

126656

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GENETİK
ALGORİTMA KULLANARAK OPTİMİZASYONA
YENİ BİR YAKLAŞIM**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Z. Elif AYGEN
(504952009)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Mart 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Mart 2002

Tez Danışmanı :

Prof. Dr. Nesrin TARKAN

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ömer USTA

Doç. Dr. İbrahim EKSİN

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (Y.T.Ü.)

Prof. Dr. Selim AY (Y.T.Ü.)

MART 2002

126656

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında yakın ilgi ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Nesrin TARKAN'a ve doktora tez çalışmasını proje olarak destekleyen İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsüne teşekkürlerimi sunarım.

Mart 2001

Z. Elif AYGEN



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİ	5
2.1. Elektrik Enerji Sistemlerinin Modellenmesi	6
2.2. Elektrik Enerji Sistemlerinde Optimizasyon	11
2.3. Elektrik Enerji Sistemlerinin Güvenliği	13
2.4. Elektrik Enerji Sistemlerinin Optimal Çalışma Koşullarının Bulunmasında Kullanılan Yöntemler	15
2.4.1. Klasik yöntemler	15
2.4.2. Gelişmekte olan yöntemler	16
3. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN ÇALIŞMA KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ	17
3.1. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)	21
3.1.1. Tristör kontrollü FACTS aygıtları	23
3.1.1.1. Statik VAR kompanzatör (SVC)	23
3.1.1.2. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC)	24
3.1.1.3. Tristör kontrollü faz kaydırıcı (TCPS)	25
3.1.2. Tristör Kontrollü FACTS Aygıtlarının Güç Akışında Modellenmesi	25
3.1.2.1. SVC'nin güç akışı modeli	26
3.1.2.2. TCSC'nin güç akışı modeli	27
3.1.2.3. TCPS'nin güç akışı modeli	28
3.2. FACTS Aygıtlarının Optimal Yerleşimi	30

4. GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ KULLANILARAK ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN OPTİMAL ÇALIŞMA DURUMLARININ BELİRLENMESİ	33
4.1. Problemin Matematiksel Modeli	33
4.2. Problemin Çözümünde Kullanılan Genetik Algoritma Modeli	37
4.2.1. Amaç fonksiyonu	37
4.2.2. Kodlama (kromozom gösterimi)	39
4.2.3. Seçim	40
4.2.4. Çaprazlama ve mutasyon	42
4.2.4.1. Çaprazlama operatörleri	42
4.2.4.2. Mutasyon Operatörleri	43
4.2.5. Topluluğun yenilenmesi	45
5. ÖRNEK SİSTEM İNCELEMELERİ	48
5.1. Generatörlerin Yakıt Maliyeti Optimizasyonu	48
5.2. Kayıp Optimizasyonu	58
5.3. FACTS Aygıtlarının Sistem Üzerindeki Etkileri.....	58
5.3.1. TCSC, TCPS ve SVC'nin yakıt maliyetine etkisi	59
5.3.2 TCSC, TCPS ve SVC'nin kayıplara etkisi	63
5.3.3 Güvenlik kısıtlamaları, hatlardaki aktif güç akışı ve bara gerilimleri üzerindeki kısıtlamalarla optimizasyon	69
5.3.4 Çok amaçlı maliyet optimizasyonu	73
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	75
KAYNAKLAR	78
EK A. GENETİK ALGORİTMALAR	84
A.1.Genetik Algoritmaların Temel Terminolojisi	85
A.2.Basit Genetik Algoritma	85
EK B. ÖRNEK SİSTEM VERİLERİ	88
EK C. OPTİMİZASYON SONUÇLARI	92
ÖZGEÇMİŞ	114

KISALTMALAR

AGK	: Aktif Güç Kaybı
FACTS	: Flexible AC Transmission System (Esnek Alternatif Akım Sistemi)
GA	: Genetik Algoritma
OPF	: Optimal Güç Akışı
RGK	: Reaktif Güç Kaybı
SVC	: Statik Var Compensator (Statik Var Kompanzatör)
TCSC	: Thyristor Controlled Series Capacitor (Tristör kontrollü seri kapasitör)
TCPS	: Thyristor Controlled Phase Shifter (Tristör kontrollü faz kaydırıcı)
TSC	: Thyristor Switched Capacitor (Tristör kontrollü seri kapasitör)
YM	: Yakıt Maliyeti

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1 : IEEE-30 baralı test sisteminin geleneksel güç akışı sonuçları	49
Tablo 5.2 : GA'da kullanılan operatörler	56
Tablo 5.3 : GA'da kullanılan parametre değerleri.....	50
Tablo 5.4 : Yakıt maliyeti optimizasyon sonuçları	58
Tablo 5.5 : Aktif ve reaktif güç kayıplarının optimizasyonu	59
Tablo 5.6 : TCSC'nin yakıt maliyetine etkisi.....	60
Tablo 5.7 : TCPS'nin yakıt maliyetine etkisi	61
Tablo 5.8 : SVC'nin yakıt maliyetine etkisi.....	62
Tablo 5.9 : TCSC'nin aktif güç kayıplarına etkisi	63
Tablo 5.10 : TCPS'nin aktif güç kayıplarına etkisi.....	64
Tablo 5.11 : SVC'nin aktif güç kayıplarına etkisi.....	65
Tablo 5.12 : TCSC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi	66
Tablo 5.13 : TCPS'nin reaktif güç kayıplarına etkisi.....	67
Tablo 5.14 : SVC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi	68
Tablo 5.15 : Güvenlik indisleri.....	70
Tablo 5.15 : Güvenlik kısıtlamalı optimizasyon	71
Tablo 5.17 : Güvenlik kısıtlamalı optimizasyona FACTS aygıtlarının etkisi...	71
Tablo 5.18 : Hat akışı kısıtlamaları altında optimizasyon.....	72
Tablo 5.19 : Bara gerilimlerinin kısıtlamaları altında optimizasyon.....	73
Tablo 5.20 : Maliyet optimizasyonu sonuçları	74
Tablo A.1 : Genetik algoritmalarda kullanılan terimler	85
Tablo B.1 : Bara verileri	89
Tablo B.2 : Generatör verileri	89
Tablo B.3 : Dal verileri	90
Tablo B.4 : Generatör Yakıt Maliyeti Katsayıları (Durum 1)	91
Tablo B.5 : Generatör Yakıt Maliyeti Katsayıları (Durum 3)	91
Tablo B.6 : Generatör Yakıt Maliyeti Katsayıları (Durum 2)	91
Tablo C.1.a: Yakıt maliyeti ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında bara sonuçları	92
Tablo C.1.b: Yakıt maliyeti ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında hat sonuçları	93
Tablo C.2.a: Yakıt maliyeti parçalı ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında bara sonuçları	94
Tablo C.2.b: Yakıt maliyeti parçalı ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında hat sonuçları	95
Tablo C.3.a: Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon alındığında bara sonuçları	96
Tablo C.3.b: Yakıt maliyeti parçalı sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon alındığında hat sonuçları	97
Tablo C.4.a: Maliyet optimizasyonu bara sonuçları	98

