$ adet) çevresinde arama yapacakları işçi arılara ait yiyecek kaynaklarını tespit et.
- iv. Gözcü arıları Adım 3'te tespit edilen yiyecek kaynakları etrafında belirlenen kaynaklara gönder.
- v. Bırakılacak kaynağı tespit et ve o kaynağa ait arıyı kaşif arı olarak belirlenen kaynağa gönder.
- vi. Durdurma kriteri kontrolü yap. Kriter sağlanmadıysa Adım 2' ye dön, aksi takdirde algoritmayı sonlandır.

YAK algoritmasına ait verilen temel adımlar alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

4.2.1.1. Başlangıç yiyecek kaynaklarının üretilmesi

Kovan çevresindeki belirlenen arama bölgesinde (optimum değerleri araştırılacak probleme ait parametrelerin sınır değerleri içerisinde) rastgele yiyecek kaynakları belirlenir:

$$w_{ij} = w_{\min j} + rand(0.1) \times (w_{\max j} - w_{\min j}) \quad (i = 1 \dots n_f) \quad (j = 1 \dots n_p) \quad (4.18)$$

Burada n_f ve n_p sırasıyla, yiyecek kaynağı sayısını ve optimize edilecek parametre sayısını göstermektedir. Dolayısıyla oluşturulan w_{ij} matrisinin her bir satırı, yiyecek kaynağını, her bir sütundaki eleman ise ilgili satıra (yani yiyecek kaynağına ait) parametre değerini göstermektedir. Daha önceden açıklandığı üzere, yiyecek kaynağına ait pozisyon bilgileri, optimum değerleri araştırılan probleme ilişkin parametre değerlerini, yiyecek kaynağı ise, problem için ilgili parametrelerden oluşmuş olası çözüm setini göstermektedir. "min" ve "max" alt indisleri, ilgili

parametrenin sırasıyla alt ve üst sınırını ifade etmektedir. YAK algoritması içinde yiyecek kaynaklarının sayısının fazla olması, daha iyi bir optimal çözümün bulunmasını güçlendirir. Ancak, ulaşılabilecek en optimum sonucu sağlayan yiyecek kaynağı sayısının artırılması, sonucu değiştirmez, hatta algoritma süresinin uzamasına neden olur. Bu sebeple, yapılan optimizasyon çalışmalarında en ideal yiyecek kaynağı sayısı, denemeler sonucunda tespit edilir.

(4.18) eşitliği ile belirlenen kaynaklar, algoritma başlangıcında kovadaki görevsiz arılardan belirlenen kaynak sayısı kadarının, kaşif arı olarak arama bölgesine gönderilmesi ile bulunur. Kaşif arılar, (4.18) ifadesindeki kaynakları tespit ettikten sonra, artık görevli arı olarak, bu kaynaktan nektar toplar ve bunu kovana taşır. İlgili kaynaktan kovana taşınan nektarın zenginliği yani optimize edilecek problem için üretilen olası çözüme ait parametrelerden elde edilen sonucun uygunluk değeri hesaplanır:

$$fit_i = \begin{cases} \left(\frac{1}{1+f_i} \right), & f_i \geq 0 \\ (1+|f_i|), & f_i < 0 \end{cases} \quad (i=1 \dots n_f) \quad (4.19)$$

(4.19) eşitliğinde f_i , i . yiyecek kaynağına ait parametre değerleri için, amaç fonksiyonunun değerini göstermektedir. (4.18) eşitliği ile elde edilen yiyecek kaynakları için, (4.19) eşitliği ile elde edilen uygunluk değerleri sıralamaya sokulur ve her yiyecek kaynağı için bir sayaç değişkeni atanarak değeri sıfırlanır. Bu sayaç, sonraki alt bölümlerde açıklanacağı üzere, yeni kaynaklarla eski kaynaklara ait uygunluk değerlerinin karşılaştırılmasında ve buna bağlı olarak ilgili kaynağın terk edilme kararının verilmesinde kullanılacaktır. Uygunluk değeri en yüksek olan yiyecek kaynağına ait uygunluk ve parametre değerleri hafızaya alınır. Bu aşama sonunda, uygunluk değeri en yüksek olan kaynağına ait parametreler, amaç fonksiyonunun en iyi değeri olacaktır.

4.2.1.2. İşçi arıların yiyecek kaynaklarına gönderilmesi

Algoritma başlangıcında belirlenen yiyecek kaynaklarının sayısı kadar işçi arı, mevcut ya da eski kaynakların komşuluğunda, belirlenen kaynaklara gönderilir. İşçi arıların gönderildiği yeni kaynaklar, eski kaynak bilgileri kullanılarak;

$$w_{ij} = w'_{ij} + \beta_{ij} (w'_{ij} - w'_{kj}) \quad (i = 1 \dots n_f) \quad (k = 1 \dots n_f) \quad (j = 1 \dots n_p) \quad (i \neq k) \quad (4.20)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada w'_{ij} ve β_{ij} sırasıyla mevcut kaynak bilgilerini ve $[-1,1]$ aralığında üretilmiş rastgele bir sayıyı ifade etmektedir. (4.20) eşitliği hesaplandığında, işçi arılar için elde edilen yeni yiyecek kaynaklarına ait pozisyon bilgilerinde taşma olduğunda, (4.21) eşitliği yardımı ile bu değerler sınır değerlerine çekilir.

$$w_{ij} = \begin{cases} w_{\min j}, & w_{ij} < w_{\min j} \\ w_{ij}, & w_{\min j} \leq w_{ij} \leq w_{\max j} \\ w_{\max j}, & w_{ij} > w_{\max j} \end{cases} \quad (4.21)$$

Daha sonra işçi arılar, belirlenen yeni yiyecek kaynaklarına gönderilirler. İşçi arıların gönderildiği kaynakların uygunluk değeri, (4.19) eşitliği kullanılarak hesaplanır. Herhangi bir kaynak için elde edilen yeni uygunluk değeri, eski uygunluk değerinden daha iyi ise, yeni kaynağa ait pozisyon bilgileri, eski kaynağa ait pozisyon bilgilerinin yerine geçer ve sayaç değeri sıfırlanır. Şayet aksi durum söz konusu ise eski kaynağa ait pozisyon bilgileri hafızada tutulur ve sayaç değeri bir artırılır.

4.2.1.3. Gözcü arıların çevresinde arama yapacakları işçi arılara ait yiyecek kaynaklarının belirlenmesi

İşçi arıların gittikleri yiyecek kaynağı ile ilgili kovanda dans ederek aktardığı bilgiler, gözcü arılar tarafından alınır. Daha önceden belirtildiği üzere, gözcü arı sayısı işçi arı sayısına eşit olmaktadır. Gözcü arılar, işçi arıların aktardıkları bilgilere göre, işçi arıların gittiği kaynağın komşuluğundaki kaynaklara giderler. Ancak, en başta hangi gözcü arının hangi işçi arıya ait kaynağın komşuluğundaki kaynağa gideceği belirlenmelidir. Gözcü arılar tercihlerini kaynakların uygunluk değerlerine göre yaparlar. Bu seçim işlemi için literatürde; sıralamaya dayalı seçim, stokastik örnekleme, turnuva yönetimi, rulet tekerleği gibi birçok yöntem kullanılmakta olup,

temel YAK algoritmasında kullanılan rulet tekerleği yöntemi, bu tezdeki çalışmada seçim yöntemi olarak kullanılmıştır. Rulet tekerleği yönteminde, bir gözcü arı tarafından işçi arılara ait kaynağın seçilme olasılığı, ilgili kaynağa ait uygunluk değerinin, tüm kaynaklara ait uygunluk değeri toplamına oranı ile belirlenir.

$$sp_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{n_f} fit_j} \quad (4.22)$$

(4.22) eşitliğinden görüleceği üzere, bir kaynağın uygunluk değerinin yüksek olması, gözcü arı tarafından seçilme olasılığını arttıracaktır.

4.2.1.4. Gözcü arıların gidecekleri yiyecek kaynaklarını seçmesi ve bu kaynakların çevresine gönderilmesi

Bölüm 4.2.1.3'te, işçi arılara ait kaynakların gözcü arılar tarafından seçilme olasılıkları, rulet tekerleği yöntemi ile belirlendikten sonra, gözcü arılar tarafından kaynak seçimi yapılır. Bu amaçla, her bir gözcü arı için, [0,1] aralığında rastgele bir sayı üretilir. Üretilen bu sayı, ilgili kaynağın (4.22) eşitliği ile belirlenen seçilme olasılığından küçükse, gözcü arı bu kaynağı seçer. Bu işlem, tüm gözcü arılar seçim işlemini tamamlayana kadar devam eder. Daha sonra gözcü arılar, (4.20) eşitliğini ve eğer gerekiyorsa (4.21) eşitliğini de kullanarak, işçi arılar gibi seçtikleri besin kaynağının komşuluğundaki yeni kaynaklara gönderilirler. İşçi arılarda olduğu gibi, gözcü arılar tarafından gidilen yeni kaynaklara ait uygunluk değeri, (4.19) eşitliği ile hesaplanır. Herhangi bir kaynak için elde edilen yeni uygunluk değeri, eski uygunluk değerinden daha iyi ise, yeni kaynağa ait pozisyon bilgileri, eski kaynağa ait pozisyon bilgilerinin yerine geçer ve sayaç değeri sıfırlanır. Şayet aksi durum söz konusu ise, eski kaynağa ait pozisyon bilgileri hafızada tutulur ve sayaç değeri bir arttırılır. Bu işlemler sonunda, hafızadaki son kaynaklara ait uygunluk değerleri sıralamaya sokulur. Uygunluk değeri en yüksek olan kaynağa ait uygunluk değeri ve parametre değerleri hafızaya alınır. Bu uygunluk değerine ait parametre değerleri, işlemler boyunca bulunan en uygun çözüm kümesi olur.

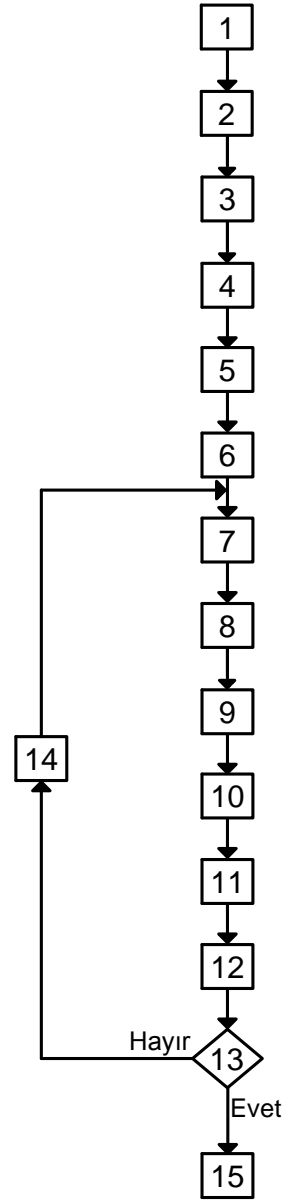
4.2.1.5. Bırakılacak kaynağın tespit edilmesi ve kaşif arının üretilmesi

İşçi ve gözcü arıların yürüttüğü yiyecek bulma çevriminin sonunda, ilgili kaynaklar için oluşturulan, yeni bulunan kaynağın eski kaynağa kıyasla uygunluk değerinin durumuna göre değeri arttırılan ya da sıfırlanan sayaç değerleri kontrol edilir. İlgili bir kaynak için atanan sayaca ait değer belirli bir limit değerini aşmışsa, bu kaynak ve komşuluğundaki kaynaklar için daha iyi bir çözümün üretilmediği kararına varılır. Bu durumda ilgili kaynağın terk edilmesi gündeme gelir. Daha önceden bahsedildiği üzere, YAK algoritması için yapılan kabullerde, sadece bir tane kaşif üretilbildiğinden, sayaç değeri limit değerini aşan kaynaklardan sadece bir tanesi terk edilir. Bu sebeple, sayaç değeri limit değerini aşan kaynaklardan, sayaç değeri en yüksek olanı terk edilerek, görevli arı eski kaynağı terk ederek, kaşif arı olarak yiyecek arama alanında rastgele yeni bir kaynak aramaya gönderilir. Kaşif arının rastgele gönderileceği yiyecek kaynağı, (4.18) eşitliği ile belirlenir. Kaşif arının gittiği yiyecek kaynağına ait pozisyon bilgileri, terk edilen kaynağa ait pozisyon bilgilerinin yerine geçer ve sayaç değeri sıfırlanır.

4.2.1.6. Durdurma kriteri

YAK algoritması için durdurma kriteri olarak maksimum çevrim sayısı, belli bir hata değeri, belli bir çalışma süresi ya da farklı optimizasyon algoritmalarında kullanılan herhangi bir kriter kullanılabilir. Bu tezdeki çalışmada durdurma kriteri olarak "maksimum çevrim sayısı" alınmıştır. Çevrim sayısı, belirlenen maksimum çevrim sayısını aşarsa, algoritma sonlandırılır. Aksi halde, algoritma Bölüm 4.2.1.2' de açıklanan işçi arılara ait sürece geri dönerek devam eder.

Optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılacak YAK algoritmasına ait adımlar, Şekil 4.3' te verilen işaret akış şemasında gösterilmiştir:



Şekil 4.3. YAK Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması

Adım 1. Yiyecek kaynaklarının sayısını, optimize edilecek problemin parametre sayısını ve maksimum çevrim sayısını gir.

Adım 2. Yiyecek kaynakları için sayaç değişkenleri oluştur ve bunları sıfırla.

Adım 3. Optimize edilecek probleme ait parametrelerin alt ve üst sınır değerlerini belirle.

Adım 4. Başlangıç yiyecek kaynaklarını (4.18) eşitliği ile belirle.

Adım 5. Başlangıç yiyecek kaynaklarına ait uygunluk değerlerini (4.19) eşitliği ile hesapla. Hesaplanan uygunluk değerlerini ve bunların içerisinde en iyi olanını hafızaya al.

Adım 6. İterasyona başla ($ite_{YAK} = 1$).

Adım 7. İşçi arıların gönderilecekleri yiyecek kaynaklarını (4.20) ve (4.21) eşitliklerini göz önüne alarak belirle.

Adım 8. İşçi arılara ait yiyecek kaynaklarının uygunluk değerlerini (4.19) eşitliği ile hesapla. Her bir kaynak için yeni ve eski uygunluk değerlerini karşılaştır. Yeni kaynağın uygunluk değeri, eski kaynağın uygunluk değerinden daha iyiyse, yeni kaynağın pozisyon bilgilerini, eski kaynağın pozisyon bilgilerinin yerine hafızaya al ve ilgili kaynağa ait sayaç sıfırla. Aksi durum için sayaç değerini bir arttır ($sayaç_i = sayaç_i + 1$). Tüm kaynaklar için elde edilen uygunluk değerlerini sıralamaya sok ve en iyi olanını, eskisinin yerine hafızaya al.

Adım 9. Gözcü arılar için gidecekleri kaynakların komşuluğu olan işçi arılara ait kaynak seçimini yap. Bu seçime bağlı olarak gözcü arıların gidecekleri yiyecek kaynaklarını işçi arılarda olduğu gibi, (4.20) ve (4.21) eşitliklerini göz önünde bulundurarak belirle.

Adım 10. Adım 7' de işçi arılar için yapılan işlemlerin aynısını, gözcü arılar için Adım 9' da gittikleri kaynaklar için yap.

Adım 11. Yiyecek kaynaklarına ait sayaç değerlerini kontrol et. Belirlenen limit değerini aşan kaynaklar için, sayaç değeri en yüksek olan kaynağı belirle ($sayaç_i > sayaç_i^{lim}$). Bu kaynağa ait görevli arıyı, mevcut kaynağını bırakarak, kaşif arı olarak rastgele (4.18) eşitliği ile yeni bir kaynağa gönder. Yeni kaynağa ait uygunluk değerini (4.19) eşitliği ile hesapla, bu kaynağa ait pozisyon bilgilerini terk edilen kaynağın pozisyon bilgilerinin yerine hafızaya al ve kaynağa ait sayaç değerini sıfırla. Hafızadaki son kaynaklara ait uygunluk değerlerini sıralamaya sok. Uygunluk değeri en yüksek olan yiyecek kaynağına ait uygunluk değeri ve parametre değerlerini hafızaya al. Bu uygunluk değerine ait parametre değerleri, probleme ait (bu ana kadarki) en iyi çözüm kümesi olur.

Adım 12. İterasyon sayısını bir arttır ($ite_{YAK} = ite_{YAK} + 1$).

Adım 13. Durdurma kriterini kontrol et ($ite_{YAK} > ite_{YAK}^{max}$).

Adım 14. Hafızadaki en son kaynak bilgileri ile Adım 7' ye dön.

Adım 15. Algoritma sona erdi. Hafızadaki en iyi uygunluk değeri ve bu uygunluk değerinin ait olduğu kaynak pozisyon (parametre) bilgileri ile çıkış yap.