Tablo C.4.b: Maliyet optimizasyonu hat sonuçları.....	99
Tablo C.5.a: Hat akışları kısıtlamaları altında bara sonuçları	100
Tablo C.5.b: Hat akışları kısıtlamaları altında hat sonuçları	101
Tablo C.6.a: Bara gerilim kısıtlamaları altında bara sonuçları.....	102
Tablo C.6.b: Bara gerilim kısıtlamaları altında hat sonuçları.....	103
Tablo C.7.a: (10-20) hattı devre dışı kaldığında bara sonuçları	104
Tablo C.7.b: (10-20) hattı devre dışı kaldığında hat sonuçları	105
Tablo C.8.a: (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCPS'li sistemin bara sonuçları.....	106
Tablo C.8.b: (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCPS'li sistemin hat sonuçları.....	107
Tablo C.9.a: (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCSC'li sistemin bara sonuçları.....	108
Tablo C.9.b: (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCSC'li sistemin hat sonuçları.....	109
Tablo C.10.a: (27-30) hattı devre dışı kaldığında bara sonuçları	110
Tablo C.10.b: (27-30) hattı devre dışı kaldığında hat sonuçları	111
Tablo C.11.a: (27-30) hattı devre dışı kaldığında, SVC'li sistemin bara sonuçları.....	112
Tablo C.11.b: (27-30) hattı devre dışı kaldığında, SVC'li sistemin hat sonuçları.....	113

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Termik birimin giriş-çıkış eğrisi	7
Şekil 2.2 : Termik birimin artımsal ısı oran karakteristiği	7
Şekil 2.3 : Transformatörün π eşdeğer devresi	9
Şekil 2.3 : İletim hattının π eşdeğer modeli	10
Şekil 3.1 : Seri kompanzasyon durumunda aktif gücün yük açısına bağlı değişimi	19
Şekil 3.2 : Faz açısı kontrolünde aktif gücün yük açısına bağlı değişimi	21
Şekil 3.3 : Tristör kontrollü FACTS aygıtları	23
Şekil 3.4 : Tristör kontrollü kapasitör ve reaktör kullanan SVC	24
Şekil 3.5.a : Tristör anahtarlama kapasitör kullanan TCSC	25
Şekil 3.5.b : Seri kapasitöre paralel bağlı tristör kontrollü reaktör	25
Şekil 3.6 : Güç iletim açısının kontrolü için tristör kontrollü faz kaydırıcı transformatör	26
Şekil 3.7 : SVC'nin güç akışı modeli	27
Şekil 3.8 : Seri kompanzasyon yapılan hat	27
Şekil 3.9 : TCPS'nin eşdeğer devresi	29
Şekil 3.10 : TCPS'nin güç enjeksiyon modeli	29
Şekil 4.1 : Penaltı fonksiyonu	38
Şekil 4.2 : Ortalama değer a 'ya göre değişimi	45
Şekil 4.3 : Optimizasyon probleminde kullanılan GA	47
Şekil 5.1 : Yakıt maliyeti ikinci dereceden fonksiyon alındığında seçim operatörlerinin değişimi	50
Şekil 5.2 : Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon alındığında seçim operatörlerinin değişimi	50
Şekil 5.3 : Yakıt maliyeti parçalı-ikinci dereceden bir fonksiyon olarak alındığında seçim operatörlerinin değişimi	51
Şekil 5.4 : Yakıt maliyeti ikinci dereceden fonksiyon alındığında çaprazlama operatörlerinin değişimi	51
Şekil 5.5 : Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon alındığında çaprazlama operatörlerinin değişimi	52
Şekil 5.6 : Yakıt maliyeti parçalı-ikinci dereceden bir fonksiyon olarak alındığında çaprazlama operatörlerinin değişimi	52
Şekil 5.7 : Yakıt maliyeti ikinci dereceden fonksiyon alındığında mutasyon operatörlerinin değişimi	53
Şekil 5.8 : Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon alındığında mutasyon operatörlerinin değişimi	53
Şekil 5.9 : Yakıt maliyeti parçalı-ikinci dereceden bir fonksiyon olarak alındığında mutasyon operatörlerinin değişimi	54
Şekil 5.10 : Çaprazlama olasılığının değişimi	54

Şekil 5.11	: Başlangıç topluluğundaki birey sayısının değişimi	55
Şekil 5.12	: Mutasyon olasılıklarının değişimi.....	55
Şekil 5.13	: GA'nın nesiller boyunca değişimi	57
Şekil 5.14	: TCSC'nin yakıt maliyetine etkisi.....	60
Şekil 5.15	: TCPS'nin yakıt maliyetine etkisi	61
Şekil 5.16	: SVC'nin yakıt maliyetine etkisi.....	62
Şekil 5.17	: TCSC'nin aktif güç kayıplarına etkisi	64
Şekil 5.18	: TCPS'nin aktif güç kayıplarına etkisi	65
Şekil 5.19	: SVC'nin aktif güç kayıplarına etkisi	66
Şekil 5.20	: TCSC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi	67
Şekil 5.21	: TCPS'nin reaktif güç kayıplarına etkisi	68
Şekil 5.22	: SVC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi	69
Şekil A.1	: Akıllı sistemlerin sınıflandırılması	84
Şekil A.2	: Genetik algoritma ile maksimumu bulunacak örnek fonksiyon ...	86
Şekil B.1	: IEEE-30 baralı test sistemi.....	88

SEMBOL LİSTESİ

P	: Aktif güç
R	: Reaktif güç
b	: Süseptans
g	: Geçirgenlik
r	: Direnç
t	: Transformatör çevirme oranı
x	: Reaktans
V	: Gerilim
δ	: Faz açısı
ϕ	: TCPS'nin kontrol açısı
C	: Maliyet fonksiyonu
IS	: İletim hattının ısı sınırı
TG	: Temel güç
TM	: Tesis masrafı
a,b,c,d,e	: Maliyet katsayıları
λ	: Penaltı katsayısı
f	: Uygunluk fonksiyonu
TP	: Topluluktaki birey sayısı
G	: Nesil sayısı

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GENETİK ALGORİTMA KULLANARAK OPTİMİZASYONA YENİ BİR YAKLAŞIM

ÖZET

Çağdaş bir elektrik güç sisteminin temel işlevi, kabul edilebilir güvenilirlik ve kalitede, mümkün olduğunca ekonomik olarak tüketicilere gerekli enerjiyi sağlamaktır. Güç sisteminin en ekonomik çalışma koşullarının bulunması için optimal güç akışı incelemeleri yapılmalıdır.

Optimal güç akışının temel amacı, elektrik güç sisteminde çeşitli amaçlar için çeşitli kısıtlamalar altında optimum çalışma noktalarının bulunmasıdır. Amaçlara ve kısıtlamalara bağlı olarak farklı optimal güç akışı formülasyonları vardır. Optimal güç akışında ele alınabilecek temel amaçlar, üretim birimlerinin yakıt maliyetinin veya/ve güç sistemindeki kayıpların azaltılması, sistem güvenliğinin artırılması, reaktif güç aygıtlarının optimum değerlerinin bulunması şeklinde olabilir.

Optimal güç akışı probleminde pek çok eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları vardır. Bunlar, üretim ve tüketimdeki denge, generatörlerin aktif ve reaktif güç üretimleri üzerindeki kısıtlamalar, generatör ve yük baralarının gerilimleri üzerindeki kısıtlamalar, iletim hatları ve transformatörler üzerindeki güç akışı sınırları ve diğer kontrol değişkenleri üzerindeki sınırlardır. Bunların ışığında, optimal güç akışı problemi, geniş ve zor bir matematiksel programlama tekniği olduğu söylenebilir.