YAK algoritmasının nümerik optimizasyon çözümlerinde kullanılması, (4.23) eşitliğinde verilen örnek amaç fonksiyonu üzerinden daha açık bir şekilde açıklanabilir:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 \quad (4.23)$$

(4.23) eşitliğinden görüleceği üzere, en uygun değeri araştırılan amaç fonksiyonu x_1 , x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 adlı beş parametreden oluşmaktadır. Bölüm 4.1' de bahsedildiği üzere, optimum değeri bulunacak amaç fonksiyonuna ait tüm parametreler, optimizasyon parametresi olarak alınmayabilir. Bu örnek için optimizasyon parametresi olarak YAK algoritmasında kullanılacak üç adet parametre ($n_p = 3$); x_1 , x_2 ve x_3 , yiyecek kaynağı sayısı,

$$n_f = 2 \quad (4.24)$$

ve maksimum çevrim sayısı ise,

$$ite_{YAK_{max}} = 5 \quad (4.25)$$

olarak belirlensin. Algoritmada iki adet yiyecek kaynağı için birer adet sayaç ve bu sayaçlara ait limit değeri belirlenerek, sayaç değerleri sıfırlanır:

$$sayaç_1 = sayaç_2 = 0 \quad (4.26)$$

$$sayaç_1^{lim} = sayaç_2^{lim} = 2 \quad (4.27)$$

Amaç fonksiyonuna ait parametrelerin alt ve üst sınır değerleri;

$$\begin{cases} x_{1_{min}} \leq x_1 \leq x_{1_{max}} \\ x_{2_{min}} \leq x_2 \leq x_{2_{max}} \\ x_{3_{min}} \leq x_3 \leq x_{3_{max}} \end{cases} \quad (4.28)$$

ifadesiyle verilmiştir. Aşağıdaki sayısal değerler, YAK algoritması ile ilgili daha önceden verilen eşitlikler kullanılarak doğrudan hesaplanmamıştır. Bu değerlerin bu şekilde hesaplandığı varsayılarak, YAK algoritması sürecinin bir sayısal optimizasyon işleminde nasıl işlendiğini göstermek için kullanılmıştır. $ite_{YAK} = 1$

yapılarak algoritmaya başlanır. (4.18) eşitliği ile yapılan hesaplamalar için başlangıç yiyecek kaynaklarının;

$$w = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ \left[\begin{array}{ccc} 3 & 5 & 6 \\ 4 & 2 & 7 \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{---} > 1. \text{ yiyecek kaynağı} \\ \text{---} > 2. \text{ yiyecek kaynağı} \end{matrix} \quad (4.29)$$

olarak bulunduğu kabulü ile, (4.29) eşitliğindeki başlangıç yiyecek kaynaklarına ait uygunluk değerlerinin (4.19) eşitliği kullanılarak;

$$fit_1 = 14 \quad (4.30)$$

$$fit_2 = 19 \quad (4.31)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. Elde edilen uygunluk değerleri sıraya sokulursa, uygunluk değeri en iyi (yani değeri yüksek) olan kaynak, 2. kaynak olarak belirlenir. Bu durumda mevcut durum itibarı ile, amaç fonksiyonu için optimal sonucu 2. kaynağın sağladığı ve bu kaynağa ait parametre değerlerinin, optimal sonuç için çözüm kümesini oluşturduğu söylenebilir.

$$f_{opt}(x_1, x_2, x_3) = f(4, 2, 7) \quad (4.32)$$

Daha sonra (4.29) eşitliğindeki kaynak bilgilerini kullanarak, işçi arılarının gönderilecekleri yeni kaynaklarının, (4.20 ve (4.21) eşitlikleri yardımı ile;

$$w = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ \left[\begin{array}{ccc} 7 & 2 & 1 \\ 3 & 8 & 4 \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{---} > 1. \text{ yiyecek kaynağı} \\ \text{---} > 2. \text{ yiyecek kaynağı} \end{matrix} \quad (4.33)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. (4.33) eşitliğindeki yiyecek kaynaklarına ait uygunluk değerlerinin, (4.19) eşitliği kullanılarak;

$$fit_1 = 15 \quad (4.34)$$

$$fit_2 = 18 \quad (4.35)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. Bu durumda, 1. kaynağın (4.33) eşitliğindeki yeni pozisyonu için (4.34) eşitliği ile elde edilen yeni uygunluk değeri, (4.29) eşitliğindeki eski pozisyonu için (4.30) eşitliği ile elde edilen eski uygunluk değerinden daha iyidir. Dolayısıyla, yeni kaynak pozisyonu, eski kaynak pozisyonunun yerine yazılır ve sayaç değeri sıfırlanır. 2. kaynağın ise (4.33) eşitliğindeki yeni pozisyonu için (4.35) eşitliği ile elde edilen yeni uygunluk değeri, (4.29) eşitliğindeki eski pozisyonu için (4.31) eşitliği ile elde edilen uygunluk değerinden daha kötüdür. Dolayısıyla, eski kaynak hafızada kalır ve sayaç değeri bir arttırılır. Bu işlemler

sonunda, en son hafızada bulunan yiyecek kaynağı pozisyon bilgileri ve kaynaklara ait sayaç bilgileri;

$$w = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ 7 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 7 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{---} > 1. \text{ yiyecek kaynağı} \\ \text{---} > 2. \text{ yiyecek kaynağı} \end{array} \quad (4.36)$$

$$sayaç_1 = 0 \quad (4.37)$$

$$sayaç_2 = sayaç_2 + 1 = 1 \quad (4.38)$$

olmaktadır. (4.36) eşitliği ile verilen hafızadaki en son yiyecek kaynaklarına ait uygunluk değerleri ise,

$$fit_1 = 15 \quad (4.39)$$

$$fit_2 = 19 \quad (4.40)$$

olup, mevcut son durum için amaç fonksiyonuna ait optimum sonucu, 2. kaynağın uygunluk değeri 1. kaynağın uygunluk değerinden daha iyi olduğu için, 2. kaynağa ait parametreler sağlar:

$$f_{opt}(x_1, x_2, x_3) = f(4, 2, 7) \quad (4.41)$$

(4.36) eşitliği ile elde edilen kaynakların komşuluğuna gönderilecek iki adet gözcü arının, rulet tekerleği yöntemi sonucunda, ikisinin de (4.36) eşitliğindeki 2. kaynağı seçtiği kabul edilsin. (4.36) eşitliğindeki 2. kaynağa ait bilgileri kullanarak, gözcü arıların 2. kaynak komşuluğunda gönderilecekleri yeni kaynakların, (4.20) ve (4.21) eşitlikleri kullanılarak;

$$w_{gözcü1_2} = [1 \quad 5 \quad 6] \quad (4.42)$$

$$w_{gözcü2_2} = [2 \quad 1 \quad -3] \quad (4.43)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. (4.42) ve (4.43) eşitliği ile elde edilen gözcü arılara ait yeni kaynakların uygunluk değerlerinin;

$$fit_{gözcü1_2} = 17 \quad (4.44)$$

$$fit_{gözcü2_2} = 16 \quad (4.45)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. 2. kaynak için, 1. gözcü arı tarafından bulunan (4.42) eşitliğindeki yeni kaynağa ait (4.44) eşitliğindeki yeni uygunluk değeri, (4.40) eşitliğindeki eski uygunluk değerinden daha kötüdür. Bu sebeple eski kaynak bilgisi hafızada kalır ve 2. kaynağa ait sayacın değeri bir arttırılır:

$$sayaç_2 = sayaç_2 + 1 = 2 \quad (4.46)$$

2. kaynak için 2. gözcü arı tarafından bulunan (4.43) eşitliğindeki yeni kaynağa ait (4.45) eşitliğindeki yeni uygunluk değeri de (4.40) eşitliğindeki eski uygunluk değerinden daha kötüdür. Bu sebeple, eski kaynak bilgisi hafızada kalır ve 2. kaynağa ait sayacın değeri yine bir arttırılır:

$$sayaç_2 = sayaç_2 + 1 = 3 \quad (4.47)$$

Tüm gözcü arılar dağıtıldıktan sonra, hafızadaki kaynak bilgilerinde iyileştirme olmadığı için, (4.36) eşitliğindeki kaynak bilgileri hafızada tutulur, daha sonra yiyecek kaynaklarına ait sayaç değerlerinin, (4.27) eşitliğindeki limit değerlerini aşma durumu kontrol edilir. 1. kaynağa ait sayaç değeri;

$$(sayaç_1 = 0) \leq (sayaç_1^{lim} = 2) \quad (4.48)$$

olduğundan taşma yoktur. 2. kaynağa ait sayaç değeri ise,

$$(sayaç_2 = 3) > (sayaç_2^{lim} = 2) \quad (4.49)$$

olduğundan taşma vardır. Bu durumda 2. kaynak ve komşuluklarında, amaç fonksiyonu için, daha iyi bir çözüm kümesinin bulunamayacağına karar verilir. İşçi arı ve gözcü arı süreçlerinden sonra, sadece bir adet kaşif arı üretilebileceğinden ve mevcut kaynaklardan sadece bir tanesinde (yani 2. kaynakta) sayaç taşması olduğundan, 2. kaynak terk edilerek, bu kaynağın yerine yeni bir kaynak bulması için bir adet kaşif arı üretilir. Üretilen bu kaşif arı için (4.18) eşitliği ile üretilen rastgele yeni kaynağın

$$w_{kaşif} = [6 \quad 3 \quad 4] \quad (4.50)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. Elde edilen bu kaynak, (4.36) eşitliğinde hafızadaki mevcut kaynak bilgilerinde, 2. kaynağın yerine yazılır ve bu kaynağa ait sayaç değeri sıfırlanır:

$$w = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ 7 & 2 & 1 \\ 6 & 3 & 4 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{---} > 1. \text{ yiyecek kaynağı} \\ \text{---} > 2. \text{ yiyecek kaynağı} \end{array} \quad (4.51)$$

$$sayaç_2 = 0 \quad (4.52)$$

(4.51) eşitliğindeki 2. kaynak için hesaplanan uygunluk değerinin;

$$fit_2 = 20 \quad (4.53)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. 1. kaynak değeri için uygunluk değeri daha önceden,

$$fit_1 = 15 \quad (4.54)$$

olarak hesaplanmıştır. Mevcut son durum için, amaç fonksiyonuna ait optimal sonucu, 2. kaynağın uygunluk değeri 1. kaynağın uygunluk değerinden daha iyi olduğu için, 2. kaynağa ait parametreler sağlar:

$$f_{opt}(x_1, x_2, x_3) = f(6, 3, 4) \quad (4.55)$$

Algoritma iterasyon sayısı bir arttırılır ve maksimum çevrim sayısının aşılıp aşılmadığı kontrol edilir:

$$ite_{YAK} = ite_{YAK} + 1 = 2 \quad (4.56)$$

$$ite_{YAK} \leq ite_{YAK}^{\max} = 5 \quad (4.57)$$

Maksimum çevrim sayısı aşılmadığından, (4.51) eşitliği ile elde edilen kaynak bilgileri, mevcut bilgiler olarak işçi arı sürecine gönderilir ve daha önce açıklanan işlemlere maksimum çevrim sayısı aşılanaya kadar devam edilir.

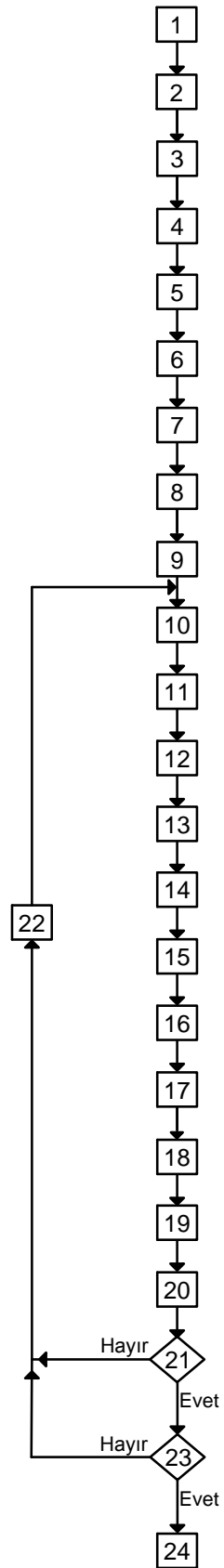
4.2.2. YAK algoritmasının AA–DA sisteminde optimal güç akışı hesabına uygulanması

Bölüm 4.1’ de AA-DA sisteminde yapılacak optimal güç akışı algoritmasına ait amaç fonksiyonu ve bu fonksiyona ait parametreler (optimizasyon kontrol değişkenleri) verilmiştir. YAK algoritmasında optimize edilecek parametreler, sürekli sınır değerler içinde üretildiğinden, bu parametrelerin (4.16) eşitliği ile verilen amaç fonksiyonunda yer alan sistem kısıtları içine sokulmalarına gerek yoktur. Bu durumda amaç fonksiyonu;

$$\begin{aligned} f(x, u) = & c_1 f_{maliyet}(x, u) + c_2 f_{kayıp}(x, u) + c_3 |p_{g1} - p_{g1}^{\lim}| + c_4 \sum_{i=1}^{n_g} |q_{gi} - q_{gi}^{\lim}| \\ & + c_5 \sum_{i=n_g+1}^{n_b} |v_i - v_i^{\lim}| + c_6 |p_{d1} - p_{d1}^{\lim}| + c_7 \sum_{i=1}^{n_c} |v_{di} - v_{di}^{\lim}| + c_8 \sum_{i=1}^{n_c} |\theta_{di} - \theta_{di}^{\lim}| \\ & + c_9 \sum_{i=1}^{n_t} |t_i - t_i^{\lim}| \end{aligned} \quad (4.58)$$

olarak kısaltılabilir. Çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar parametreleri (DA güç akışı algoritmasında, bunların sınır değerler içinde tutulmaları sağlandığından), (4.58) eşitliğinde verilen amaç fonksiyonu içinde yer alan kısıtlama ifadeleri içine sokulmamıştır. Bu tezde, YAK algoritması kullanılarak, AA sistemine

ait tüm kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değerleri, piyasada ihtiyaç duyulan (gerçek) ayrık kademe ayar değerleri olarak üretilmiştir. YAK algoritmasının AA-DA sistemine ait optimal güç akışı algoritmasına uygulaması Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. AA-DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabı için Uygulanan YAK Algoritmasına Ait İşaret Akış Şeması

Adım 1. Yiyecek kaynaklarının sayısını, (4.15) ile verilen optimizasyon kontrol değişkenleri setindeki parametre sayısını ve maksimum çevrim sayısını gir.

Adım 2. Yiyecek kaynakları için sayaç değişkenleri oluştur ve bunları sıfırla.

Adım 3. (4.15) eşitliği ile verilen optimizasyon kontrol değişkenleri setine ait parametrelerin alt ve üst sınır değerlerini belirle.

Adım 4. Başlangıç yiyecek kaynaklarını (başlangıç optimizasyon kontrol değişkenleri setleri) (4.18) eşitliği ile belirle.

Adım 5. Başlangıç yiyecek kaynaklarına ait parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri) için AA-DA güç akışı hesaplaması yap.

Adım 6. Başlangıç yiyecek kaynakları için (4.2) ve (4.3) eşitlikleri yardımı ile, jeneratör üretim maliyetini ve toplam aktif güç kaybını hesapla.

Adım 7. Başlangıç yiyecek kaynakları için (4.58) eşitliğini kullanarak amaç fonksiyon değerini hesapla.

Adım 8. Başlangıç yiyecek kaynaklarına ait uygunluk değerlerini (4.19) eşitliği yardımı ile hesapla. Hesaplanan uygunluk değerlerini ve bunların içerisinde en iyi olanını hafızaya al.

Adım 9. İterasyona başla ($ite_{YAK} = 1$).

Adım 10. İşçi arıların gönderilecekleri yiyecek kaynaklarını (4.20) ve (4.21) eşitliklerini kullanarak belirle.

Adım 11. İşçi arıların gönderildikleri yiyecek kaynaklarına ait parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri) için AA-DA güç akışı hesaplaması yap.

Adım 12. İşçi arıların gönderildikleri yiyecek kaynakları için (4.2) ve (4.3) eşitlikleri ile jeneratör üretim maliyetini ve toplam aktif güç kaybını hesapla.

Adım 13. İşçi arıların gönderildikleri yiyecek kaynakları için (4.58) eşitliğini kullanarak amaç fonksiyon değerini hesapla.

Adım 14. İşçi arılara ait yiyecek kaynaklarının uygunluk değerlerini (4.19) eşitliği ile hesapla. Her bir kaynak için yeni ve eski uygunluk değerlerini karşılaştır. Yeni kaynağın uygunluk değeri, eski kaynağın uygunluk değerinden daha iyiyse, yeni kaynağın parametrelerini (optimizasyon kontrol değişkenleri), eski kaynağın parametreleri (optimizasyon kontrol değişkenleri) yerine hafızaya al ve ilgili kaynağa ait sayaç sıfırla. Aksi durum için sayaç değerini bir arttır ($sayaç_i = sayaç_i + 1$). Tüm

kaynaklar için elde edilen uygunluk değerlerini sıralamaya sok ve en iyi olanını eskisinin yerine hafızaya al.

Adım 15. Gözcü arılar için gidecekleri kaynakların komşuluğu olan işçi arılara ait kaynak seçimini yap. Bu seçime bağlı olarak gözcü arıların gidecekleri yiyecek kaynaklarını, işçi arılarda olduğu gibi, (4.20) ve (4.21) eşitliklerini göz önünde bulundurarak belirle.

Adım 16. Adım 11-14' te işçi arılar için yapılan işlemlerin aynısını, gözcü arılar için, Adım 15' te gittikleri kaynaklar için yap.

Adım 17. Yiyecek kaynaklarına ait sayaç değerlerini kontrol et. Belirlenen limit değerini aşan kaynaklar için sayaç değeri en yüksek olan kaynağı belirle ($sayaç_i > sayaç_i^{lim}$). Bu kaynağa ait görevli arıyı, mevcut kaynağını bırakarak, kaşif arı olarak, (4.18) eşitliği ile rastgele yeni bir kaynağa gönder.

Adım 18. Adım 11-14' te işçi arılar için yapılan işlemlerin aynısını, kaşif arı için, Adım 17' de gittiği kaynak için yap.

Adım 19. Kaşif arıya ait uygunluk değerini (4.19) eşitliği ile hesapla. Bu kaynağa ait parametreleri (optimizasyon kontrol değişkenleri), terk edilen kaynağın parametrelerinin (optimizasyon kontrol değişkenleri) yerine hafızaya al ve kaynağa ait sayaç değeri sıfırla. Hafızadaki son kaynaklara ait uygunluk değerlerini sıralamaya sok. Uygunluk değeri en yüksek olan kaynağına ait uygunluk değeri ve parametre değerlerini (optimizasyon kontrol değişkenleri) hafızaya al. Bu uygunluk değerine ait parametre değerlerini (optimizasyon kontrol değişkenlerini), (4.58) eşitliği ile verilen amaç fonksiyonuna ait optimal sonucu veren çözüm kümesi olarak ata.