Optimal güç akışı probleminin çözümü için uygulanan pek çok optimizasyon yönteminin en bilinenleri, lineer programlama, lineer olmayan programlama, kuadratik programlama ve Newton yöntemine bağlı çözümlerdir. Bu çözüm yöntemleri, global çözüme ulaşmak için birtakım varsayımlar yaparak, amaç fonksiyonunu ve bağıntıları basitleştirip konveks bir yapı oluşturur. Fakat gerçekte optimal güç akışı problemi konveks olmayan bir yapıya sahiptir ve pek çok yerel minimum vardır. Bu yapıdaki klasik optimizasyon yöntemleri, başlangıç noktalarına karşı duyarlıdır. Bu yöntemler, optimal güç akışının özel durumlarıyla sınırlıdır ve amaç fonksiyonları ile kullanılan kısıtlamalarda fazla bir serbestlik içermez.

Son yıllarda, yapılması planlanan iletim hatları ile üretim merkezlerinin yüksek maliyetleri, çevre koşulları ve geçiş haklarındaki zorluklar, var olan güç sistemlerinin iletim kapasitelerini ve kontrol edilebilirliğini artırma gereksinimini doğurmuştur. Bu gereksinimi karşılamak amacıyla FACTS (Flexible AC Transmission System- Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) kavramı ile önerilmiştir.

Güç elektroniği teknolojisinin ilerlemesiyle hızla gelişen yeni kontrol kavramı, FACTS, güç sisteminin daha esnek, güvenli ve ekonomik olarak çalışmasında etkili olmaya başlamıştır. FACTS teknolojisi, hat gerilimi, empedansı ve faz açısı üzerindeki kontrol ile gerekli düzeltmeleri gerçekleştirir. Ancak kontrol

değişkenlerinin artması, sistemin işletimini karmaşıktırmıştır. Tüm kontrol aygıtları arasında iyi bir koordinasyon gereklidir. FACTS aygıtları da optimal güç akışına dahil edildiğinde, çözüm yöntemi olarak klasik yöntemlerden farklı daha genel ve güvenli bir çözüm yöntemi gereklidir.

Son yıllarda, bilgisayara dayalı, doğal seçim ve genetikten esinlenen problem çözme algoritmaları olan genetik algoritmalar, güç sistemlerinde zor optimizasyon problemlerin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada da güç sisteminin optimum çalışma noktalarının bulunması için, FACTS aygıtlarının tipinin, yerinin ve kontrol değişkenlerinin dahil edildiği geliştirilmiş genetik algoritma çözümü önerilmiştir

A NEW APPROACH TO ELECTRICAL POWER SYSTEM OPTIMIZATION BY USING GENETIC ALGORITHM

SUMMARY

The main objective of a modern electrical power system is to supply power to the consumers with good quality in an economic and reliable way. In order to find the economic operation points of the power system, optimal power flow should be carried out.

The principal goal of the optimal power flow is to provide the electric utility with suggestions to optimize the current power system with respect to various objectives under various constraints. Depending on the specific objectives and constraints, there are different optimal power formulations. The typical objectives of optimal power flow are minimization of the total generation cost and/or minimization of the power losses, maximization of power system security and reactive power optimization.

A large number of equality and inequality constraints can be included in the optimal power flow formulation. In addition to power flow constraints and active power generation limits, there are limits on the generator reactive power, limits on the voltage magnitudes at generation and load buses, flows on transmission lines or transformers and limits on control variables. In view of these, optimal power flow is a large and difficult mathematical programming.

Many solution techniques have been applied to the optimal power flow problem such as linear programming, non-linear programming, quadratic programming and Newton-based methods. These methods rely on convexity to obtain the global optimum solution and as such are forced to simplify relationships in order to ensure convexity. However, optimal power problem is in general non-convex and as a result many local minima exist. Also, these classical optimization methods are sensitive to starting points. These methods are usually confined to specific cases of the optimal power flow and do not offer great freedom in objective functions or the types of constraints that may be used.

In recent years, environmental and economic problems, which have limited the construction of new transmission and generation centers and the restructuring of the electric power system necessitate an increase in transmission capacity and controllability of the power system. In order to provide necessary control, FACTS (Flexible AC Transmission System) has been introduced.

Depending on the improvements of the power electronic technology, a new control concept FACTS (Flexible AC Transmission System) has been effective in flexible, secure and economic operation of power transmission system. FACTS technology has provided the needed corrections of transmission functionality by controlling line voltage, impedance and phase angle. However, with all these controls, system

operation has become more complicated. When FACTS devices are incorporated in optimal power flow, a more general and secure optimization method that does not have the shortcomings of the classical methods is necessary.

In recent years, genetic algorithms which are computer based problem solving systems based on natural selection and genetics have been applied to difficult optimization problems where classical methods fail to find an answer.

In this study, a refined genetic algorithm is proposed to find the optimal economic operation of power system incorporating types, location and control variables of FACTS devices.



1. GİRİŞ

Çağdaş bir elektrik güç sisteminin temel işlevi, kabul edilebilir güvenilirlik ve kalitede, mümkün olduğunca ekonomik olarak tüketicilere gerekli enerjiyi sağlamaktır. Elektrik güç sistemi bu görevi yerine getirirken, aynı zamanda bir takım işletim kısıtlamaları içinde kalmak zorundadır. İşletim kısıtlamaları koşulları altında, en uygun enerji durumunu önceden belirlemek amacıyla, elektrik güç sistemleri analizi ve bu analizin içinde özellikle optimal güç akışı (OPF) incelemeleri yapılmaktadır.

Optimal güç akışında göz önüne alınabilecek temel amaçlar, üretim birimlerinin yakıt maliyetinin ve/veya güç sistemindeki kayıpların azaltılması, sistem güvenliğinin artırılması, reaktif güç aygıtlarının sağlayacağı niteliklerde optimal değerlerin bulunması şeklinde olabilir. Optimal güç akışı problemi hesaplarında kullanılan pek çok eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları vardır. Bunlar, üretim ve tüketim güçleri arasındaki dengeyi belirleyen eşitlikler, generatörlerin aktif ve reaktif güç üretimleri üzerindeki kısıtlamalar, generatör ve yük baralarının gerilimlerindeki kısıtlamalar, iletim hatları ile transformatörler için güç akışı sınırları ve diğer kontrol değişkenlerinin sınırlarıdır. Bunlara ayrıca, sistemdeki hat, transformatör ya da generatörlerin bir veya birkaçının devreden çıkması gibi, göz önüne alınması gereken işletim kısıtlamaları da eklenebilir [1-4].

Optimal güç akışı problemi, geniş ve zor bir matematiksel programlama tekniğini gerektirir. Bu problemin çözümü, ilk defa 1962'de Carpentier tarafından tartışılmış ve güvenilir bir çözüm için gerekli bilgisayar kodlarının oluşturulması oldukça uzun zaman almıştır [1-4]. Problemin çözümüne uygulanan optimizasyon tekniklerinden en bilinenleri, lineer programlama, lineer olmayan programlama, kuadratik programlama, Newton yöntemine bağlı çözüm yollarıdır [5,6]. Bu çözüm yöntemleri, global çözüme ulaşmak için birtakım varsayımlar yaparak, amaç fonksiyonunu ve bağıntıları basitleştirip konveks bir yapı üzerine dayanmaktadır. Bu yapıdaki klasik optimizasyon yöntemleri, başlangıç noktalarına karşı duyarlı olup, OPF'nin özel

durumlarıyla sınırlıdır. Ayrıca amaç fonksiyonları ile kullanılan kısıtlamalarda fazla bir serbestlik içermez. Bu durum, bu yöntemlerin kullanımında bir sakınca olarak ortaya çıkmaktadır.

Son yıllarda, endüstrileşen ülkelerdeki iletim sistemlerinin yükü oldukça artmıştır. Sistem kapasitelerini kararlılık sınırlarına yaklaşan düzeylere kadar yükselten bu yük, üretim birimlerinin optimal güç dağılımına daha fazla kısıtlama getirerek, maliyeti arttırmaktadır. Ayrıca, güç sisteminin yeniden yapılanması ve özelleştirilmesiyle oluşan rekabet ortamında, bağımsız güç üreticileri de hatlardaki güç akışlarını belirli koridorlar üzerinde sınırlamak zorundadır. Böylelikle ortaya çıkan yeni iletim hatları ile üretim merkezlerinin planlanmasındaki yüksek maliyetlere çevre koşulları ve geçiş haklarındaki zorluklar da eklenince, var olan güç sistemlerinin kontrol edilebilirliği ile iletim kapasitelerini artırma gereksinimi doğmuştur. Bunu sağlayacak çözüm, Hingorani ve EPRI tarafından 1980'lerde, FACTS (Flexible AC Transmission System=Esnek alternatif akım iletim sistemleri) kavramı ile önerilmiştir [7-9].

Güç elektroniği teknolojisinin ilerlemesiyle hızla gelişen FACTS aygıtları, güç sisteminin daha esnek, güvenli ve ekonomik olarak çalışmasında etkili olmaya başlamıştır. FACTS'ler, güç sisteminde, hem sürekli hem de geçici durumlarda hızlı ve esnek yeni kontrol olanakları sağlamaktadır. Bu kontrol olanakları, iletimin seri ve şönt empedansı, faz açısı ve nominal frekansın altında meydana gelen salınımları üzerinde gerçekleşmektedir. Güç endüstrisinin özelleştirilmeye yönelerek, güç akışının daha iyi kontrolüne gereksinim duyulduğu bu günlerde FACTS'lerin kontrolünün daha fazla önem kazanacağı açıktır [7-9]. Buna karşılık kontrol değişkenlerinin artması, sistemin işletimini karmaşıktırıştır. Generatörlerin aktif güç ve gerilimleri, transformatörlerin ayar kademeleri, anahtarlamalı seri ve şönt kompanzasyonla ilgili olan bu kontrol değişkenleri, birbirlerini etkilediğinden tüm kontrol aygıtları arasında iyi bir koordinasyon gereklidir. Bunu sağlamada klasik yöntemlerin yetersiz kalacağı açıktır. FACTS aygıtları da optimal güç akışına dahil edildiğinde [10-14], çözüm yöntemi olarak klasik yöntemlerden farklı ancak daha genel ve güvenli bir çözüm yöntemi gerekli olacaktır.

“Akıllı” sistemler içinde önemli bir yer alan evrim algoritmaları, güç sistemlerinde zor optimizasyon problemlerin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır [15]. Evrim,

her canlı organizmayı tarihsel olay zinciri içerisinde birbirine bağlayan biyolojik bir kavramdır. Bu zincirdeki her canlı, çevrenin etkisiyle rastlantısal olaylar sonucu seçilmiş bir üründür. Zaman içinde bir çok nesilden sonra, rastlantısal değişimler ve doğal seçicilik, bireylerin davranışlarını şekillendirir ve türlerin çevre koşullarına uymasına yardım eder. Bu uyum, olağandışı ve zorlayıcı olabilir; bu da evrimin yaratıcı olduğunu gösterir.

Evrin, geçerli fizik yasalarının topluluklar ve türler üzerindeki etkisini de yansıttığı için mühendislik problemlerine akılcı çözümler getirebilir. Bu nedenle, klasik algoritmaların çözüm üretmede yetersiz kalabildiği bozucu etkiler, rastlantısallık ve lineer olmayan kompleks dinamikler içeren karmaşık problemlerde bilgisayar destekli evrim uygulamalarının uygun çözüm vereceği düşüncesine varılabilir [16].

Evrin algoritmaların en çok kullanılanı, genetik algoritmalar. John Holland ve öğrencileri tarafından 1960'larda geliştirilen genetik algoritmalar (GA) [17], doğal seçim ve genetik mekaniğine dayalı arama algoritmalarıdır. Bu algoritmalar, çözüm kümesini kodlayarak, topluluk kümesi içinde, olasılığa bağlı operatörler ile sadece amaç fonksiyonu değerlerini kullanarak arama yaparlar. Bu algoritmaların, özellikle lineer olmayan, çok değişkenli, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde güçlü bir arama yöntemi oldukları kanıtlanmıştır [15-19]. Güç sistemlerinde genetik algoritma uygulamaları, ekonomik yük dağıtımı [20-23], arıza yerinin bulunması [24], hidrotermal santrallerin optimal işletimi [25], reaktif güç kompanzasyonu [26-28], güç sisteminde faz kaydırıcıların optimal yerleşimi [29], büyük dağıtım sistemlerinin planlaması [30], güvenilirlik indislerinin hesaplanması [31] ve güç sistemi modernizasyonu [32] gibi konular üzerinde yaygınlaşmıştır.

Bu çalışmada, elektrik güç sisteminin optimal çalışma noktalarının bulunmasında GA kullanımından yararlanan bir çözüm önerilmiştir. Problemin çözümüne, güvenlik kısıtlamaları altında FACTS aygıtlarının tipi, yeri ve kontrol değişkenleri de dahil edilmiştir. GA uygulamasının başlıca parametreleri, amaç fonksiyonunun kurulması, kodlamada kullanılan alfabe, başlangıç topluluğunun üretilmesi, seçim fonksiyonunun oluşturulması, çaprazlama ve mutasyon gibi operatörlerin belirlenmesi ve algoritmanın sonlandırma kriteridir [17-19,33]. Bunlar kullanılarak problemin çözümü için en uygun modelin gerçekleştirilmesinin gerekli olduğu düşünülerek bu uygun modelin oluşturulmasına yönelinmiştir.

Çalışmanın giriş bölümünü izleyen ikinci bölümünde, enerji sisteminin modellenmesi üzerinde durularak, optimal güç akışı problemi ve sistemin güvenliği açıklanmış, klasik çözüm yöntemleriyle ilgili kısa açıklamalar yapılmıştır.

Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan FACTS aygıtları tanıtılmış, bunların güç akışında kullanılan sürekli durum modelleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde, problemin matematiksel modeli ve çözümü için önerilen genetik algoritma modeli oluşturulmuştur.

Beşinci bölüm, örnek sistem üzerindeki sayısal uygulamaları içermektedir.



2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİ

Elektrik enerjisi, temiz bir enerji olmasının yanı sıra, diğer enerji biçimlerine de kolayca dönüştürülebilir. Bu kullanım kolaylığı nedeni ile modern toplum yaşamında elektrik enerjisine olan talep hızla artmaktadır. Elektrik enerjisinin tüketicilere ulaştırılmasında akla gelen en uygun yol, üretim merkezlerinin, olabildiğince tüketicinin (bir ölçüde nüfusun) fazla olduğu yerlere tesis edilmesidir. Ancak, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan doğal enerji kaynaklarının yerleri, üretim merkezlerinin her istenilen yere kurulmasını kısıtlamaktadır. Örneğin, hidrolik santrallerin yerlerini su kaynakları belirlemektedir.