Adım 20. İterasyon sayısını bir arttır ($ite_{YAK} = ite_{YAK} + 1$).

Adım 21. Durdurma kriterini kontrol et ($ite_{YAK} > ite_{YAK}^{max}$).

Adım 22. Hafızadaki en son kaynak bilgileri ile Adım 10' a dön.

Adım 23. En iyi uygunluk değerinin elde edildiği kaynağına ilişkin kontrol değişkenleri kullanılarak yapılan AA-DA güç akışı algoritmasına ait tüm kontrol ve durum değişkenleri sınır değerleri içinde kalıyor mu?

Adım 24. Algoritma sona erdi. Hesaplanan en iyi uygunluk değeri, bu uygunluk değerinin ait olduğu kaynak parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri)

ve bu parametre değerleri ile elde edilen AA-DA güç akışı algoritması sonuçları ile çıkış yap.

Adım 23' te yapılan kontrol ile, YAK algoritması için belirlenen durdurma kriteri sağlandıktan sonra, sistem kısıtlamalarının tamamının sağlanmaması durumunda, kısıtlamalar sağlanana kadar optimizasyon algoritmasının devam etmesi sağlanır.

Bölüm 3' te açıklandığı üzere, AA-DA güç akışı algoritmasına ait maksimum iterasyon sayılarının aşması durumunda, AA-DA güç akışı algoritması yakınsaymadığından durdurulmaktadır. Bu durumda, güç akışı sonuçları elde edilemediğinden, (4.2) eşitliği ile verilen jeneratör üretim maliyeti ve (4.3) eşitliği ile verilen toplam aktif güç kaybı, sonuç olarak (4.58) eşitliği ile verilen amaç fonksiyonu hesaplanamaz. Bu sebeple, Bölüm 3' te açıklandığı üzere, AA-DA güç akışı algoritmasından yakınsama sağlanamadan optimal güç akışı algoritmasına dönülürken, algoritmanın devamı adına, jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybı için rastgele nispeten büyük değerler verilir. Bundaki amaç, (4.58) eşitliği ile verilen amaç fonksiyonu değerini çok büyük yaparak, yakınsama sağlanamayan AA-DA güç akışı algoritmasına ait kontrol değişkenleri setini belirleyen yiyecek kaynağına ait uygunluk değerini çok küçük yapmaktır. Böylelikle, YAK algoritmasına ait optimizasyon iterasyonu içerisindeki AA-DA güç akışını yakınsatan kontrol değişkenlerini içeren diğer yiyecek kaynaklarının uygunluk değerlerinin, yakınsamayı sağlatamayan yiyecek kaynaklarının uygunluk değerlerinden daha büyük (yani, daha iyi) olması sağlanır. Bu sayede, hem her optimizasyon iterasyonu sonunda AA-DA güç akışı algoritması için optimal sonucu veren kontrol değişkenleri seti, yakınsatmayı sağlayanlar içerisinde seçilir, hem de ilerleyen optimizasyon iterasyonlarında güncellenecek kontrol değişkenleri setlerinin, ağırlıklı olarak, yakınsamayı sağlamış, optimal sonucu veren, kontrol değişkenleri setleri civarında aranması sağlanır.

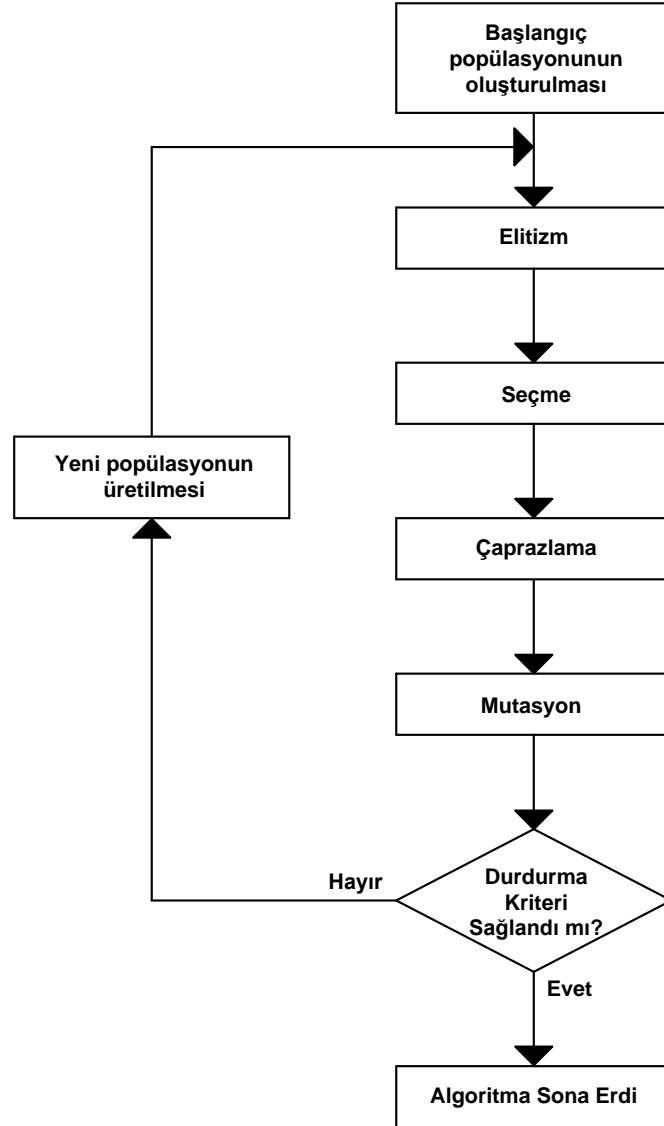
4.3. GA ve AA–DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabına Uygulanması

Bu bölümde sezgisel tabanlı yöntemlerden biri olan GA ve bu algoritmanın AA-DA sisteminde yapılan optimal güç akışı hesabına uygulanması açıklanmıştır.

4.3.1. GA ve genel optimizasyon hesaplamalarına uygulanması

GA evrimsel süreç tabanlı sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. İlk kez 1975 yılında Holland tarafından önerilmiş ve optimizasyon problemlerinin çözümlerinde kullanılmıştır [95]. Diğer sezgisel yöntemlerin gelişmesine temel teşkil etmiş ve önayak olmuştur. GA evrim sürecinin temeli olan doğal seleksiyon sürecini taklit eder. Doğal seleksiyon sürecinde bir birey doğar, büyür ve ölür. Bu süreçte en sağlam bireylerin ve bu bireylere ait sonraki jenerasyonların hayatta kalma şansları en yüksektir.

GA iki temel öğeden oluşur: birey ve bireye ait genler. Nümerik optimizasyon açısından her bir birey, optimizasyon problemine ait olası çözüm kümesine, bireylere ait genler ise olası çözüm kümesini oluşturan optimizasyon problemine ait parametre değerlerine karşılık gelmektedir. Algoritmanın temel işleyişi, Şekil 4.5'te verilen işaret akış diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 4.5. GA' ya Ait Genel İşaret Akış Şeması

4.3.1.1. Başlangıç popülasyonunun üretilmesi

Algoritmanın başlangıcında, optimize edilecek probleme ait parametrelerin sınır değerleri içerisinde kalan rastgele bireyler üretilir:

$$ind_{ij} = ind_{\min j} + rand(0.1) \times (ind_{\max j} - ind_{\min j}) \quad (i = 1 \dots n_{ind}) \quad (j = 1 \dots n_p) \quad (4.59)$$

(4.59) eşitliğinde, n_{ind} ve n_p sırasıyla popülasyon büyüklüğünü (yani, birey sayısını) ve optimize edilecek probleme ait optimizasyona katılacak parametre sayısını göstermektedir. Dolayısıyla oluşturulan ind_{ij} matrisinin her bir satırı bireyleri, her bir

sütündeki eleman ise ilgili satıra yani bireye ait genleri göstermektedir. Daha önceden açıklandığı üzere, her bir birey optimizasyon problemine ait olası çözüm kümesini, genler ise olası çözüm kümesini oluşturan optimizasyon problemine ait parametre değerlerini göstermektedir. min ve max alt indisleri, ilgili parametrenin sırasıyla alt ve üst sınırını ifade etmektedir. GA içinde birey sayısının fazla olması, daha iyi bir optimal çözümün bulunmasını güçlendirir. Ancak, ulaşılabilecek optimal sonucu sağlayan birey sayısının arttırılması sonucu değiştirmez, hatta algoritma süresinin uzamasına neden olur. Bu sebeple, yapılan optimizasyon çalışmalarında en ideal birey sayısı, denemeler sonucunda tespit edilir ve oluşturulan başlangıç bireyleri, seçme sürecine gönderilir.

4.3.1.2. Seçme

Seçme sürecinde, belirlenen bireyler arasından yeni bireyler (çocuk) elde etmek için, kullanılacak birey (anne – baba) seçimi yapılır. Seçim işlemi, bu sürece ulaşan bireylerin uygunluk değerlerine göre yapılır. Bir bireyin uygunluk değeri;

$$fit_i = K_{GA} + f_i \quad (i = 1 \dots n_{ind}) \quad (4.60)$$

eşitliği ile hesaplanır. (4.60) eşitliğinden görüleceği üzere, minimizasyon amaçlı optimizasyon çalışması için, uygunluk değeri en düşük bireyin en iyi birey olduğu aşıkardır. (4.60) eşitliğinde, K_{GA} ; uygunluk değerini negatif yapmayacak kadar büyük, pozitif, sabit bir sayıdır. Seçim işlemi için literatürde rulet tekerleği, turnuva yöntemi, sıralı seçim kriteri ve uygunluk ölçeklendirme yöntemi gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Bu tezdeki çalışmada uygunluk ölçeklendirme yöntemi kullanılmıştır. Ölçeklendirme yönteminde, tüm bireylere ait uygunluk değerlerinin ortalaması;

$$fit_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{ind}} fit_i}{n_{ind}} \quad (4.61)$$

eşitliği ile hesaplanır. Seçim havuzu ise, uygunluk değeri (4.61) eşitliği ile elde edilen ortalama uygunluk değerinden küçük olan bireyler seçilerek oluşturulur. Şayet hiçbir birey bu şartı sağlamazsa, uygunluk değeri en küçük birey seçilerek seçim havuzu oluşturulur. Bu durum özellikle, algoritmanın ilerleyen bölümlerinde ortaya çıkmaktadır. Algoritma ilerledikçe, ortalama uygunluk değerinin altında bulunan

birey sayısı azalır. Bunun sonucunda, Bölüm 4.3.1.3' te anlatılacak olan çaprazlama sürecinde oluşturulacak çocuk bireyler birbirlerine benzemeye başlarlar. Dolayısıyla, daha iyi bir çözüm üretecek yeni bireylerin oluşmasının önü tıkanır ve algoritmanın yerel minimuma takılma olasılığı artar. Bu sebeple uygulamada, bahsedilen seçim havuzu oluşturulduktan sonra, havuza ait birey sayısı, belirlenen çocuk birey sayısı ($n_{\text{çocuk}}$) olacak şekilde, belirlenen sınırlar içerisinde rastgele üretilmiş yeni bireylerin ya da seçilmemiş (mevcut bireylerden üretilmiş) yeni bireylerin havuza eklenmesi uygun olacaktır.

Literatürde, seçme işleminden önce, bu sürece gönderilecek bireyler üzerinde elitizm işleminin uygulandığı GA çalışmaları bulunmaktadır [96]. Elitizm işleminde, seçme işlemine gönderilecek popülasyon büyüklüğündeki bireyler içerisinde belirlenen sayıdaki uygunluk değeri en iyi bireyler hafızaya alınır. Böylelikle hafızaya alınan bu bireylerin bir sonraki jenerasyonda yer almaları garantiye alınır. Seçme işlemine, elitizm işlemi ile hafızaya alınan bireyler dışında kalan bireyler gönderilir. Tezde, elitizm işlemi uygulanmamış, popülasyon büyüklüğündeki bireylerin tamamı seçme sürecine dahil edilmiştir.

4.3.1.3. Çaprazlama

Çaprazlama sürecinde, seçme sürecinde oluşturulmuş havuza ait bireylerden, yeni bireyler üretilir. Seçim havuzundaki bireyler, anne – baba ve bunlar üzerinden türetilen yeni bireyler çocuk olarak isimlendirilir. Çocuk sayısı algoritmanın başlangıcında belirlenir ve bu sayı genellikle popülasyon sayısının yarısı olarak seçilir. Çaprazlama işlemi için literatürde tek noktalı çaprazlama, iki noktalı çaprazlama, çok noktalı çaprazlama, düzenli çaprazlama ve dağılmış parametrelili çaprazlama gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Bu tezdeki çalışmada, GA için dağılmış parametrelili çaprazlama seçilmiştir. Düzenli çaprazlama işlemi, seçim havuzundaki bireyler arasından farklı iki adet bireyin rastgele seçilmesi ile başlar. Bu bireylerden biri anne diğeri baba olarak rastgele belirlenir. Oluşturulacak çocuğun her bir geni için [0-1] aralığında rastgele bir sayı üretilir ve bu sayı yuvarlanarak 0 ya da 1 sayısına ulaşılır. 0 ve 1 olarak üretilen bu iki sayı, anne ve baba olarak belirlenen bireyin hangisinden, ilgili genin çocuğa aktarılacağını belirlemek için

kullanılır. Anne için 0, baba için 1 seçilebileceği gibi, tersi durum da geçerlidir. Bu tezde, ilk durum tercih edilmiştir. Şayet çocuğa ait i. gen için belirlenen sayı 0 ise, anneye ait i. gen, 1 ise babaya ait i. gen, çocuğun i. geni olarak aktarılır. Çaprazlama işlemini daha iyi anlayabilmek için, Tablo 4.1 incelenmelidir.

Tablo 4.1. Örnek Çaprazlama İşlemi

	Genler							
Anne	a	b	c	d	e	f	g	h
Baba	r	s	t	u	w	x	y	z
Çaprazlama Kodu	1	0	0	1	0	1	1	0
Çocuk	r	b	c	u	e	x	y	h

Elde edilen yeni çocuk bireyler, mevcut bireylere eklenir. Böylelikle, çaprazlama işlemi sonucunda mevcut popülasyon büyüklüğü, çocuk birey sayısı kadar artar. Elde edilen yeni çocuk bireyler için uygunluk değerleri (4.60) eşitliği ile hesaplanır.

4.3.1.4. Mutasyon

Mutasyon sürecinde, çaprazlama sonucunda çocuk bireylerin de eklenmesiyle oluşan popülasyon içindeki bireylere ait genlerin bazılarının değiştirilmesi işlemi yapılır. Bundaki amaç, seçme ve çaprazlama işlemleri sırasında popülasyona ait iyi özelliklerin kaybolmasını ve üretilen çocukların ebeveynlerin kopyası olmasını engellemektir. Mutasyon işlemi yapılmadığı takdirde, algoritmanın ilerleyen aşamalarında, yeni bireyler üretilemez hale gelir ve bunun sonucunda optimizasyon için daha iyi bir çözümün geliştirilmesi mümkün olmaz.

Mutasyon işlemi ters çevirme, ekleme, yer değişikliği ve karşılıklı değişim gibi çeşitli şekillerde yapılabilir. Ters çevirme mutasyonu işleminde mevcut popülasyon içerisindeki bazı gen ya da gen grupları kendi içerisinde ters çevrilir. Ekleme mutasyonu işleminde seçilen bazı gen ya da gen grupları, popülasyon içerisindeki bazı gen ya da gen gruplarının yerine yazılır. Yer değişikliği yöntemi ile mutasyon yapıldığında, seçilen bazı gen grupları yer değiştirilir. Karşılıklı değişim

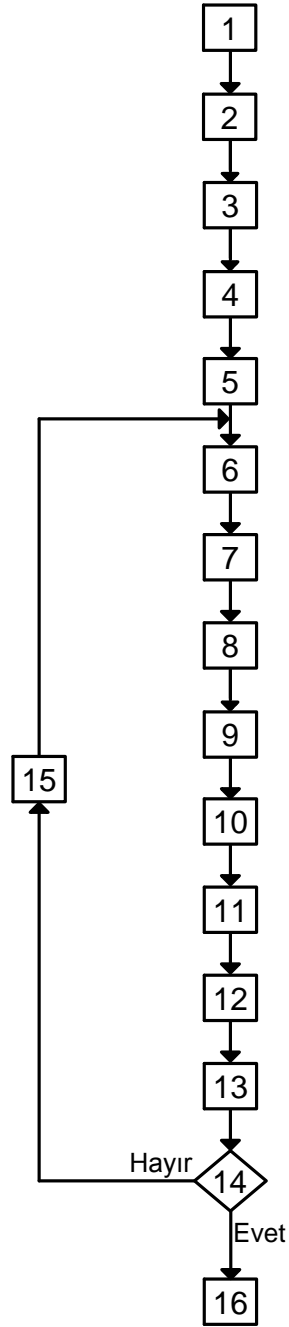
mutasyonunda ise yer değişikliği yöntemi ile yapılan mutasyondan farklı olarak değişim, gen grupları şeklinde değil, tek tek yapılır. Bahsedilen tüm mutasyon işlemlerinde seçilen gen ya da gen grupları rastgele belirlenir. Algoritma içerisinde mutasyon işlemi belirlenen mutasyon oranı (mo) çerçevesinde uygulanır ve bu oranın %1-5 arasında olması tavsiye edilir [96].