Bir elektrik enerji sistemi belli başlı üç bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler tüketiciler, üretim birimleri ve bunları birbirine bağlayan iletim hatlarıdır. Bu bileşen sistemi, önceleri yerel biçimde işletilirken, gelişen tüketim ve bununla orantılı olarak artan üretim ile birlikte, birçok sistemin birbirine bağlantılı çalıştırılması zorunluluğuyla çok büyümüş ve gelişmiştir. Bunun sonucu olarak, üretim ve tüketim merkezleri arasında uzaklıkların büyümesi, uzun iletim hatlarının tesisini ve iletim sistemlerinin önemini ortaya çıkarmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ile oluşan talep, yeni üretim merkezlerinin kurulmasını ve yeni iletim hatlarının devreye alınmasını gerektirmektedir. Ancak çevre etkileri ve ekonomik koşullar göz önüne alındığında var olan sistem elemanlarından en uygun biçimde yararlanma gereği ortaya çıkmaktadır. Daha başka etkenlerin girdiği bu problem ise sistem yapısı ve işleyişine bağlı olarak oldukça karmaşık bir durum göstermektedir.

Bir elektrik enerji sistemi, gerçekleştirilirken aşağıdaki temel ölçütleri yerine getirmelidir:

- Sistem, sürekli değişim halinde olan aktif ve reaktif güç talebini karşılamalıdır. Enerjinin diğer tiplerinden farklı olarak, elektrik enerjisi uygun şekilde yeterli miktarlarda depolanamaz. Bu yüzden, yeterli döner güç yedekleri korunmalı ve bunlar her zaman kontrol edilebilir olmalıdır.

- Sistem, en düşük maliyette ve en az çevresel etkiyle enerji sağlamalıdır
- Sistemin sağladığı enerji kalitesi, standartlara uygun olmalıdır (sabit frekans, sabit gerilim ve güvenilirlik seviyesi)

Bu nedenle sistem işleticileri, sistemin tasarım ve işletim aşamalarında, yukarıdaki gerekleri yerine getirebilecek en uygun seçenekleri göz önüne almak zorundadır. Seçim işlemi, mühendislik deneyiminin yanı sıra, günümüzde bilgisayarların gelişmesi ile çeşitli matematiksel yöntemlerden yararlanılarak sistemin tasarım ve işletiminin her aşamasında en uygun çözüm aranmalıdır [1,2,34,35].

2.1 Elektrik Enerji Sistemlerinin Modellenmesi

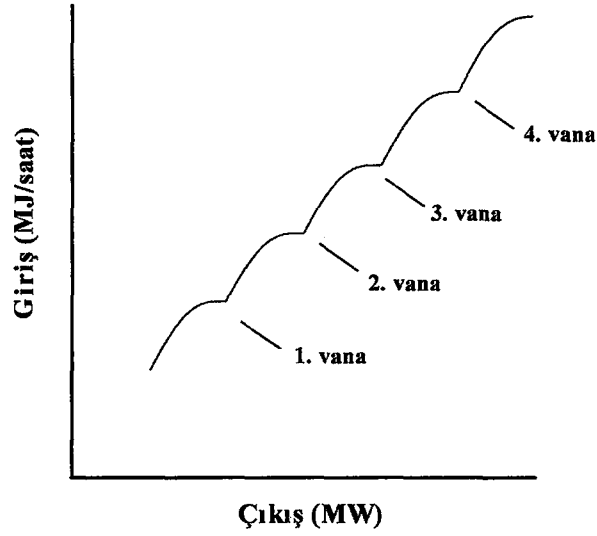
Elektrik enerji sisteminin modeli, yukarıda verilen kıstasları sağlayacak şekilde, en ekonomik çalışma durumunun bulunması ile gerçekleşir. Genel olarak sistem, pek çok bileşene sahip alt sistemlerden oluşur. Kullanılan modellerdeki ayrıntılar, istenilen doğruluk derecesine ve probleme göre değişmektedir.

Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan enerji kaynakları, tükenen ya da yenilenebilir enerji kaynakları olarak ikiye ayrılır. Hidrokarbon yakıtları, termik santrallerde kullanılır ve zamanla tükenen enerji kaynaklarıdır. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan en yaygın yenilenebilir enerji kaynağı su gücüdür. Ancak yaygınlığı ile birlikte yakıt maliyet modelleri hesaplara girerek, diğerlerine göre daha karmaşık bir yapı oluşturduğundan bu çalışmada termik santral modeli üzerinde durulmuştur.

Termik santrallerdeki elektrik enerjisi, buhar türbinlerinin sağladığı, mekanik enerjiyle üretilir. Yakıt, kazanlarda yakılır ve enerji kazandan ısı enerjisi olarak çıkar. Bunun sonucunda, yüksek sıcaklık ve basınçta oluşan buhar türbinlerle mekanik enerjiye çevrilir ve generatörleri çalıştırır.

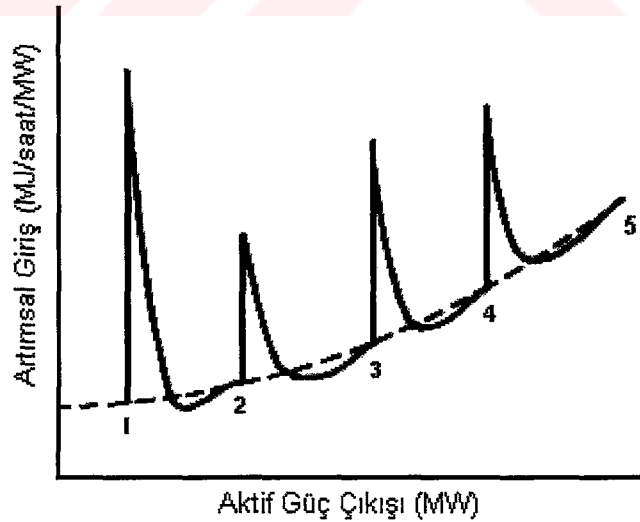
Üretim birimine ilişkin giriş çıkış modeli, ekonomik çalışma açısından önem taşımaktadır. Bu modelde, giriş ısı enerjisi (H), çıkış ise generatörün aktif güç üretimidir (P). Giriş genelde, MJ/saat (Mbtu/saat, ya da kcal/saat), çıkış ise MW olarak ölçülür. Bir termik santralin, tipik giriş çıkış eğrisi, Şekil 2.1'de verilmiştir

Artımsal ısı oran karakteristiği ($\Delta H/\Delta P$) olarak hesaplanır. Artımsal ısı oran karakteristiği, yakıt maliyetiyle çarpıldığında, artımsal maliyet eğrisi çıkar.



Şekil 2.1 Termik birimin giriş-çıkış eğrisi

Artımsal ısı oran karakteristiğinin pratikte görülen biçimi, Şekil 2.2’de görülmektedir. Büyük buhar türbinleriyle tahrik edilen generatörlere, buhar girişleri için vanalar konulmuştur. Bu vanalar açıldığında aktif güç artar, ancak bu olay, artımsal ısı oran karakteristiğinde süreksizlik noktaları oluşturur [1,2,36].