Seçme ve çaprazlama işlemi sonrasında ebeveyn ve çocuklardan oluşan bireyler mutasyon işlemine tabi tutulmadan önce, bu bireyler ve bunlara ait uygunluk değerleri hafızada tutulur. Daha sonra, bu bireylere mutasyon işlemi uygulanarak, mutasyona uğramış bireyler yeni bireyler olarak ele alınır ve bunların uygunluk değerleri (4.60) eşitliği ile hesaplanır. Seçme ve çaprazlama işlemi sonrasındaki ebeveyn ve çocuklar ile elde edilen mevcut popülasyona, mutasyon işlemi sonrasında elde edilen yeni bireyler eklenerek, tüm bireyler uygunluk değerlerine göre sıralanır. Uygunluk değerleri en küçük yani en iyi n_p (algoritma başlangıcında belirlenen popülasyon büyüklüğü yani birey sayısı) kadar birey, yeni popülasyon olarak belirlenir. Yeni popülasyona ait bireylerden uygunluk değeri en küçük olan birey ve bu bireye ait genler hafızaya alınır. Mevcut durum için bu birey, optimize edilecek amaç fonksiyonu için optimal sonucu veren çözüm kümesini ve bu bireye ait genler ise, optimal sonucu veren çözüm kümesine ait parametre değerlerini oluşturur.

4.3.1.5. Durdurma kriteri

GA için YAK algoritmasında olduğu gibi durdurma kriteri olarak; maksimum çevrim sayısı veya belli bir hata değeri veya belli bir çalışma süresi ya da farklı optimizasyon algoritmalarında kullanılan herhangi bir kriter kullanılabilir. Bu tezde, çalışmada durdurma kriteri olarak, maksimum çevrim sayısı alınmıştır. Çevrim sayısı, belirlenen maksimum çevrim sayısını aşarsa, algoritma sonlandırılır. Aksi halde, algoritma Bölüm 4.3.1.2' de açıklanan seçme sürecine dönerek devam eder.

Optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılacak GA' ya ait adımlar Şekil 4.6' da görülen işaret akış şemasında anlatılmıştır.



Şekil 4.6. GA' ya Ait Detaylı İşaret Akış Şeması

Adım 1. Popülasyon büyüklüğünü (birey sayısını), çocuk sayısını, mutasyon oranını, optimize edilecek problemin parametre sayısını ve maksimum çevrim sayısını gir.

Adım 2. Optimize edilecek probleme ait parametrelerin alt ve üst sınır değerlerini belirle.

Adım 3. Belirlenen popülasyon büyüklüğünde başlangıç popülasyonuna ait bireyleri (4.59) eşitliği ile belirle. Bu bireylerin oluşturduğu popülasyonu, mevcut popülasyon olarak ele al.

Adım 4. Başlangıç popülasyonu bireyelerine ait uygunluk değerlerini, (4.60) eşitliği ile hesapla.

Adım 5. İterasyona başla ($ite_{GA} = 1$).

Adım 6. Çaprazlama işleminde kullanılacak ebeveyn bireyleri mevcut popülasyon içerisinde Bölüm 4.3.1.2' de açıklandığı şekilde seç ve seçilen bireyler ile seçim havuzunu oluştur.

Adım 7. Adım 6' da oluşturulan seçim havuzundaki ebeveynlerden Bölüm 4.3.1.3' te açıklandığı şekilde, belirlenen çocuk sayısı kadar yeni çocuk bireyleri oluştur ve bu bireylere ait uygunluk değerlerini (4.60) eşitliği ile hesapla.

Adım 8. Adım 7' de oluşturulan yeni çocuk bireyleri mevcut popülasyona ekle.

Adım 9. Adım 8' de oluşturulan popülasyon üzerinden belirlenen mutasyon oranı çerçevesinde, Bölüm 4.3.1.4' te açıklanan mutasyon işlemini uygulayarak, yeni mutasyonlu bireyleri oluştur. Bu bireyle ait uygunluk değerlerini (4.60) eşitliği ile hesapla.

Adım 10. Adım 9' da oluşturulan yeni mutasyonlu bireyleri Adım 8' de elde edilen mevcut popülasyona ekle.

Adım 11. Adım 10' da elde edilen mevcut popülasyona ait bireyleri uygunluk değerlerine göre sırala. Algoritma başlangıcında belirlenen popülasyon büyüklüğü (birey sayısı) kadar sıralamadaki uygunluk değeri en küçük bireylerden yeni popülasyon oluştur.

Adım 12. Adım 11' de oluşturulan yeni popülasyon içerisinde uygunluk değeri en küçük olan bireye ait uygunluk değerini ve parametre değerlerini hafızaya al. Bu değerler, probleme ilişkin şu ana kadar karşılaşılan en iyi çözüm kümesidir.

Adım 13. İterasyon sayısını bir arttır ($ite_{GA} = ite_{GA} + 1$).

Adım 14. Durdurma kriterini kontrol et ($ite_{GA} > ite_{GA}^{max}$).

Adım 15. Adım 12' de elde edilen yeni popülasyonu mevcut popülasyon kabul ederek Adım 6' ya dön.

Adım 16. Algoritma sona erdi. Hafızadaki en iyi uygunluk değeri ve bu uygunluk değerinin ait olduğu gen (parametre) bilgileri ile çıkış yap.

GA' nın nümerik optimizasyon çözümlerinde nasıl kullanıldığı, (4.62) eşitliğinde verilen örnek amaç fonksiyonu üzerinden daha açık bir şekilde açıklanabilir:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \quad (4.62)$$

(4.62) eşitliğinden görüleceği üzere, optimum değeri bulunmaya çalışılan amaç fonksiyonu, x_1 , x_2 , x_3 ve x_4 adlı dört parametreden oluşmaktadır. Burada anlatılacak örnek problemde, yukarıda verilen dört parametrenin tümü, optimizasyon parametresi olarak alınmıştır. Amaç fonksiyonunun optimizasyonu için GA' da kullanılacak popülasyon birey sayısı, çocuk sayısı ve maksimum çevrim sayısı;

$$n_p = 4 \quad (4.63)$$

$$n_{\text{çocuk}} = 2 \quad (4.64)$$

$$ite_{GA}^{\max} = 5 \quad (4.65)$$

olarak belirlensin. Amaç fonksiyonuna ait parametrelerin alt ve üst sınır değerleri;

$$\begin{cases} x_{1_{\min}} \leq x_1 \leq x_{1_{\max}} \\ x_{2_{\min}} \leq x_2 \leq x_{2_{\max}} \\ x_{3_{\min}} \leq x_3 \leq x_{3_{\max}} \\ x_{4_{\min}} \leq x_4 \leq x_{4_{\max}} \end{cases} \quad (4.66)$$

ifadesiyle verilsin. Aşağıda verilen sayısal değerler, GA ile ilgili daha önceden verilen eşitliklerle doğrudan hesaplanmamıştır. Bu değerlerin bu şekilde hesaplandığı varsayılarak, GA sürecinin, sayısal optimizasyon işleminde yer alış şeklini göstermek için kullanılmıştır. Algoritmaya $ite_{GA} = 1$ ile başlanır. (4.59) eşitliği ile yapılan hesaplamalar için başlangıç popülasyonunun;

$$ind = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \left[\begin{array}{cccc} 1 & 9 & 5 & 3 \\ 6 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 5 & 7 \\ 8 & 6 & 4 & 0 \end{array} \right] & \text{---} & > & \begin{array}{l} 1. \text{ birey} \\ 2. \text{ birey} \\ 3. \text{ birey} \\ 4. \text{ birey} \end{array} \end{matrix} \quad (4.67)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. Bulunan bireyler, mevcut durumdaki popülasyon bireyleridir. Seçme sürecine başlamak için, (4.60) eşitliği kullanılarak, mevcut popülasyona ait uygunluk değerleri;

$$fit_1 = 10 \quad (4.68)$$

$$fit_2 = 20 \quad (4.69)$$

$$fit_3 = 30 \quad (4.70)$$

$$fit_4 = 40 \quad (4.71)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. Bulunan uygunluk değerleri için ortalama uygunluk değeri, (4.61) eşitliği ile;

$$fit_{ort} = 25 \quad (4.72)$$

olarak bulunur. Bu durumda, 1. ve 2. bireye ait uygunluk değerleri, ortalama uygunluk değerinden daha küçük olduğu için, çaprazlama işleminde kullanılacak havuza gönderilir:

$$ind_{havuz} = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \left[\begin{array}{cccc} 1 & 9 & 5 & 3 \\ 6 & 4 & 1 & 2 \end{array} \right] & \begin{array}{l} \text{---} > 1. \text{ birey} \\ \text{---} > 2. \text{ birey} \end{array} \end{matrix} \quad (4.73)$$

(4.73) eşitliğinde, havuzdaki bireylerin ebeveyn olarak kullanılarak yapılan çaprazlama işlemi için elde edilen iki adet çocuk bireyin;

$$ind_{\text{çocuk}_1} = [7 \quad 2 \quad 1 \quad 4] \quad (4.74)$$

$$ind_{\text{çocuk}_2} = [5 \quad 8 \quad 9 \quad 3] \quad (4.75)$$

olarak bulunduğu ve bunlara ait uygunluk değerlerinin (4.60) eşitliği ile,

$$fit_{\text{çocuk}_1} = 15 \quad (4.76)$$

$$fit_{\text{çocuk}_2} = 35 \quad (4.77)$$

olarak hesaplandığı kabul edilsin. Mutasyonlu birey üretmek üzere mevcut popülasyona (4.74) ve (4.75) eşitliği ile elde edilen yeni çocuk bireyler eklenerek yeni popülasyon;

$$ind = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \left[\begin{array}{cccc} 1 & 9 & 5 & 3 \\ 6 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 5 & 7 \\ 8 & 6 & 4 & 0 \\ 7 & 2 & 1 & 4 \\ 5 & 8 & 9 & 3 \end{array} \right] & \begin{array}{l} \text{---} > 1. \text{ birey} \\ \text{---} > 2. \text{ birey} \\ \text{---} > 3. \text{ birey} \\ \text{---} > 4. \text{ birey} \\ \text{---} > 1. \text{ çocuk birey} \\ \text{---} > 2. \text{ çocuk birey} \end{array} \end{matrix} \quad (4.78)$$

olarak elde edilir. (4.78) eşitliği ile bulunan popülasyon üzerinde yapılan mutasyon işlemi sonucu sadece 2. çocuk bireyin 1. geni (x_1) ve 2. geninin (x_2) yer değiştirildiği kabul edilsin. Bu durumda bir adet mutasyonlu birey elde edilir.

$$ind_{mutasyon_1} = [8 \ 5 \ 9 \ 3] \quad (4.79)$$

(4.79) eşitliği ile elde edilen yeni mutasyonlu bireyin uygunluk değerinin (4.60) eşitliği ile,

$$fit_{mutasyon_1} = 25 \quad (4.80)$$

olarak bulunduğu kabul edilsin. (4.79) eşitliği ile elde edilen yeni mutasyonlu birey mevcut popülasyona eklenerek yeni popülasyon;

$$ind = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \left[\begin{array}{cccc} 1 & 9 & 5 & 3 \\ 6 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 5 & 7 \\ 8 & 6 & 4 & 0 \\ 7 & 2 & 1 & 4 \\ 5 & 8 & 9 & 3 \\ 8 & 5 & 9 & 3 \end{array} \right] & \begin{array}{l} \text{---} > 1. \text{ birey} \\ \text{---} > 2. \text{ birey} \\ \text{---} > 3. \text{ birey} \\ \text{---} > 4. \text{ birey} \\ \text{---} > 1. \text{ çocuk birey} \\ \text{---} > 2. \text{ çocuk birey} \\ \text{---} > 1. \text{ mutasyonlu birey} \end{array} \end{matrix} \quad (4.81)$$

olarak elde edilir. (4.81) eşitliğindeki bireylerin uygunluk değerleri küçükten büyüğe doğru olacak şekilde sıralanır ve bu sıralamanın en küçük ilk $n_p = 4$ adedi alınır, algoritmanın ilerleyen iterasyonlarına aktarılacak yeni popülasyon;

$$ind = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \left[\begin{array}{cccc} 1 & 9 & 5 & 3 \\ 7 & 2 & 1 & 4 \\ 6 & 4 & 1 & 2 \\ 8 & 5 & 9 & 3 \end{array} \right] & \begin{array}{l} \text{---} > 1. \text{ birey (1. bireye ait genler, } fit_1 = 10) \\ \text{---} > 2. \text{ birey (1. çocuk bireye ait genler, } fit_{çocuk_1} = 15) \\ \text{---} > 3. \text{ birey (2. bireye ait genler, } fit_1 = 20) \\ \text{---} > 4. \text{ birey (1. mutasyonlu bireye ait genler, } fit_{çocuk_1} = 25) \end{array} \end{matrix} \quad (4.82)$$

olarak elde edilir. (4.82) eşitliğindeki uygunluk değeri en iyi olan birey hafızaya alınır. Bu birey mevcut durumda optimize edilecek amaç fonksiyonu için optimal sonucu veren çözüm kümesi, bu bireye ait genler ise optimal sonucu sağlayan çözüm kümesine ait parametre değerleri olur:

$$f_{opt}(x_1, x_2, x_3, x_4) = f(1, 9, 5, 3) \quad (4.83)$$

Algoritma iterasyon sayısı bir arttırılır ve maksimum çevrim sayısının aşılmadığı kontrol edilir:

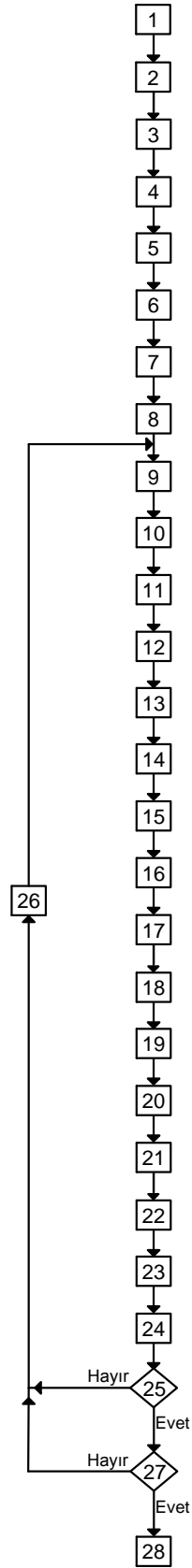
$$ite_{GA} = ite_{GA} + 1 = 2 \quad (4.84)$$

$$ite_{GA} \leq ite_{GA}^{\max} = 5 \quad (4.85)$$

Maksimum çevrim sayısı aşılmadığından, (4.82) eşitliği ile elde edilen yeni popülasyon bilgileri, mevcut popülasyon bilgileri olarak seçme sürecine gönderilir ve daha önce açıklanan işlemlere maksimum çevrim sayısı aşılanaya kadar devam edilir.

4.3.2. GA' nın AA-DA sisteminde optimal güç akışı hesabına uygulanması

GA'nın AA-DA sistemine ilişkin optimal güç akışı hesabında, Bölüm 4.2.2' de verilen bilgiler ışığında, algoritma içerisinde kullanılacak amaç fonksiyonu, (4.58) eşitliğinde verildiği gibi olacaktır. GA' nın, AA-DA sisteminde yapılacak optimal güç akışı hesabına uygulanmasına ilişkin işaret akış şeması, Şekil 4.7' de verilmiştir.



Şekil 4.7. AA-DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabı için Uygulanan GA' ya Ait İşaret Akış Şeması

Adım 1. Popülasyon büyüklüğünü (birey sayısını), çocuk sayısını, mutasyon oranını, (4.58) eşitliğindeki amaç fonksiyonuna ait (4.15) eşitliği ile verilen optimizasyon kontrol değişkenleri setindeki parametre sayısını ve maksimum çevrim sayısını gir.

Adım 2. (4.15) eşitliği ile verilen optimizasyon kontrol değişkenleri setine ait parametrelerin alt ve üst sınır değerlerini belirle.

Adım 3. Belirlenen popülasyon büyüklüğünde başlangıç popülasyonuna ait bireyleri (4.59) eşitliği ile belirle. Bu bireylerin oluşturduğu popülasyonu mevcut popülasyon olarak ele al.

Adım 4. Başlangıç popülasyonu bireyelerine ait parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri) için AA-DA güç akışı hesaplaması yap.

Adım 5. Başlangıç popülasyonu bireyleri için (4.2) ve (4.3) eşitlikleri yardımı ile jeneratör üretim maliyetini ve toplam aktif güç kaybını hesapla.

Adım 6. Başlangıç popülasyonu bireyleri için (4.58) eşitliğini kullanarak amaç fonksiyon değerini hesapla.

Adım 7. Başlangıç popülasyonu bireyelerine ait uygunluk değerlerini (4.60) eşitliği ile hesapla.

Adım 8. İterasyona başla ($ite_{GA} = 1$).

Adım 9. Çaprazlama işleminde kullanılacak ebeveyn bireyelerini, mevcut popülasyon içerisinde, Bölüm 4.3.1.2' de açıklandığı şekilde seç ve seçilen bireyeler ile seçim havuzunu oluştur.

Adım 10. Adım 9' da oluşturulan seçim havuzundaki ebeveynlerden, Bölüm 4.3.1.3' te açıklandığı şekilde belirlenen çocuk sayısı kadar yeni çocuk bireyelerini oluştur.

Adım 11. Adım 10' da belirlenen çocuk bireyelerine ait parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri) için AA-DA güç akışı hesaplaması yap.

Adım 12. Çocuk bireyeler için (4.2) ve (4.3) eşitlikleri ile jeneratör üretim maliyetini ve toplam aktif güç kaybını hesapla.

Adım 13. Çocuk bireyeler için (4.58) eşitliğini kullanarak amaç fonksiyon değerini hesapla.

Adım 14. Çocuk bireyelerine ait uygunluk değerlerini (4.60) eşitliği ile hesapla.

Adım 15. Adım 10' da oluşturulan yeni çocuk bireyelerini mevcut popülasyona ekle.

Adım 16. Adım 15' te oluşturulan popülasyon üzerinden belirlenen mutasyonu oranı çerçevesinde, Bölüm 4.3.1.4' de açıklanan mutasyon işlemini uygulayarak, yeni mutasyonlu bireyelerini oluştur.

Adım 17. Adım 16' da belirlenen mutasyonlu bireylere ait parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri) için AA-DA güç akışı hesaplaması yap.

Adım 18. Mutasyonlu bireyler için (4.2) ve (4.3) eşitlikleri yardımı ile jeneratör üretim maliyetini ve toplam aktif güç kaybını hesapla.

Adım 19. Mutasyonlu bireyler için (4.58) eşitliğini kullanarak amaç fonksiyon değerini hesapla.

Adım 20. Mutasyonlu bireylere ait uygunluk değerlerini (4.60) eşitliği ile hesapla.

Adım 21. Adım 16' da oluşturulan yeni mutasyonlu bireyleri, Adım 15' te elde edilen mevcut popülasyona ekle.

Adım 22. Adım 21'de elde edilen mevcut popülasyona ait bireyleri uygunluk değerlerine göre sırala. Algoritma başlangıcında belirlenen popülasyon büyüklüğü (birey sayısı) kadar, sıralamadaki uygunluk değeri en küçük bireylerden yeni popülasyon oluştur.

Adım 23. Adım 22' de oluşturulan yeni popülasyon içerisinde uygunluk değeri en küçük olan bireye ait uygunluk değerini ve parametre değerlerini hafızaya al. Bu uygunluk değerine ait parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri), (4.58) eşitliği ile verilen amaç fonksiyonuna ilişkin (şu ana kadar elde edilen) en uygun çözüm kümesidir.

Adım 24. İterasyon sayısını bir arttır ($ite_{GA} = ite_{GA} + 1$).

Adım 25. Durdurma kriterini kontrol et ($ite_{GA} > ite_{GA}^{max}$).

Adım 26. Adım 22' de elde edilen yeni popülasyonu mevcut popülasyon olarak ele alarak Adım 9' a dön.

Adım 27. En iyi uygunluk değerinin elde edildiği kaynağa ilişkin, optimizasyon kontrol değişkenleri için yapılan, AA-DA güç akışı algoritmasına ait tüm kontrol ve durum değişkenleri, sınır değerleri içinde mi?

Adım 28. Algoritma sona erdi. Hafızadaki en iyi uygunluk değeri, bu uygunluk değerinin ait olduğu bireyin parametre değerleri (optimizasyon kontrol değişkenleri), bu parametre değerleri ile elde edilen AA-DA güç akışı algoritması sonuçları ile çıkış yap.

Adım 27' de yapılan kontrol ile GA için belirlenen durdurma kriteri sağlandıktan sonra, sistem kısıtlamalarının tamamının sağlanmaması durumunda, kısıtlamalar sağlanana kadar optimizasyon algoritmasının devam etmesi sağlanır.

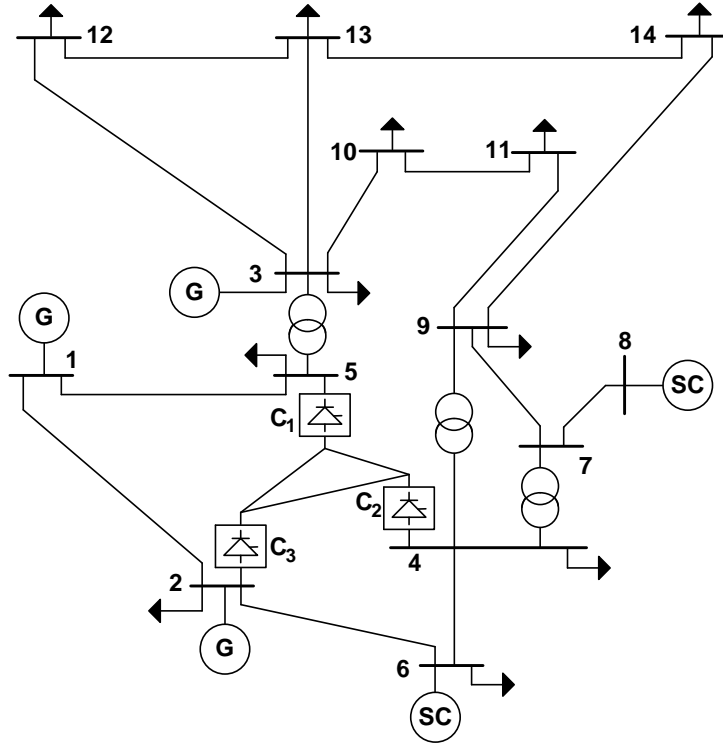
Bölüm 3' de açıklandığı üzere, çeşitli nedenlerle, yakınsama sağlanamadığı için AA-DA güç akışı algoritmasına ait maksimum iterasyon sayılarının aşılması durumunda, AA-DA güç akışı algoritması durdurulmaktadır. Bu durumda, güç akışı sonuçları elde edilemediğinden, (4.2) eşitliği ile verilen jeneratör üretim maliyeti ve (4.3) eşitliği ile verilen toplam aktif güç kaybı hesaplanamaz. Dolayısıyla (4.58) eşitliği ile verilen amaç fonksiyonu da hesaplanamaz. Bu sebeple, Bölüm 3' te açıklandığı üzere, AA-DA güç akışı algoritmasında yakınsama sağlanamadan optimal güç akışı algoritmasına dönülürken, jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybı için rastgele nispeten çok büyük değerler verilir. Bundaki amaç, (4.58) eşitliği ile verilen amaç fonksiyonu değerini çok büyük yaparak, yakınsama sağlanamayan AA-DA güç akışı algoritmasına ait kontrol değişkenleri setini belirleyen bireye ait uygunluk değerini çok büyük yapmaktır. Böylelikle, GA' ya ait optimizasyon iterasyonu içerisindeki AA-DA güç akışı için yakınsamayı sağlayan kontrol değişkenlerini içeren diğer bireylerin uygunluk değerlerinin, yakınsamayı sağlayamayan bireylerin uygunluk değerlerinden daha küçük, yani daha iyi olması sağlanır. Bu sayede, hem her optimizasyon iterasyonu sonunda AA-DA güç akışı algoritması için optimal sonucu veren kontrol değişkenleri seti, yakınsamayı sağlayanlar içerisinde seçilir, hem de ilerleyen optimizasyon iterasyonlarında güncellenecek kontrol değişkenleri setlerinin, ağırlıklı olarak mevcut yakınsama sağlamış, optimal sonucu veren, kontrol değişkenleri setleri civarında aranması sağlanır.

BÖLÜM 5. ÖNERİLEN OPTİMAL AA-DA GÜÇ AKIŞI YAKLAŞIMININ UYGULAMASI

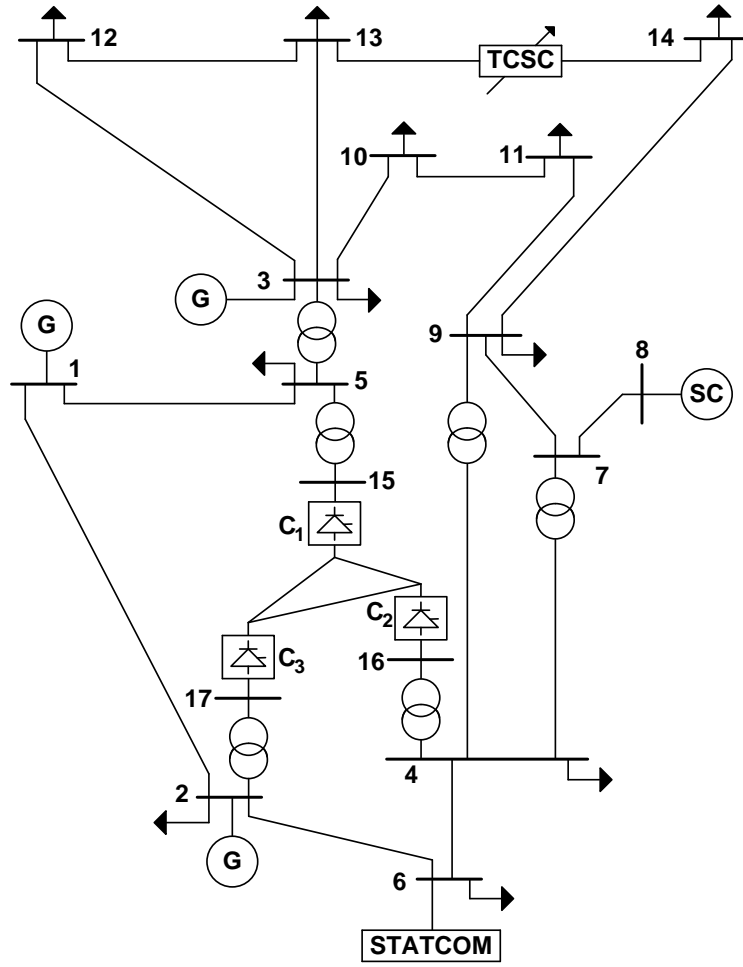
Bu tezde YAK algoritması ve GA ile AA-DA sisteminde optimal güç akışı hesabı için önerilen çalışma, değiştirilmiş IEEE 14 baralı AA-DA test sisteminin yeniden değiştirilmesiyle elde edilen 17 baralı AA-DA test sistemine uygulanmıştır. Çalışma süresince AA ve DA sistemi için baz güç olarak 100 MW alınmıştır.

5.1. Optimal AA-DA Güç Akışı Algoritmasının Uygulandığı Test Sistemi

Değiştirilmiş IEEE 14 baralı AA-DA test sistemi Şekil 5.1' de ve bu sistemin yeniden değiştirilmesi ile elde edilen 17 baralı AA-DA test sistemi Şekil 5.2' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Değiştirilmiş IEEE 14 Baralı AA-DA Test Sistemi



Şekil 5.2. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemi

Değiştirilmiş IEEE 17 baralı AA-DA test sisteminin bara sayısının Şekil 5.1' de verilen test sistemi bara sayısından 3 fazla olmasının sebebi, Bölüm 3.2.1' de açıklandığı üzere, önerilen çalışmada çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek eşdeğer devrelerinin göz önüne alınmasıdır. Şekil 5.1' de, test sisteminin bir önceki halinden görüleceği üzere, çevirici transformatörleri ideal kabul edilmeleri sebebiyle, test sisteminde gösterilmemiş, transformatör giriş ve çıkışı için ayrı bir bara ilave edilmemiştir.

Şekil 5.2' de verilen test sistemine ait bilgiler Tablo 5.1-5.10' da verilmiştir. Tablolarda görülen (b) ifadesi, "birim değer" anlamındadır.

Tablo 5.1. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait AA Hat Empedans ve Admitans Büyüklükleri

HAT NO	BARA NO		HAT EMPEDANSI		ŞÖNT ADMİTANS b (b)
	i	→ j	r (b)	x (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
8	4	9	0	0.55261	0
9	5	3	0	0.25202	0
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	0.08450	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
18	5	15	0	0.20912	0
19	4	16	0	0.20912	0
20	2	17	0	0.20912	0

Tablo 5.2. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait Kademe Ayarlı Transformatör Dataları

TRAFO NO	BARA NO		KADEME AYAR ADIM DEĞERİ	KADEME AYAR ALT SINIR DEĞERİ	KADEME AYAR ÜST SINIR DEĞERİ
	k	→ m			
t_1	5	3	0.025	0.9	1.1
t_2	4	9	0.025	0.9	1.1
t_3	4	7	0.025	0.9	1.1
t_{d_1}	5	15	0.025	0.9	1.1
t_{d_2}	4	16	0.025	0.9	1.1
t_{d_3}	2	17	0.025	0.9	1.1

Tablo 5.3. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait AA Yük Değerleri ve Jeneratör Üretim Maliyet Katsayıları

BARA NO	YÜK		ÜRETİM MALİYET KATSAYILARI		
	p_y (b)	q_y (b)	a_{g_i} (\$/ saat)	b_{g_i} (\$/ saat)	c_{g_i} (\$/ saat)
1	0	0	50	245	105
2	0.217	0.127	50	351	44.4
3	0.112	0.075	50	389	40.6
4	0.478	0.040			
5	0.076	0.016			
6	0.942	0.190			
7	0	0			
8	0	0			
9	0.295	0.166			
10	0.090	0.058			
11	0.035	0.018			
12	0.061	0.016			
13	0.135	0.058			
14	0.149	0.050			
15	0	0			
16	0	0			
17	0	0			

Tablo 5.3' de, jeneratör üretim maliyet katsayıları olan a_{g_i} , b_{g_i} ve c_{g_i} değerleri, aktif güçler için birim değer cinsinden verilmiştir. Dolayısıyla jeneratör üretim maliyetini veren (4.2) eşitliğinde, (bu katsayılar için) jeneratör aktif güçlerine ait birim değerler kullanılmıştır. Şayet (4.2) eşitliğinde jeneratörlere ait gerçek aktif güç değerleri (MW cinsinden) kullanılmak istenirse, jeneratör üretim maliyet katsayılarının yeni değerleri ve birimleri, Tablo 5.3' de verilen maliyet katsayı birimleri kullanılarak, aşağıdaki gibi hesaplanacaktır:

$$A_{g_i} = \frac{a_{g_i}}{P_{AA_{baz}}^2} \quad (\$/MW^2\text{ saat}) \quad (5.1)$$

$$B_{g_i} = \frac{b_{g_i}}{P_{AA_{baz}}} \quad (\$/MW\text{ saat}) \quad (5.2)$$

$$C_{g_i} = c_{g_i} \quad (\$/\text{ saat}) \quad (5.3)$$

Tablo 5.4. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait AA Değişkenlerine İlişkin Sınır Değerleri

BARA NO	v^{\min}	v^{\max}	p_g^{\min}	p_g^{\max}	q_g^{\min}	q_g^{\max}
	(b)		(b)		(b)	
1	0.9	1.1	0.3	2	-0.6	0.6
2	0.9	1.1	0.3	1.2	-0.6	0.6
3	0.9	1.1	0.3	1.2	-0.6	0.6
4	0.9	1.1				
5	0.9	1.1				
6	0.9	1.1			-0.6	0.6
7	0.9	1.1				
8	0.9	1.1			-0.6	0.6
9	0.9	1.1				
10	0.9	1.1				
11	0.9	1.1				
12	0.9	1.1				
13	0.9	1.1				
14	0.9	1.1				
15	0.9	1.1				
16	0.9	1.1				
17	0.9	1.1				

Tablo 5.5. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait Statik Kompanzator (STATCOM) Değerleri

q_{stat}^{\min} (b)	-0.6
q_{stat}^{\max} (b)	0.6
x_{tr} (b)	0.20912

Tablo 5.6. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) Değerleri

x_C (b)	0.2
x_L (b)	0.1
x_{TCSC}^{\min} (b)	-0.6

Tablo 5.6. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) Değerleri (Devam)

x_{TCSC}^{\max} (b)	0.6
α_{TCSC}^{\min}	90°
α_{TCSC}^{\max}	180°

Tablo 5.7. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Hat Direnç Değerleri

HAT NO	BARA NO		HAT DİRENCİ r_{hat} (b)
	i	→ j	
1	5	4	0.0134
2	5	2	0.0570
3	4	2	0.0581

Tablo 5.8. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Çevirici Komutasyon Direnç Değerleri

ÇEVİRİCİ NO	KOMUTASYON DİRENCİ r_c (b)
1	0.025680
2	0.028246
3	0.015329

Tablo 5.9. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Değişkenlerine İlişkin Sınır Değerleri

DEĞİŞKEN	ÇEVİRİCİ NO		
	1	2	3
p_d^{\min} (b)	-1	-1	-1
p_d^{\max} (b)	1	1	1
v_d^{\min} (b)	0.9	0.9	0.9
v_d^{\max} (b)	1.1	1.1	1.1

Tablo 5.9. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Değişkenlerine İlişkin Sınır Değerleri (Devam)

θ_d^{\min}	doğrultucu	6°	6°	6°
	evirici	16°	16°	16°
θ_d^{\max}	doğrultucu	40°	40°	40°
	evirici	40°	40°	40°

Tablo 5.10. Değiştirilmiş IEEE 17 Baralı AA-DA Test Sistemine Ait DA Çeviriciler İçin Ağırlık Katsayı Değerleri

ÇEVİRİCİ NO	AĞIRLIK KATSAYISI σ
1	1000
2	1000
3	1

5.2. YAK Algoritmasının Test Sistemine Uygulanması

YAK algoritmasında kullanılan parametreler ve değerleri Tablo 5.11' de verilmiştir.

Tablo 5.11. YAK Algoritmasında Kullanılan Parametreler ve Değerleri

PARAMETRE	DEĞERİ	PARAMETRE	DEĞERİ	PARAMETRE	DEĞERİ
n_f	60	ε_{DA}	10^{-6}	c_4	10
$n_{i\text{şçi}}$	60	ite_{DA}^{\max}	15	c_5	1
$n_{gözcü}$	60	ε_{AA-DA}	10^{-6}	c_6	1
$sayaç_i^{\lim}$	100	ite_{AA-DA}^{\max}	250	c_7	1
ite_{YAK}^{\max}	100	c_1	1	c_8	1
ε_{AA}	10^{-6}	c_2	1	c_9	1
ite_{AA}^{\max}	15	c_3	1		

Tablo 5.11' de verilen YAK algoritması için kullanılan yiyecek kaynağı sayısı (n_f) ve (4.58) eşitliği belirlenen amaç fonksiyonunda kullanılan hata katsayıları ($c_1, c_2,$

$c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$ ve c_9), denemeler sonucu tespit edilmiştir. Literatürde YAK algoritması ve benzeri sezgisel yöntemler için iterasyon sayısı 100 olarak alındığından, tezde bu sayı maksimum YAK algoritması iterasyon sayısı (ite_{YAK}^{max}) olarak alınmıştır.

YAK algoritması için 100 adet farklı ilk koşullara sahip optimizasyon algoritmaları çalıştırılmıştır. Bu çalışmaların tamamında sistem kısıtlamaları sağlanmış olup, en iyi ve en kötü durum için elde edilen optimizasyon sonuçları ile, bu sonuçlar arasındaki hata oranı, Tablo 5.12' de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.12. YAK Algoritması İçin Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Üretim Maliyeti	Toplam Aktif Güç Kaybı
En İyi Optimizasyon Algoritması	1136.4 (\$/saat)	0.0804 (b)
En Kötü Optimizasyon Algoritması	1164.2 (\$/saat)	0.0836 (b)
Hata Oranı	%2.45	%3.98

YAK algoritması ile yapılan 100 adet farklı ilk koşula sahip optimizasyon algoritmasının, yakınsama ve yerel minimuma takılmadan, global optimum çalışma noktasına ulaşma durumları, Tablo 5.13' de verilmiştir.