Şekil 2.2 Termik birimin artımsal ısı oran karakteristiği

Generatörün yakıt maliyet eğrileri, çoğunlukla yaklaşık olarak, ikinci dereceden bir fonksiyon,

$$C_G = a + bP_G + c P_G^2 \quad (2.1)$$

şeklinde verilir. Bu ifadede

a, b, c generatörün yakıt maliyeti katsayıları

P_G generatörün aktif güç çıkışı

olarak hesaba katılmıştır. Burada, yakıt maliyeti katsayıları, en küçük kareler tahmin yöntemiyle, ısı oran katsayılarından belirlenebilir. Yakıt maliyetleri, süreksizlik noktalarını da modelleyerek daha gerçekçi bir şekilde parçalı ikinci dereceden bir yapıda

$$C_G = \begin{cases} a_1 + b_1 P_G + c_1 P_G^2 & P_G^{\min} \leq P_G \leq P_{G1} \\ a_2 + b_2 P_G + c_2 P_G^2 & P_{G1} \leq P_G \leq P_{G2} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ a_m + b_m P_G + c_m P_G^2 & P_{Gm-1} \leq P_G \leq P_G^{\max} \end{cases} \quad (2.2)$$

gösterilebilir. (2.1) modelinden farklı olan değerler ise şunlardır:

$P_G^{\min}$ ve $P_G^{\max}$ generatörün minimum ve maksimum aktif güç üretimi

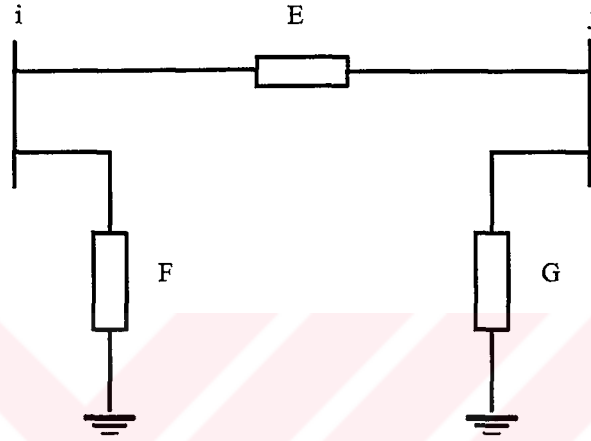
a_j, b_j, c_j generatörün, j . güç seviyesindeki maliyet katsayıları

Benzer şekilde gene süreksizlik noktalarını modellemek amacıyla yakıt maliyetinin sinüs bileşenine sahip matematiksel modeli

$$C_G = a + b P_G + c P_G^2 + |d \sin(e (P_G^{\min} - P_G))| \quad (2.3)$$

şeklinde oluşturulabilir [1,2,18,36].

Elektrik güç sistemini oluşturan başlıca diğer elemanlar, senkron generatör, transformatör, iletim hatları ve yüklerdir. Buhar türbinleri ile tahrik edilen generatörlerin optimal çalışma incelemelerinde kullanılan modellerinde, eşdeğer reaktans arkasında klasik bir gerilim kaynağı olarak gösterilmesi yeterli olmaktadır. Çok çeşitli modelleri olan ve genellikle bir empedansa indirgenebilen transformatörler, ayar kademeleri göz önüne alındığında π eşdeğer devresiyle modellenenir. Şekil 2.3'de transformatörün π eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2.3 Transformatörün π eşdeğer devresi

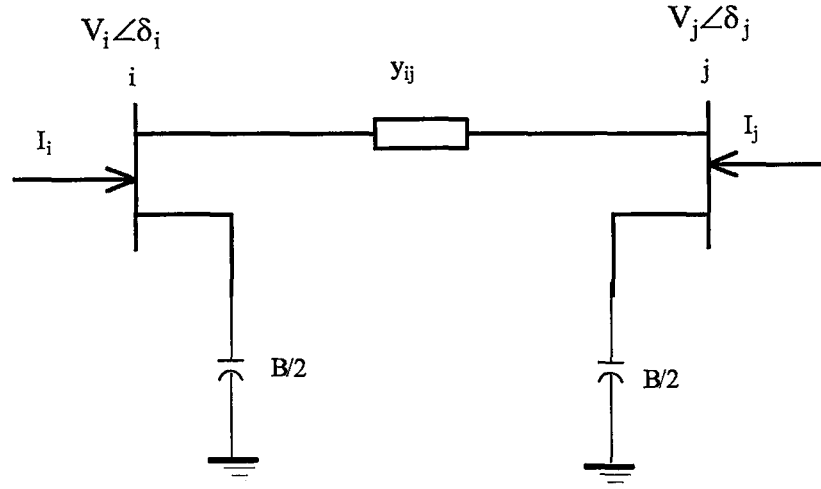
i ve j baralarının gerilimleri sırasıyla V_i ve V_j , transformatörün çevirme oranı t , transformatör empedansının admitans olarak ifadesi y_{ij} olarak alınırsa, transformatörün eşdeğer devresindeki parametre değerleri aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} E &= y_{ij} \\ F &= \left(\frac{1}{t} - 1\right) \left[\left(\frac{1}{t} + 1\right) + \frac{V_i}{V_j} \right] y_{ij} \\ G &= \left(\frac{1}{t} - 1\right) y_{ij} \frac{V_i}{V_j} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Eşdeğer devrenin seri empedansı, transformatörün seri empedansına eşittir ve F ve G şönt parametreleri çevirme oranındaki değişimi yansıtmak amacıyla değiştirilir.

İletim hat modellerinde de π eşdeğer devresi kullanılması uygun olur. π eşdeğer modeli, çeşitli amaçlarla, hat başı ve sonuna bağlanan şönt elemanların hatta

eklenebilme kolaylığı ve düğüm sayısında değişiklik yapmamaları nedeniyle tercih edilmektedir. İletim hattının π eşdeğer modeli de aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.4 İletim hattının π eşdeğer modeli

Şekilde,

V_i, V_j :i. ve j. bara gerilimleri

δ_i, δ_j :i. ve j. bara gerilimlerinin açıları

B :i ve j baraları arasındaki hattın süseptansı

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} \quad z_{ij} \quad :i \text{ ve } j \text{ baraları arasındaki hattın empedansı}$$

olarak alınmıştır. Yük modeli kurulurken, güç akışı hesaplarına uygunluğu açısından genellikle sabit güç modeli ele alınmaktadır [1-3]. Elektrik güç sisteminde, güç akışını veren denklemler, Bölüm 4.1'de problemin matematiksel modelinde verilmiştir. Bu denklemler, literatürde en yaygın olarak kullanılan Newton-Raphson güç akışı yöntemiyle çözülmüştür [1,2,34-36].

2.2 Elektrik Enerji Sistemlerinde Optimizasyon

Elektrik enerji sisteminin modeli oluşturulduktan sonra, sistemin en uygun biçimde çalıştırılması için optimizasyon çalışmaları yapılır. Optimizasyon, bir problemin olabilecek çözümleri arasından en iyinin belirlenmesi eylemi olarak tanımlanabilir. Deneyimli bir sistem işletmecisi, geçmiş deneyimlerine dayalı olarak küçük bir sistemdeki kontrol değişkenleri için en iyi değerlerin neler olması gerektiğini tahmin edebilir. Fakat günümüzde modern karmaşık bir sistemde en iyi çözüm, güçlü analitik araçlar ve bilgisayar olanakları kullanılmaksızın elde edilemez.