Tablo 5.13. YAK Algoritması için Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının İraksama ve Yerel Minimuma Takılma Durumları

Optimizasyon Algoritması Sayısı	İraksama ile Karşılaşılan Optimizasyon Algoritması Sayısı	Yerel Minimuma Takılan Optimizasyon Algoritması Sayısı
100	0	0

Yapılan 100 adet farklı ilk koşula sahip optimizasyon algoritmaları için elde edilen en iyi algoritma sonuçları Tablo 5.14' te verilmiştir. Tablo 5.14' de başlangıç değerleri sütunu, YAK algoritmasının ilk iterasyonu sonunda elde edilen sonuçları ve bitiş değerleri sütunu ise YAK algoritmasının sonlandırılması ile elde edilen

sonuçları göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan, jeneratör üretim maliyeti ile toplam aktif güç kaybı minimize edilirken, tüm sistem kısıtlamalarının da sağlandığı görülmektedir.

Tablo 5.14. YAK Algoritması ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesabı İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları

DEĞİŞKEN	SINIR DEĞERLER		BAŞLANGIÇ DEĞERİ	BİTİŞ DEĞERİ
	Min.	Max.		
v_1	0.9	1.1	1.0769	1.0913
v_2	0.9	1.1	1.0319	1.0754
v_3	0.9	1.1	1.0162	1.0442
v_4	0.9	1.1	1.0053	1.0333
v_5	0.9	1.1	1.0452	1.0572
v_6	0.9	1.1	0.9985	1.0464
v_7	0.9	1.1	0.9847	1.0047
v_8	0.9	1.1	1.0599	1.0856
v_9	0.9	1.1	0.9535	0.9939
v_{10}	0.9	1.1	0.9548	0.9941
v_{11}	0.9	1.1	0.9795	1.0142
v_{12}	0.9	1.1	0.9975	1.0267
v_{13}	0.9	1.1	0.9872	1.0183
v_{14}	0.9	1.1	0.9470	0.9844
v_{15}	0.9	1.1	1.0518	1.0188
v_{16}	0.9	1.1	1.0434	1.0626
v_{17}	0.9	1.1	1.0502	1.0413
δ_1	-	-	0°	0°
δ_2	-	-	-0.5948°	-2.9414°
δ_3	-	-	-19.0450°	-9.8547°
δ_4	-	-	-22.7951°	-10.4735°

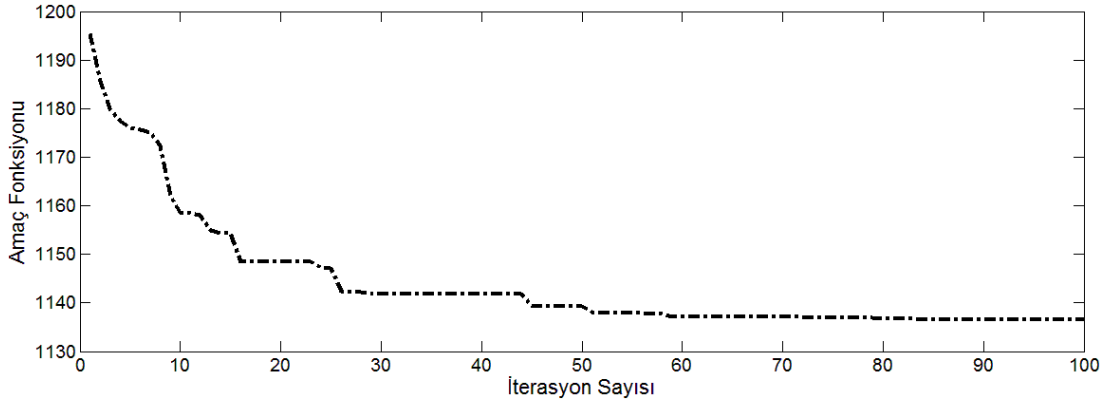
Tablo 5.14. YAK Algoritması ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesaplamaları İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları (Devam)

δ_5	-	-	-12.9981°	-6.6236°
δ_6	-	-	-17.4208°	-11.7737°
δ_7	-	-	-24.1029°	-12.4936°
δ_8	-	-	-24.1029°	-12.4936°
δ_9	-	-	-24.7919°	-13.4878°
δ_{10}	-	-	-24.0628°	-13.1314°
δ_{11}	-	-	-21.6623°	-11.6134°
δ_{12}	-	-	-20.3270°	-10.9429°
δ_{13}	-	-	-20.6798°	-11.1673°
δ_{14}	-	-	-24.3583°	-13.7493°
δ_{15}	-	-	-19.2485°	-9.6327°
δ_{16}	-	-	-20.8120°	-2.1743°
δ_{17}	-	-	3.7460°	-9.1943°
p_{g_1}	0.3	2	1.5554	1.6231
p_{g_2}	0.3	1.2	0.9125	0.6802
p_{g_3}	0.3	1.2	0.3424	0.3803
q_{g_1}	-0.6	0.6	0.0988	-0.5667
q_{g_2}	-0.6	0.6	-0.8128	-0.1434
q_{g_3}	-0.6	0.6	0.5896	0.1041
$q_{g_6} (q_{stat})$	-0.6	0.6	-0.0092	-0.0045
q_{g_8}	-0.6	0.6	0.4526	0.4987
$t_{3,5}$	0.9	1.1	0.9	1.025
$t_{4,7}$	0.9	1.1	0.95	0.9
$t_{4,9}$	0.9	1.1	0.925	1.025
v_{VSC}	-	-	1.0004	1.0473
δ_{VSC}	-	-	-17.4208°	-11.7737°
x_{TCSC}	-0.6	0.6	0.0476	0.0609
α_{TCSC}	90°	180°	229.854°	230.295°

Tablo 5.14. YAK Algoritması ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesaplamaları İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları (Devam)

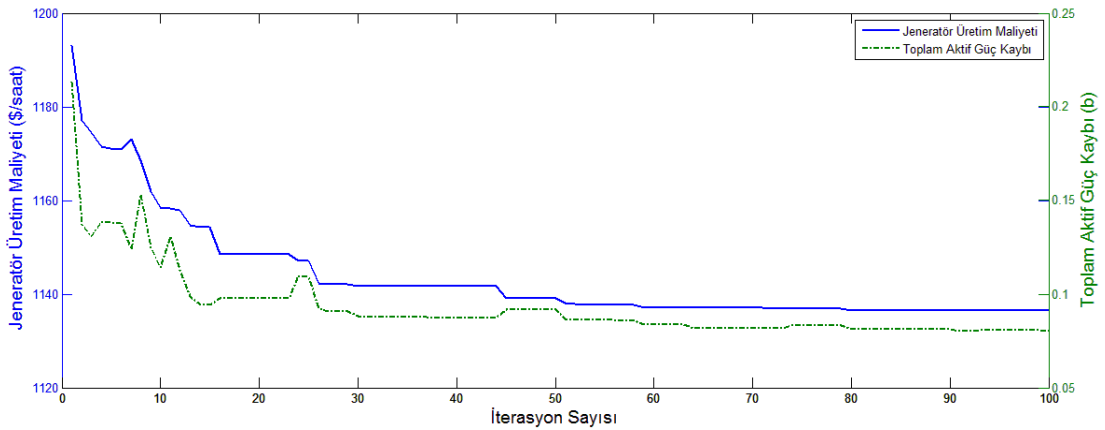
v_{d_1}	0.9	1.1	1.0000	1.0000
v_{d_2}	0.9	1.1	0.9953	0.9933
v_{d_3}	0.9	1.1	0.9857	1.0133
i_{d_1}	-	-	0.6009	0.2636
i_{d_2}	-	-	-0.1831	-0.8392
i_{d_3}	-	-	-0.4178	0.5756
p_{d_1}	-1	1	0.6009	0.2636
p_{d_2}	-1	1	-0.1823	-0.8336
p_{d_3}	-1	1	-0.4118	0.5832
q_{d_1}	-	-	0.1959	0.0513
q_{d_2}	-	-	0.0574	0.3166
q_{d_3}	-	-	0.1514	0.1381
ϕ_{md_1}	-	-	18.0539°	11.0237°
ϕ_{md_2}	-	-	17.4638°	20.8041°
ϕ_{md_3}	-	-	20.1853°	13.3155°
θ_{d_1}	doğrultucu : 6°	doğrultucu : 40°	15.1085°	8.8056°
	evirici : 16°	evirici : 40°		
θ_{d_2}	doğrultucu : 6°	doğrultucu : 40°	16.4957°	16.8298°
	evirici : 16°	evirici : 40°		
θ_{d_3}	doğrultucu : 6°	doğrultucu : 40°	19.1523°	11.0140°
	evirici : 16°	evirici : 40°		
$t_{d_1} (t_{5,15})$	0.9	1.1	1.05	0.975
$t_{d_2} (t_{4,16})$	0.9	1.1	1.05	1.1
$t_{d_3} (t_{2,17})$	0.9	1.1	1.05	1
<i>maliyet</i> (\$/saat)	-	-	1193	1136.4
$P_{kayıp}$	-	-	0.2134	0.0804

YAK algoritması ile elde edilen en iyi sonuçlara sahip optimizasyon algoritması boyunca, (4.58) eşitliğinde verilen amaç fonksiyonu değerinin, iterasyon sayısına göre değişimi Şekil 5.3' de verilmiştir.



Şekil 5.3. YAK Algoritması ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Amaç Fonksiyonu Değerinin İterasyon Sayısına Göre Değişimi

YAK algoritması ile elde edilen en iyi sonuçlara sahip optimizasyon algoritması boyunca, jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybının, iterasyon sayısına göre aldığı değerler Şekil 5.4' de verilmiştir.



Şekil 5.4. YAK Algoritması ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Jeneratör Üretim Maliyeti ve Toplam Aktif Güç Kaybının İterasyon Sayısına Göre Değişimi

5.3. GA' nın Test Sistemine Uygulanması

GA' da kullanılan parametreler ve değerleri Tablo 5.15' de verilmiştir.

Tablo 5.15. GA' da Kullanılan Parametreler ve Değerleri

PARAMETRE	DEĞERİ	PARAMETRE	DEĞERİ	PARAMETRE	DEĞERİ
n_{ind}	60	ε_{DA}	10^{-6}	c_4	10
$n_{çocuk}$	30	ite_{DA}^{max}	15	c_5	1
mo	%5	ε_{AA-DA}	10^{-6}	c_6	1
K_{GA}	0	ite_{AA-DA}^{max}	250	c_7	1
ite_{GA}^{max}	100	c_1	1	c_8	1
ε_{AA}	10^{-6}	c_2	1	c_9	1
ite_{AA}^{max}	15	c_3	1		

Tablo 5.15' te verilen GA için kullanılan birey sayısı (n_{ind}), çocuk sayısı ($n_{çocuk}$) ve (4.58) eşitliği belirlenen amaç fonksiyonunda kullanılan hata katsayıları ($c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$ ve c_9), denemeler sonucu tespit edilmiştir. Literatürde GA ve benzeri sezgisel yöntemler için iterasyon sayısı 100 olarak alındığından, tezde bu sayı maksimum GA iterasyon sayısı (ite_{GA}^{max}) olarak alınmıştır.

GA ile yapılan çalışmada 100 adet farklı ilk koşullara sahip optimizasyon algoritmaları çalıştırılmıştır. Bu çalışmaların tamamında sistem kısıtlamaları sağlanmış olup, en iyi ve en kötü durum için elde edilen optimizasyon sonuçları ile, bu sonuçlar arasındaki hata oranı, Tablo 5.16' da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.16. GA İçin Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Üretim Maliyeti	Toplam Aktif Güç Kaybı
En İyi Optimizasyon Algoritması	1141.7 (\$/saat)	0.0892 (b)
En Kötü Optimizasyon Algoritması	1207.2 (\$/saat)	0.0933 (b)
Hata Oranı	%5.73	%4.59

GA ile yapılan 100 adet farklı ilk koşula sahip optimizasyon algoritmalarının, yakınsama ve yerel minimuma takılmadan, global optimum noktasına ulaşma durumları Tablo 5.17' de verilmiştir.

Tablo 5.17. GA için Uygulanan 100 Farklı İlk Koşullara Sahip Optimizasyon Algoritmalarının Iraksama ve Yerel Minimuma Takılma Durumları

Optimizasyon Algoritması Sayısı	Iraksama ile Karşılaşılan Optimizasyon Algoritması Sayısı	Yerel Minimuma Takılan Optimizasyon Algoritması Sayısı
100	0	0

Yapılan 100 adet farklı ilk koşulda sahip optimizasyon algoritmaları için elde edilen en iyi algoritma sonuçları Tablo 5.18' de verilmiştir. Tablo 5.18' de başlangıç değerleri sütunu, GA' nın ilk iterasyonu sonunda elde edilen sonuçları ve bitiş değerleri sütunu ise GA' nın sonlandırılması ile elde edilen sonuçları göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan, jeneratör üretim maliyeti ile toplam aktif güç kaybı minimize edilirken, tüm sistem kısıtlamalarının da sağlandığı görülmektedir.

Tablo 5.18. GA ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesabı İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları

DEĞİŞKEN	SINIR DEĞERLER		BAŞLANGIÇ SONUCU	BİTİŞ SONUCU
	Min.	Max.		
v_1	0.9	1.1	1.0484	1.0484
v_2	0.9	1.1	0.9988	1.0342
v_3	0.9	1.1	1.0350	1.0581
v_4	0.9	1.1	1.0203	1.0168
v_5	0.9	1.1	1.0373	1.0284
v_6	0.9	1.1	1.0582	1.0289
v_7	0.9	1.1	1.0325	1.0237
v_8	0.9	1.1	1.0968	1.0968
v_9	0.9	1.1	0.9991	1.0087
v_{10}	0.9	1.1	0.9972	1.0083
v_{11}	0.9	1.1	1.0118	1.0277
v_{12}	0.9	1.1	1.0233	1.0411
v_{13}	0.9	1.1	1.0184	1.0331
v_{14}	0.9	1.1	0.9644	0.9973
v_{15}	0.9	1.1	1.0375	1.0173
v_{16}	0.9	1.1	1.0604	1.0576
v_{17}	0.9	1.1	1.0319	1.0346
δ_1	-	-	0°	0°
δ_2	-	-	-0.7778°	-2.8451°
δ_3	-	-	-12.6906°	-10.1517°
δ_4	-	-	-12.1070°	-12.7591°
δ_5	-	-	-9.2079°	-7.0629°
δ_6	-	-	-12.8034°	-13.3419°
δ_7	-	-	-13.9400°	-14.3453°
δ_8	-	-	-13.9400°	-14.3453°
δ_9	-	-	-14.9246°	-15.1442°
δ_{10}	-	-	-14.8306°	-14.5367°
δ_{11}	-	-	-13.8939°	-12.4637°

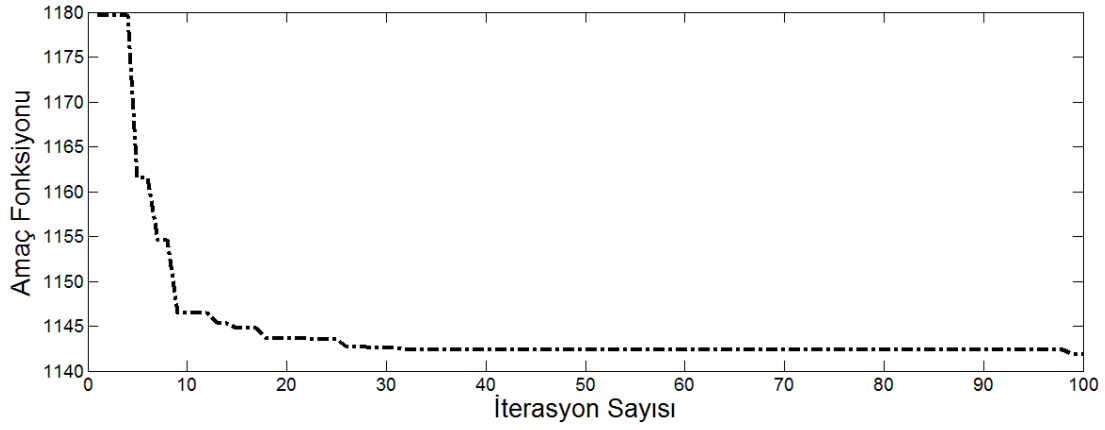
Tablo 5.18. GA ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesabı İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları (Devam)

δ_{12}	-	-	-14.1228°	-11.2143°
δ_{13}	-	-	-14.8077°	-11.4418°
δ_{14}	-	-	-13.2848°	-15.3455°
δ_{15}	-	-	-13.6228°	-9.9710°
δ_{16}	-	-	-4.8428°	-5.4503°
δ_{17}	-	-	-4.3263°	-8.0416°
p_{g_1}	0.3	2	1.2402	1.4937
p_{g_2}	0.3	1.2	1.0856	0.7573
p_{g_3}	0.3	1.2	0.3934	0.4374
q_{g_1}	-0.6	0.6	0.0923	-0.5948
q_{g_2}	-0.6	0.6	-1.3654	-0.2824
q_{g_3}	-0.6	0.6	0.2239	0.1531
$q_{g_6} (q_{stat})$	-0.6	0.6	0.6425	0.1387
q_{g_8}	-0.6	0.6	0.4007	0.4553
$t_{3,5}$	0.9	1.1	0.975	1.05
$t_{4,7}$	0.9	1.1	1	0.95
$t_{4,9}$	0.9	1.1	1	1.05
v_{VSC}	-	-	0.9312	1.0007
δ_{VSC}	-	-	-12.8034°	-13.3419°
x_{TCSC}	-0.6	0.6	-0.5712	0.2552
α_{TCSC}	90°	180°	126.9294°	95.13°
v_{d_1}	0.9	1.1	1.0000	1.0000
v_{d_2}	0.9	1.1	0.9932	0.9941
v_{d_3}	0.9	1.1	1.0058	1.0106
i_{d_1}	-	-	0.4060	0.2538
i_{d_2}	-	-	-0.7245	-0.7238
i_{d_3}	-	-	0.3185	0.4700
p_{d_1}	-1	1	0.4060	0.2538

Tablo 5.18. GA ile Yapılan Optimal AA-DA Güç Akışı Hesabı İçin Elde Edilen En İyi Algoritma Sonuçları (Devam)

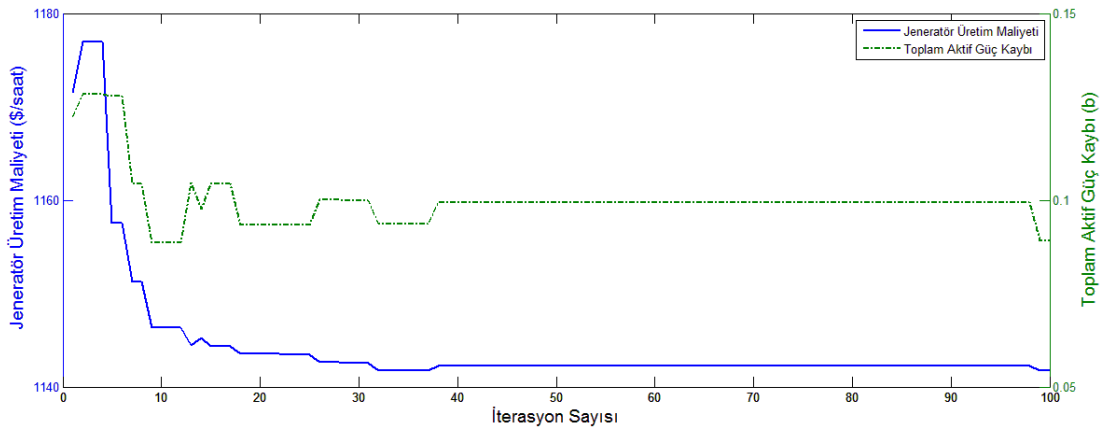
p_{d_2}	-1	1	-0.7196	-0.7196
p_{d_3}	-1	1	0.3203	0.4750
q_{d_1}	-	-	0.1122	0.0474
q_{d_2}	-	-	0.2691	0.2612
q_{d_3}	-	-	0.0734	0.1042
ϕ_{md_1}	-	-	15.4527°	10.5825°
ϕ_{md_2}	-	-	20.5062°	19.9561°
ϕ_{md_3}	-	-	12.9145°	12.3644°
θ_{d_1}	doğrultucu : 6°	doğrultucu : 40°	13.1067°	8.3513°
	evirici : 16°	evirici : 40°		
θ_{d_2}	doğrultucu : 6°	doğrultucu : 40°	17.0729°	16.3964°
	evirici : 16°	evirici : 40°		
θ_{d_3}	doğrultucu : 6°	doğrultucu : 40°	11.6372°	10.3420°
	evirici : 16°	evirici : 40°		
$t_{d_1} (t_{5,15})$	0.9	1.1	1.025	1
$t_{d_2} (t_{4,16})$	0.9	1.1	1.1	1.1
$t_{d_3} (t_{2,17})$	0.9	1.1	1.05	1.025
<i>maliyet</i> (\$/saat)	-	-	1171.5	1141.7
$P_{kayıp}$	-	-	0.1224	0.0892

GA ile elde edilen en iyi sonuçlara ait optimizasyon algoritması boyunca, (4.58) eşitliğinde verilen amaç fonksiyonu değerinin, iterasyon sayısına göre değişimi Şekil 5.5' de verilmiştir.



Şekil 5.5. GA ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Amaç Fonksiyonu Değerinin İterasyon Sayısına Göre Değişimi

GA ile elde edilen en iyi sonuçlara sahip optimizasyon algoritması boyunca, jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybının, iterasyon sayısına göre değişimi Şekil 5.6' da verilmiştir.



Şekil 5.6. GA ile Elde Edilen En İyi Sonuçlara Sahip Optimizasyon Algoritması Boyunca Jeneratör Üretim Maliyeti ve Toplam Aktif Güç Kaybının İterasyon Sayısına Göre Değişimi

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yarım yüzyılda yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeye bağlı olarak, DA sistemlerinin AA sistemlerine entegre edilmesiyle, AA-DA sistemlerinin gelişiminde önemli yollar kat edilmiş ve buna bağlı olarak literatürde, AA-DA güç akışı hesabı için farklı çalışmalar yapılmıştır. Literatürdeki bu mevcut çalışmalar incelendiğinde, DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek eşdeğer devrelerinin ihmal edildiği görülmektedir. Bu ihmal ile elde edilen sonuçların, gerçek değerleri yansıtmayacağı aşıkardır.

Günümüzde sürekli artan enerji talebi ve bu talebin karşılanması için gerekli olan yatırımların yüksek maliyetleri, mevcut güç sistemlerinin optimal olarak işletilmesini zorunlu kılmaktadır. AA sistemleri için literatürde birçok optimal güç akışı çalışması yapılmış olmasına rağmen, AA-DA sistemleri için yapılan optimal güç akışı çalışmalarının sayısı ise oldukça azdır. Mevcut AA-DA optimal güç akışı çalışmalarında ise ağırlıklı olarak, türev bazlı sayısal optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu tür yöntemlerde iraksama ve yerel minimuma takılma problemleri ile karşılaşılabilir.

Bu tezde sunulan çalışmada, tek kutuplu, çok uçlu AA-DA sisteminde optimal güç akışı hesabı için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda literatürde ilk kez DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek eşdeğer devrelerinin göz önüne alındığı, yeni bir ayrık AA-DA güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmada, hem AA hem de DA sistemine ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek ayrık kademe ayar değerleri göz önüne alınarak, pratik uygulama açısından uygulanabilirlik sağlanmıştır. Kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değişim etkileri, bara admitans matrisine sokulmadan, Jacobian matrisine aktarılmıştır. Bunun için yeni güç denklemleri ve bu denklemlerin türevleri ile elde edilen yeni Jacobian matris elemanlarına ilişkin denklemler elde edilmiştir. Böylece boyut ve algoritma yakınsama süresi azaltılmıştır. Literatürde yapılan optimizasyon

çalışmasına katkı sağlamak için, modern AA-DA sistemlerinin vazgeçilmez FACTS elemanları olan Statik Kompanzator (STATCOM) ve Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC), test sistemine ilave edilmiştir. Bu cihazlara ait değişkenler optimizasyon kontrol değişkeni alınarak, bu cihazlar ilgili değişkenler üzerinden, AA-DA güç akışı algoritmasına dahil edilmiştir. TCSC' ye ait empedans değişim etkileri, kademe ayarlı transformatörlerde de yapıldığı gibi, bara admitans matrisine sokulmadan, Jacobian matrisine aktarılmıştır. Bunu sağlamak için ise, yeni güç denklemleri ve bu denklemlerin türevleri ile elde edilen yeni Jacobian matris elemanları hesaplama denklemleri elde edilmiştir. Sonuç olarak, algoritma yakınsama süresi azaltılmıştır. Optimal güç akışı hesabı, sezgisel optimizasyon yöntemlerinden olan YAK algoritması ve GA' ya, ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylelikle, sunulan bu çalışma ile, türev bazlı sayısal optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak, literatürde ilk kez "tek kutuplu- çok uçlu" AA-DA sisteminde optimal güç akışı hesabı için sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Dolayısıyla bu tez, YAK algoritması ve GA uygulanan, yukarıda sayılan özellikleri içeren literatürdeki ilk çalışma özelliği taşımaktadır.

Tezde sunulan optimal AA-DA güç akışı çalışması ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi verilebilir:

- 1-) Önerilen ayrık AA-DA güç akışı algoritmasının, yakınsamada güvenilir ve sağlam olduğu ispatlanmıştır.
- 2-) Önerilen ayrık AA-DA güç akışı algoritmasında, algoritma yapısının değiştirilmesine gerek olmadan, herhangi bir AA güç akışı algoritması kullanılabilir.
- 3-) YAK algoritması ve GA yapısı gereği, güç akışı eşitliklerine göre değil de güç akışı sonuçlarına göre optimizasyon işlemi yapması sebebiyle, farklı AA-DA güç akışı algoritmalarına da kolaylıkla uygulanabilir.
- 4-) Sunulan çalışmada, jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybının minimum değerinde tutulması, aynı derecede öneme sahip görüldüğü için, (4.58) eşitliğinde verilen amaç fonksiyonunda, bu iki fonksiyona ait hata katsayıları (Tablo

5.11 ve 5.15' te verildiği üzere) eşit alınmıştır. Farklı çalışmalar için, jeneratör üretim maliyeti ya da toplam aktif güç kaybının optimizasyon önem derecesi, bu katsayılar arasındaki oran değiştirilerek ayarlanabilir. Ayrıca, bu iki fonksiyondan herhangi birinin önem derecesi sıfırlanarak, sadece optimal aktif güç akışı (jeneratör üretim maliyeti optimizasyonu) ya da sadece optimal reaktif güç optimizasyonu (toplam aktif güç kaybı) optimizasyonu hesabı da yapılabilir.

5-) Kademe ayarlı transformatör kademe ayar değerleri ile TCSC empedanslarının iterasyon içinde değişen değerleri, bara admitans matrisine sokulmadan, Jacobian matrisine aktarılabilmiş olması, algoritmanın yakınsama hızını arttırmıştır.

6-) YAK algoritması ve GA' nın optimal noktaya ulaşmada güvenilir olduğu, Tablo 5.12 ve 5.16' da verilen sonuçlarla gösterilmiştir.

7-) YAK algoritması ve GA' nın yerel minimuma takılmadığı, Tablo 5.13 ve 5.17' de verilen sonuçlarla gösterilmiştir.

8-) YAK algoritmasının GA' ya göre global optimum noktasına ulaşmada daha iyi olduğu, Tablo 5.14 ve 5.18' de elde edilen sonuçlardan gözlenmiştir.

AA-DA sisteminde optimal güç akışı hesabı için önerilen yaklaşımda elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, aşağıdaki önerilerin yapılması uygun görülmüştür:

1-) Önerilen ayrık AA-DA güç akışı algoritması tek kutuplu çok uçlu DA sistemleri için geliştirilmiştir. Önerilen DA güç akışı algoritması, iki kutuplu DA sistemler için düzenlenerek, mevcut AA güç akışı algoritması değiştirilmeden ve mevcut optimizasyon yöntemlerinde değişiklik yapılmadan, önerilen optimal güç akışı yaklaşımına uygulanabilir.

2-) Önerilen optimal güç akışı çalışmasında kısıtlama olarak sadece sistem değişkenlerine ait sınır değerleri göz önüne alınmıştır. Sistem kararlılığı ve hatlardan akmasına izin verilen güçlere ait kısıtlamalar da optimizasyon çalışmasına dahil edilebilir.

3-) Önerilen optimal güç akışı çalışmasında jeneratör üretim maliyeti ve toplam aktif güç kaybı, amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. İstenirse, jeneratörlerde kullanılan yakıtlara ait gaz emisyon değerleri de amaç fonksiyonu olarak, önerilen optimal güç akışı yaklaşımına ilave edilebilir.

4-) Önerilen optimal güç akışı yaklaşımında DA sistemine ait çevirici aktif güçleri, kontrol değişkeni olarak seçilmiştir. Bu tercihin sebebi, DA sistemi açısından çevirici aktif güç değerlerinin; çeviricilere ait reaktif güç, çevirici çıkışı doğru gerilimi, çevirici doğru akım değerleri ve çeviricilere ait kademe ayarlı transformatör kademe ayar değerlerini direkt olarak etkilemesidir. AA sistemi açısından ise, çeviricilere ait aktif güç değerleri ve bu aktif güç değerlerine bağlı olarak çevirici reaktif güç değerleri ile çeviricilere ait kademe ayarlı transformatör kademe ayar değerlerinin, AA sistemini direkt olarak etkilediği aşıkardır. Ancak, çevirici aktif güçleri haricindeki DA sistemine ait diğer değişkenlerin, kontrol değişkeni olarak seçilerek, önerilen optimal güç akışı yaklaşımındaki ya da önerilecek farklı yaklaşımlardaki etkileri incelenebilir.

5-) Tezde DA çeviricilere ait tetikleme ya da toparlanma açıları içine, literatürdeki genel eğilime uyularak, komutasyon açısı etkisi dahil edilmemiştir. Bu etki hesaplamalara katılarak, bu tezde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir.

6-) Literatürde DA sistemine ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek eşdeğer devrelerinin göz önüne alındığı çalışma bulunmadığından, önerilen yaklaşımın literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Önerilen yaklaşımda olduğu gibi, DA çeviricilere ait kademe ayarlı transformatörlerin gerçek eşdeğer devrelerini göz önüne alarak önerilecek farklı yaklaşımların, tezde verilen sistem dataları kullanılarak önerilen yaklaşım ile karşılaştırılması uygun olacaktır.

7-) YAK algoritması ve GA, popülasyon tabanlı yöntemler olduğundan, her bir optimizasyon iterasyonlarında, popülasyon büyüklüklerine bağlı olarak birden fazla AA-DA güç akışı algoritması çalıştırılmaktadır. Bu güç akışı algoritmalarının bazılarında, kontrol değişkenleri için tahmin edilen durum değişkenlerinin uygun olmaması sebebiyle, güç akışı algoritması ıraksamaya gidebilir. Ancak, yakınsama

sağlayan güç akışı algoritması sonuçları, YAK algoritması ya da GA' ya ait optimizasyon iterasyonu için yakınsamayı garantiye alır ve optimizasyonun devamlılığını sağlar. Bu sebeple, tezde sunulan çalışmada yakınsama sağlamayan AA-DA güç akışı algoritmalarının yakınsaması için uygun durum değişkenlerinin belirlenmesi için uğraşılmamıştır. Bu durumda, yakınsama sağlanamayan güç akışı algoritması sonuçlarının, optimizasyon hesaplamalarına nasıl katılacağı Bölüm 3 ve 4' te açıklanmıştır. Yakınsaması sağlanamayan güç akışı algoritmaları için, algoritma yakınsayana kadar, yakınsamayı sağlayacak uygun durum değişkenlerinin tespit edilmesine çalışılabilir. Böylelikle, tezde yapılandırılmış farklı olarak, yakınsaması sağlanmış güç akışı algoritmasına ait gerçek sonuçlarla optimizasyon hesaplamalarına dönülebilir. Yapılan bu işlemin, optimizasyon çalışmasına, global optimum noktaya daha az optimizasyon iterasyonu sayısında ulaşma ve/veya daha iyi bir global optimum noktası elde etme yönünde nasıl etki edeceği test edilebilir. Ancak, yakınsama sağlamayan güç akışı algoritmaları için, yakınsamayı sağlayacak uygun durum değişkenlerinin bulunmaya çalışmasının, toplam optimizasyon çalışma süresini arttıracığı unutulmamalıdır.

8-) YAK algoritması ve GA ile yapılan optimal AA-DA güç akışı çalışması için optimizasyon başlangıç kontrol değişkenleri sınır değerler içerisinde rastgele üretilmiştir. Başlangıç optimizasyon kontrol değişkenlerinin, global optimum noktaya ulaşmayı sağlayacak optimizasyon kontrol değişkenlerine yakın seçilebilmesi durumunda, global optimum noktaya ulaşmak için gereken optimizasyon iterasyon sayısı azalacaktır. Bu sebeple, sisteme ait yük ya da admitans değişiklikleri sonrasında YAK algoritması, GA ya da benzer popülasyon tabanlı sezgisel yöntemlerle yapılacak yeni optimizasyon çalışmalarında, optimizasyon başlangıç kontrol değerleri için bir önceki optimizasyon çalışması sonucuna ait kontrol değişkenlerinin seçilmesi, global optimum noktaya daha hızlı ulaşmayı hızlandıracaktır.

9-) Sunulan çalışma için (4.58) eşitliğinde kullanılan, Tablo 5.11 ve 5.15' de verilen hata katsayıları (c_i değerleri), Bölüm 5' te uygulama için kullanılan test sistemine ait yük ve sınır değerleri için tespit edilmiştir. Önerilen yaklaşımın farklı test sistemlerine ya da tezde kullanılan test sistemine farklı yük ve sınır değerleri

seçilerek uygulanması durumunda, seçilmesi gereken c_i hata katsayılarının farklı seçilmesi gerekliliği ile karşılaşılabilmek durumu unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] ARRILLAGA, J., High Voltage Direct Current Transmission, 2nd Edition. Section 1.1. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [2] I.C.S. Reference Library Vol.4B. Section 53. Scranton PA: International Textbook Company, 1908.
- [3] NOZARI, F., PATEL, H.S., Power electronics in electric utilities: HVDC power transmission systems. IEEE Proceedings, 76(4): 495-506, Apr. 1988.
- [4] <http://nomoretowers.org/Documents/HVDCProjectsListingExisting.htm> (Erişim Tarihi: Aralık 2012)
- [5] RUDERVALL, R., CHARPENTIER, J.P., SHARMA, R., High voltage direct current (HVDC) transmission systems technology review paper. Energy Week 2000, Washington-USA, 2000.
- [6] <http://www.ece.uidaho.edu/hvdcfacts/Projects/> (Erişim Tarihi: Aralık 2012)
- [7] <http://www.ece.uidaho.edu/hvdcfacts/Projects/HVDCProjectsListingMarch2012-planned.pdf> (Erişim Tarihi: Aralık 2012)
- [8] MEAH, K., ULA, S., Comparative evaluation of HVDC and HVAC transmission systems, IEEE PES General Meeting, Florida-USA, 2007.
- [9] BAHRAMAN, M.P., HVDC transmission overview, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago-USA, 2008.
- [10] WANG, H., REDFERN, M.P., The advantages and disadvantages of using HVDC to interconnect AC networks, 45th international UPEC, Cardiff-Wales, 2010.
- [11] KHALIL, M.S., International research and development trends and problems of HVDC cables with polymeric insulation, IEEE Electrical Insulation Magazine, 13(6): 35-47, Nov./Dec. 1997.
- [12] KOLDBY, E., HYTTINEN, M., Challenges on the road to an offshore HVDC grid, Nordic Wind Power Conference, Bornholm-Denmark, 2009.