Elektrik güç sisteminde, ekonomik yük dağıtımı, üretim birimlerinin en ekonomik biçimde devreye alınması, optimal güç akışı gibi pek çok optimizasyon çalışması yapılmaktadır. Elektrik güç sistemlerinin optimal çalışma koşullarının bulunmasında kullanılan en etkin analiz yöntemlerinden biri optimal güç akışıdır. OPF, amaç fonksiyonunun ekstremum değerini bulma yönünde, iletim sisteminin limitlerini de kısıtlamalara dahil ederek, sistemdeki güç dağılımını elde eder.

Optimal güç akışının en genel haliyle matematiksel modeli,

$F(x, u)$ amaç fonksiyonunun

$$\begin{aligned} g(x, u) &= 0 \\ h(x, u) &\leq 0 \end{aligned} \tag{2.5}$$

kısıtlamaları altında ekstremum değerlerinin bulunmasıdır. Bu denklemlerde,

$g(x, u)$ lineer olmayan eşitlik kısıtlamaları (güç akışı denklemleri)

$h(x, u)$ x ve u 'ya bağlı eşitsizlik kısıtlamaları

x durum değişkenleri

u kontrol değişkenleri

olarak tanımlanmıştır. Kısıtlamaları sağlayan (x, u) değeri geçerli çözümleri verir. Bir (x^*, u^*) çözümü, eğer geçerli çözüm bölgesinde tüm (x, u) 'lar için $f(x^*, u^*) \leq f(x, u)$ koşulunu sağlıyorsa, global çözümdür. Sadece (x^*, u^*) 'nın komşuluğundaki (x, u) 'ler

için $f(x^*, u^*) \leq f(x, u)$ koşulu sağlanıyorsa, bu çözüm yerel optimum çözümdür [1,2-6,36,37].

Optimal güç akışı çeşitli amaçlar doğrultusunda yapılabilir. Bu amaçlar, şöyle özetlenebilir.

- Generatörlerin yakıt maliyetinin azaltılması
- Sistemdeki aktif güç kayıplarının azaltılması
- Optimal reaktif güç dağılımının bulunması
- Sistemin güvenlik derecesinin artırılması
- Optimal gerilim dağılımının bulunması
- Acil durumlarda yük atmanın azaltılması

Optimal güç akışındaki kontrol değişkenleri ve durum değişkenlerinin başlıcaları şunlardır [1,2-6,36,37]:

Kontrol değişkenleri

- Generatör gerilimleri
- Transformatörlerin ayar kademeleri
- Faz kaydırıcı transformatörlerin ayar kademesi
- Anahtarlama kapasitörler

Durum değişkenleri

- Generatörlerin reaktif güç üretimleri,
- İletim hatları ve transformatörler üzerindeki güç akışları
- Yük baralarının gerilimleri

Bu amaçların ve değişkenlerin, bu çalışmada kullanılan matematiksel ifadeleri Bölüm 4.1'de verilmiştir.

2.3 Elektrik Enerji Sistemlerinin Güvenliği

Elektrik enerji sisteminin çalıřmasında, amaçlardan biri sistem güvenliđinin sađlanmasıdır. Sistem güvenliđi, sistem elemanları arızalı duruma dűřtűđűnde, sistemi hala çalıřır durumda tutmak űzere tasarlanan ۆnlemlerdir. ۆrneđin, bir generatűr ya da iletim hattı devreden çıktıđında, kayıp űretim karřılanabilmeli ya da gű űretimi hatlar űzerinde dađıtılarak iletim hatları űzerindeki akıřlar belli sınırlar içinde tutulmalıdır.

Gű sistemini oluřturan elemanların herhangi birinin arızalanmasına neden olan olayların oluř zamanı ۆnceden belirlenemediđinden, sistemin bu durumlarda tehlikeli duruma dűřmeyecek řekilde çalıřması için ۆnlem alınmalıdır. Sistem elemanları, gű, gerilim, akım gibi bűyűklűklerin belirli sınırları içinde çalıřtırılmak űzere tasarlandıđından, bu sınırlar ařıldıđında, elemanı devreden çıkartacak aygıtlarla korunmuřtur. Birbirini izleyen arızalar, bazen birden fazla elemanın devreden çıkmasına da yol açabilir.

Gű sisteminin güvenli bir řekilde çalıřtırılması için gerekli teknikler, gű sistemi güvenliđi konusunun kapsamında ele alınır. Sistem güvenliđi, iřletme kontrol merkezinde yűrűtűlen bařlıca ű iřleme ayrılabilir. Bunlar, sistemin izlenmesi, güvenlik indislerinin hesaplanması ve güvenlik-kısıtlamalı optimal gű akıřıdır.

Sistemin izlenmesi, SCADA sistemleriyle gerçekleştirilir [1]. Bu sistemler bu çalışmanın konusu dışında olduğundan ele alınmayacaktır.

Gű sisteminde meydana gelen problemler, operatűrler gerekli ۆnlemleri alıncaya kadar ciddi sorunlara yol açabilir. Bu durum, birbirini izleyen arızalar sonucu oluřabilir. Sistem çalıřmasının bu ۆzelliđi nedeniyle, iřletimde kullanılan modern bilgisayarlar olası problemleri oluřmadan ۆnce güvenlik indislerini hesaplar. Bu hesaplamalar, gű sistemi modeline bađlıdır ve devre dıřı kalma olaylarını incelemek ve operatűrleri ařırı yűklere ya da gerilim sınır ařımalarına karřı uyarmak amacıyla kullanılır.

Güvenlik kısıtlamalı optimal güç akışında ise,

$$PI_p = \sum_{\ell=1}^{N_\ell} w_\ell \left(\frac{P_\ell}{P_{\ell,\max}} \right)^{2n} \quad (2.6)$$

$$PI_v = \sum_{i=1}^{N_b} w_i \left(\frac{V_i - V_{i,\text{belirli}}}{\Delta V_{i,\max}} \right)^{2m} \quad (2.7)$$

performans indisleri kullanılarak sistemdeki en kötü durumlar için bir sıralama yapılır [1]. Bu denklemlerde,

P_ℓ ℓ . hattaki MW akışı

$P_{\ell,\max}$ ℓ . hattaki MW kapasitesi

V_i i. baradaki gerilim genliği

$V_{i,\text{belirli}}$ i. bara için belirlenmiş gerilim

$\Delta V_{i,\max}$ i. baranın geriliminde izin verilen maksimum sapma

N_b, N_ℓ sırasıyla sistemdeki bara ve hat sayısı

n, m tamsayılar

w_i, w_ℓ ağırlık katsayıları olarak verilmiştir.

Sıralama yapılırken, sınırların çok az aşıldığı durumlarla, sınıra yakın durumlar arasındaki farkın daha iyi belirlenebilmesi için n ve m birden büyük tamsayılar olarak alınmalıdır. Bu sıralama içinde sınırları aşan durumlar, optimal güç akışının kısıtlamaları içine dahil edilir.