- [13] WANG, L., WANG, K.-H., LEE, W.-J., CHEN, Z., Power-flow control and stability enhancement of four parallel-operated offshore wind farms using a line-commutated HVDC link, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 25(2): 1190-1202, Apr. 2010.
- [14] <http://www.energy.siemens.com/mx/en/power-transmission/hvdc/hvdc-classic/#content=Details> (Erişim Tarihi: Kasım 2012)
- [15] KAZEMI, A., ANDAMI, H., FACTS devices in deregulated electric power systems: a review, *International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, Vol. 1, 337-342, 2004.
- [16] LATORRE, H.F., GHANDHARI, M., SODER, L., Control of a VSC-HVDC operating in parallel with AC transmission lines, *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Caracas-Venezuela*, 2006.
- [17] HUANG, K.A., KRISHNASWAMY, V., HVDC controls for power system stability, *IEEE PES Summer Meeting*, Vol. 1, Chicago-USA, 597-602, 2002.
- [18] TENG, J.H., A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution networks, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24(2): 97-102, Feb. 2002.
- [19] LI, G., ZHANG, X.-P., WANG, X.-F., Accelerated Newton-Raphson power flow, *European Transactions on Electrical Power*, 22(4): 504-517, May 2012.
- [20] SMED, T., ANDERSSON, G., SHEBLE, G.B., GRIGSBY, L.L., A new approach to ac/dc power flow, *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3): 1238-1244, Aug. 1991.
- [21] ARRILLAGA J., HARKER, B.J., TURNER, K.S., Clarifying an ambiguity in recent ac-dc load flow formulation, *IEE Proceedings-c Generation Transmission and Distribution*, 127(5): 324-325, 1980.
- [22] ARIFOGLU, U., Load flow based on newton's method using norton equivalent circuit for ac-dc multiterminal systems, *European Transactions on Electrical Power*, 9(3): 167-174, May/Jun. 1999.
- [23] MARSFAWY, M.M., MATHUR R.M., A new fast technique for load flow solution of integrated multiterminal dc-ac systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99(1): 246-255, Jan. 1980.

- [24] MESSALTI, S., BELKHIAT, S., SAADATE, S., A new approach for load flow analysis of integrated ac-dc power systems using sequential modified Gauss-Seidel methods, *European Transactions on Electrical Power*, 22(4): 421-432, May 2012.
- [25] DE SILVA, J.R., ARNOLD, C.P., A simple improvement to sequential ac/dc power flow algorithms, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 12(3): 219-221, Jul. 1990.
- [26] REEVE, J., FAHMY, G., STOTT, B., Versatile load flow method for multiterminal hvdc systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 96(3): 925-933, May 1977.
- [27] SATO, H., ARRILLAGA, J., Improved load flow techniques for integrated ac-dc systems, *IEEE Proceedings*, 116(4): 525-532, Apr. 1969.
- [28] STOTT, B., Load flow ac and integrated ac-dc systems. Ph.D. Thesis, University of Manchester, Manchester, 1971.
- [29] GONZALEZ-LONGATT, F., ROLDAN, J., CHARALAMBOUS, C.A., Power flow solution on multi-terminal HVDC systems: supergrid case, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Santiago de Compostela-Spain, 2012.
- [30] LIU, C., ZHANG, B., HOU, Y., WU, F.F., LIU, Y., An improved approach for ac-dc power flow calculation with multi-infeed dc systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2): 862-869, May 2011.
- [31] FUDEH, H., ONG, C.M., A simple and efficient ac-dc load-flow method for multiterminal dc systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(11): 4389-4396, Nov. 1981.
- [32] GE, S.Y., CHUNG, T.S., Optimal active power flow incorporating power flow control needs in flexible ac transmission systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(2): 738-744, May 1999.
- [33] DE SOUZA, V.A., BAPTISTA, E.C., DA COSTA, G.R.M., Optimal reactive power flow via the modified barrier Lagrangian function approach, *Electric Power System Research*, 84(1): 159-164, Mar. 2012.
- [34] WEI, H., SASAKI, H., KUBOKAWA, J., YOKOYAMA, R., An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure, *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(3): 870-877, Aug. 1998.
- [35] BURCHETT, R.C., HAPP, H.H., WIRGAU, K.A., Large scale optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(10): 3722-3732, Oct. 1982.

- [36] HARTATI, R.S., EL-HAWARY, M.E., Optimal active power flow solutions using a modified Hopfield neural network, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Toronto-Canada, Vol. 1, 189-194, 2001.
- [37] OLIVEIRA, A.R.L., SOARES, S., NEPOMUCENO, L., Optimal active power dispatch combining network flow and interior point approaches, IEEE Transactions on Power Systems, 18(4): 1235-1240, Nov. 2003.
- [38] CARVALHO, M.F., SOARES, S., OHISHI, T., Optimal active power dispatch combining network flow approach, IEEE Transactions on Power Systems, 3(4): 1640-1647, Nov. 1988.
- [39] SHAOYUNA, G., CHUNG, T.S., Optimal active power flow incorporating FACTS devices with power flow control constraints, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 20(5): 321-326, Jun. 1998.
- [40] DAI, C., CHEN, W., ZHU, Y., ZHANG, X., Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch, IEEE Transactions on Power Systems, 24(3): 1218-1231, Aug. 2009.
- [41] NANDA, J., HARI, L., KOTHARI, M.L., Challenging algorithm for optimal reactive power dispatch through classical co-ordination equations, IEE Proceedings-c Generation Transmission and Distribution, 139(2): 93-101, Mar. 1992.
- [42] WU, Q.H., MA, J.T., Power system optimal reactive power dispatch using evolutionary programming, IEEE Transactions on Power Systems, 10(3): 1243-1249, Aug. 1995.
- [43] UTHITSUNTHORN, D., KWANNETR, U., SINSUPHUN, N., LEETON, U., KULWORAWANICHPONG, T., Control of STATCOM by using optimal reactive power flow solutions, International Conference on ECTI-CON, Chaing Mai-Thailand, 1181-1185, 2010.
- [44] BHATTACHARYA, A., ROY, P.K., Solution of multi-objective optimal power flow using gravitational search algorithm, IET Generation Transmission & Distribution, 6(8): 751-763, Aug. 2012.
- [45] MURLITHI, M.G., Optimal power flow for the high voltage network of Kenya power system, IEEE 4th AFRICON, Stellenbosch-South Africa, Vol. 1, 162-168, 1996.
- [46] BABU, A.V.N., SIVANAGARAJU, S., A new approach for optimal power flow solution based on two step initialization with multi-line FACTS devices, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 4(1): 173-185, Mar. 2012.

- [47] KULWORAWANICHPONG, T., Optimal power flow solution using adaptive tabu search, *International Journal of the Physical Sciences*, 6(28): 6394-6409, Nov. 2011.
- [48] NIKNAM, T., NARIMANI, M.R., AGHAEI, J., AZIZIPANAH-ABARGHOOEE, R., Improved particle swarm optimisation for multi-objective optimal power flow considering the cost, loss, emission and voltage stability index, *IET Generation Transmission & Distribution*, 6(6): 515-527, Jun. 2012.
- [49] ROY, P.K., GHOSHAL, S.P., THAKUR, S.S., Biogeography based optimization for multi-constraint optimal power flow with emission and non-smooth cost function, *Expert Systems with Applications*, 37(12): 8221-8228, Dec. 2010.
- [50] SHAO, M., JEWELL, W.T., CO₂ emission-incorporated ac optimal power flow and its primary impacts on power system dispatch and operations, *IEEE PES General Meeting, Minneapolis-USA*, 2010.
- [51] NUALHONG, D., CHUSANAPIPUTT, S., PHOMVUTTISARN, S., JANTARANG, S., Reactive tabu search for optimal power flow under constrained emission dispatch, *IEEE TENCON 2004*, Vol. 3, 327-330, 2004.
- [52] MBAMALU, G.A.N., EL-HAWARY, F., EL-HAWARY, M.E., Effects of load modelling on minimum loss, minimum emission, and multiple-objective optimal hydrothermal power flow, *Electric Power System Research*, 34(2): 97-108, Aug. 1995.
- [53] THUKARAM, D., YESURATNAM, G., Optimal reactive power dispatch in a large power system with ac-dc and FACTS controllers, *IET Generation Transmission & Distribution*, 2(1): 71-81, Jan. 2008.
- [54] THUKARAM, D., YESURATNAM, G., VYJAYANTHI, C., Optimal reactive power dispatch based on voltage stability criteria in a large power system with ac/dc and FACTS devices, *IEEE International Conference on PEDES, New Delhi-India*, 2006.
- [55] YU, J., YAN, W., LI, W., WEN, L., Quadratic models of ac-dc power flow and optimal reactive power flow with HVDC and UPFC controls, *Electric Power System Research*, 78(3): 302-310, Mar. 2008.
- [56] YU, J., YAN, W., LI, W., CHUNG, C.Y., WONG, K.P., An unfixed piecewise-optimal reactive power-flow model and its algorithm for ac-dc systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(1): 170-176, Feb. 2008.

- [57] DE MARTINIS, U., GAGLIARDI, F., LOSI, A., MANGONI, V., ROSSI, F., Optimal load flow for electrical power systems with multiterminal HVDC links, *IEE Proceedings-c Generation Transmission and Distribution*, 137(2): 139-145, Mar. 1990.
- [58] LU, C.N., CHEN, S.S., ONG, C.M., The incorporation of HVDC equations in optimal power flow methods using sequential quadratic programming techniques, *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(3): 1005-1011, Aug. 1988.
- [59] AMBRIZ-PEREZ, H., ACHA, E., FUERTE-ESQUIVEL, C.R., High voltage direct current modelling in optimal power flows, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 30(3): 157-168, Mar. 2008.
- [60] ARIFOGLU, U., TARKAN, N., New sequential ac-dc load-flow approach utilizing optimization techniques, *European Transactions on Electrical Power*, 9(2): 93-100, Mar./Apr. 1999.
- [61] AYAN, K., KILIC, U., Artificial bee colony algorithm solution for optimal reactive power flow, *Applied Soft Computing*, 12(5): 1477-1482, May 2012.
- [62] KIM, H., SAMANN, N., SHIN, D., KO, B., JANG, G., CHA, J., A new concept of power flow analysis, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2(3): 312-319, Jan. 2007.
- [63] YALCIN, F., ARIFOGLU, U., Optimal reactive power flow solution in multi-terminal ac-dc systems based on artificial bee colony algorithm, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, (Accepted for Publication, DOI: 10.3906/elk-1211-162), Jan. 2013.
- [64] SINGH, A., An artificial bee colony algorithm for the leaf-constrained minimum spanning tree problem, *Applied Soft Computing*, 9(2): 625-631, Mar. 2009.
- [65] OZTURK, A., COBANLI, S., ERDOGMUS, P., TOSUN, S., Reactive power optimization with artificial bee colony algorithm, *Scientific Research and Essays*, 5(19): 2848-2857, Oct. 2010.
- [66] CHO, J.R., LEE, J.H., JEONG, K.M., KIM, K.W., Optimum design of run-flat tire insert rubber by genetic algorithm, *Finite Elements in Analysis and Design*, 52: 60-70, May 2012.
- [67] KUMARI, M.S., MAHESWARAPU, S., Enhanced genetic algorithm based computation technique for multi-objective optimal power flow solution, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(6): 736-742, Jul. 2010.

- [68] MOHAMED, A.W., SABRY, H.Z., Constrained optimization based on modified differential evolution algorithm, *Information Sciences*, 194(1): 171-208, Jul. 2012.
- [69] CAI, H.R., CHUNG, C.Y., WONG, K.P., Application of differential evolution algorithm for transient stability constrained optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2): 719-728, May 2008.
- [70] MOHAMMADI, M., DINI, F., AMROLLAHI, R., Optimization of damavand tokamak poloidal field coils positions and currents with PSO algorithm, *Journal of Fusion Energy*, 31(2): 170-174, Apr. 2012.
- [71] KIM, J.Y., LEE, H.S., PARK, J.H., A modified particle swarm optimization for optimal power flow, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2(4): 413-419, Jun. 2007.
- [72] VERMA, O.P., KUMAR, P., HANMANDLU, M., CHHABRA, S., High dynamic range optimal fuzzy color image enhancement using artificial ant colony system, *Applied Soft Computing*, 12(1): 394-404, Jan. 2012.
- [73] SOARES, J., SOUSA, T., VALE, Z.A., MORAIS, H., FARIA, P., Ant colony search algorithm for the optimal power flow problem, *IEEE PES General Meeting*, San Diego-USA, 2011.
- [74] YALCIN, F., ARIFOGLU, U., A new approach based on genetic algorithm for optimal reactive power flow solution in multi-terminal ac-dc systems, *Przeglad Elektrotechniczny*, 89(3a): 231-235, Mar. 2013.
- [75] MOUSAVI, O.A., CHERKAOUI, R., Literature survey on fundamental issues of voltage and reactive power control, *Eldgenössische Technische Hochschule Zürich*, Jun. 2011.
- [76] EDRIS, A., ADAPA, R., BAKER, M.H., BOHMANN, L., CLARK, K., HABASHI, K., GYUGYI, L., LEMAY, J., MEHRABAN, A.S., MEYERS, A.K., REEVE, J., SENER, F., TORGERSON, D.R., WOOD, R.R., Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (FACTS), *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(4): 1848-1853, Oct. 1997.
- [77] ACHA, E., FUERTE-ESQUIVEL, C.R., AMBRIZ-PEREZ, H., ANGELES-CAMACHO, C., *FACTS: Modelling and simulation in power networks*, Section 2.4.5. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [78] ACHA, E., AGELIDIS, V., ANAYA, O., MILLER, T.J.E., *Power electronic control in electrical systems*, Section 8.6. Oxford: Newnes, 2002.
- [79] SINGH, B., SAHA, R., CHANDRA, A., AL-HADDAD, K., Static synchronous compensators (STATCOM): a review, *IET Power Electronics*, 2(4): 297-324, Jul. 2009.

- [80] MOLINA, M.G., MERCADO, P.E., Modeling and control of integrated STATCOM-SMES system to improve power system oscillations damping, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 3(4): 528-537, May 2008.
- [81] SRITHORN, P., SUMNER, M., YAO, L., PARASHAR, R., A STATCOM with supercapacitors for enhanced power system stability, *IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, York-England, 96-100, 2008.
- [82] EKANAYAKE, J.B., JENKINS, N., Selection of passive elements for a three-level inverter based static synchronous compensator, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(2): 655-661, Apr. 1999.
- [83] PIWKO, R.J., LARSEN, E.V., DAMSKY, B.L., FURUMASU, B.C., MITTLESTADT, W., EDEN, J.D., Thyristor controlled series compensation prototype installation at the Slatt 500 kV substation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3): 1460-1469, Jul. 1993.
- [84] SON, K.M., PARK, J.K., On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations, *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(4): 1306-1312, Nov. 2000.
- [85] DEL ROSSO, A.D., CANIZARES, C.A., DONA, V.M., A study of TCSC controller design for power system stability improvement, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(4): 1487-1496, Nov. 2003.
- [86] [www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/dfd0b019e1fe08a48325771f002dbfc5/\\$file/a02-0158.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/dfd0b019e1fe08a48325771f002dbfc5/$file/a02-0158.pdf) (Erişim Tarihi: Ocak 2013)
- [87] FUERTE-ESQUIVEL, C.R., ACHA, E., AMBRIZ-PEREZ, H., A thyristor controlled series compensator model for the power flow solution of practical power networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1): 58-64, Feb. 2000.
- [88] PASERBA, J.J., MILLER, N.W., LARSEN, E.V., PIWKO, R.J., A thyristor controlled series compensator model for power system stability analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(3): 1471-1478, Jul. 1995.
- [89] ACHA, E., FUERTE-ESQUIVEL, C.R., AMBRIZ-PEREZ, H., ANGELES-CAMACHO, C., *FACTS: Modelling and simulation in power networks*, Section 2.3.3. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [90] MEIKANDASIVAM, S., NEMA, R.K., JAIN, S.K., Behavioral study of TCSC device – a MATLAB/Simulink implementation, *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2(10): 630-635, 2008.

- [91] ARİFOĞLU, U., Alternatif akım – doğru akım sisteminde ayrık yöntem kullanımı ile optimal güç dağılımı hesabı için yeni bir yaklaşım. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 1993.
- [92] ARİFOĞLU, U., The power flow algorithm for balanced and unbalanced bipolar multiterminal ac-dc systems, Electric Power System Research, 64: 239-246, Mar. 2003.
- [93] KARABOGA, D., An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical Report – TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Oct. 2005.
- [94] AKAY, B., Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi (artificial bee colony) algoritmasının performans analizi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 2009.
- [95] HOLLAND, J.H., Adaptation in natural and artificial systems, Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press, 1975.
- [96] ÖZTÜRK, A., Güç sistemlerindeki gerilim kararlılığının genetik algoritma ile incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Faruk YALÇIN, 1984 yılında Sakarya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı' nda tamamladı. 2002 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü 2006 yılında dereceyle bitirdi. Askerlik görevini 2006-2007 yılları arasında yedek subay olarak tamamladı. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2009 yılında tamamlayarak Elektrik Yüksek Mühendisi ünvanını aldı. 2007-2009 yılları arasında otomasyon projelerinde çalıştı. 2009 yılında Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş.' de (SEDAŞ) elektrik mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı görevi sürdürmektedir.