Yeni problem,

$F(x^0, u^0)$ amaç fonksiyonunun

$$\begin{aligned} g^k(x^k, u^k) &= 0 & k &= 0, 1, \dots, N_c \\ h^k(x^k, u^k) &\leq 0 & k &= 0, 1, \dots, N_c \end{aligned} \quad (2.8)$$

kısıtlamaları altında ekstremum değerinin bulunması şeklini alır. Burada, '0' indisi temel durumu, 'k' indisi ($k>0$) indisi de hat, transformatör ya da generatörlerin devre dışı kalma olaylarından sonraki sistem durumunu gösteren indistir. k'nın alacağı değer (N_c) ise güvenlik indislerinin sıralanmasıyla elde edilir. Kontrol değişkenleri,

$$u^k = u^0 + \Delta u^k \quad (2.9)$$

şeklinde değişir. Burada, Δu^k , sistemin olaya otomatik yanıtıdır [2].

Bu çalışmada da ayrıklaştırılmış hızlı güç akışıyla (2.6) ve (2.7)'deki denklemler kullanılmıştır. Buna göre, bir sıralama yapılmış ve sıralamada limitleri aşan durumlar optimal güç akışı içine sokularak sistemin optimal çalışma noktaları bulunmuştur.

2.4 Elektrik Enerji Sistemlerinin Optimal Çalışma Koşullarının Bulunmasında Kullanılan Yöntemler

2.4.1 Klasik yöntemler

Optimal güç akışının çözümü için pek çok yöntem ortaya konulmuştur. Lineer olmayan programlama, kuadratik programlama ve lineer programlama gibi matematiksel programlamaya dayalı yöntemler, optimal güç akışının çözümünde kullanılmıştır [2-6,47]. Bazı yöntemler, orjinal problem yerine, problemin Karush-Kuhn-Tucker (KKT) optimal olma koşullarını çözmeye çalışır. Newton tipi bu yöntemlerde, eşitsizlik kısıtlamaları, amaç fonksiyonuna kuadratik penaltı terimleri olarak eklenir [5]. İç nokta yöntemi, (interior point method) eşitsizlik kısıtlamalarını negatif olmayan değişkenler yardımıyla eşitlikler haline getirir [6,38]. Temel olarak bu yöntemler amaç fonksiyonu üzerinde birtakım yaklaşımları kullanırlar ve amaç fonksiyonunun yapısına birtakım kısıtlamalar (türev alınabilme) getirirler. Bu algoritmalar iteratif yöntemlerle arama yaptıkları için, global optimum çözüme ulaşmalarında başlangıç noktalarının seçimi önemlidir. Arama iyi bir başlangıç noktasından başlamıyorsa, yerel optimuma yakınsayabilir. Ayrıca bu yöntemler, güç sistemindeki ayırık kontrol değişkenlerinin sürekli olarak değiştiğini varsayar [5,6].

2.4.2 Gelişmekte olan yöntemler

Son yıllarda, akıllı sistemlerin gelişimiyle, elektrik güç sistemleri optimizasyonu için yapay sinir ağları [37,40,41], simulated annealing [42,43], bulanık mantık [44] ve evrimsel algoritmalar [15] kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, evrimsel algoritmaların bir kolu olan genetik algoritmalar üzerinde durulacaktır. Genetik algoritmalar ile ilgili kısa bir bilgi EK A'da verilmiştir.

Genetik algoritmaların diğer klasik yöntemlerden farklılıkları ve üstünlükleri şöyle özetlenebilir.

- GA parametrelerin kendileriyle değil, kodlanmış halleriyle çalışır.
- GA tek bir nokta yerine noktalar topluluğundan hareket eder.
- GA türev ve daha farklı bilgileri değil sadece amaç fonksiyonu değerlerini kullanır.
- GA deterministik değil, olasılıksal geçiş operatörleri kullanır.
- Global optimizasyon yapar.
- Programlama açısından diğer matematiksel programlama tekniklerinden daha basittir.
- Algoritma yapısı esnektir.

Genetik algoritma kullanılırken karşılaşılan zorluklar şunlardır:

- Uygun olmayan çözüme (premature) yakınsayabilir.
- İşlem zamanı uzun sürer.
- Parametre ayarları çok fazla sayısal deney gerektirir [15-33].

Genetik algoritma çözümünde, yukarıdaki zorlukların üstesinden gelebilmek için geliştirilen iyileştirilmiş genetik algoritma modeli Bölüm 4.2'de verilmiştir.

3. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN ÇALIŞMA KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Elektrik enerjisine olan talebin giderek artması, yeni üretim merkezleri ve yeni iletim hatlarına gereksinimi arttırmıştır. Fakat gerek doğal kaynakların kısıtlı oluşu gerekse çevresel koşullar ve ekonomik nedenler, var olan üretim ve iletim kapasitesinin en uygun şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada, iletim hatlarında maksimum güç iletim kapasitesinin sağlanabilmesi üzerinde durulmuştur. Var olan iletim sisteminin iyileştirilerek, iletilen gücü arttırmak, maliyet ve zaman açısından yeni bir iletim hattı tesis etmekten daha uygun bir çözüm olarak görülmektedir.

Bir iletim hattı üzerinde güç akışı ile açıklanan aktif ve reaktif güç iletimi, hat parametreleri, hat uçlarındaki gerilim genlikleri ve gerilimler arasındaki açı farkları ile ilişkilidir. Şekil 2.1'de verilen iletim hattı modeli göz önüne alındığında, i ve j baraları arasındaki aktif ve reaktif güç akışı

$$P_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A||V_i|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (3.1)$$

$$Q_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A||V_i|^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha) \quad (3.2)$$

şeklinde verilebilir [34,35]. Bu denklemlerde,

P_{ij}, Q_{ij} i ve j baraları arasında hattan geçen aktif ve reaktif güç

V_i, V_j i ve j baralarının gerilimleri

$A \angle \alpha$
 $B \angle \beta$ hattın empedans ve admitansına bağlı hat parametreleri

δ yük açısı olarak tanımlanmıştır.

Güç akışı incelemeleri ile belirlenen iletim kapasitesi, kontrol yapılmadığı durumlarda aşağıdaki etkenlere bağlı olarak açıklanır.

-Isıl (termal) sınır (iletim hattı akım taşıma kapasitesinin belirlediği doğal fiziksel sınır)

-Güç-akışı sınırı (doğal güç-akışının belirlediği sınır)

-Kararlılık sınırı (dinamik olarak kararlı güç iletimine ilişkin sınır).

Bu sınırlar çoğu kez aynı değerler üzerinde birleşmez. Var olan iletim sistemini tam olarak kullanmak ve iletimin işlevini daha iyi hale getirmek için gerekli iyileştirmelerden bir kısmının gerçekleştirilmesini, kararlılık ve ısı sınırları arasındaki farkın en aza indirilmesini sağlamak için seri ve şönt kompanzasyon ile faz açısı kontrolü yapılır.

Elektrik güç iletim sistemlerindeki elemanların empedanslarının reaktif özellikleri etkindir. Bu nedenle, reaktif güç, bu sistemlerin tasarım ve işletiminde önemli bir faktördür. Özellikle uzun mesafeli iletim sistemlerinde, iletim sisteminin kullanımını daha iyi hale getirmek için reaktif güçler üzerinde kompanzasyon gerekli olabilir.

İletim sistemlerinde kompanzasyon, seri ve şönt olarak yerleştirilen kapasitör ve reaktörler ile yapılır. Bir iletim hattının güç iletim kapasitesinin, iletim uzunluğunun artmasıyla azaldığı iyi bilinen bir gerçektir. Seri ve şönt kompanzasyon elemanları kullanılarak iletimin gerçek reaktansı üzerinde yapay olarak etki yapıp daha fazla güç iletilebilir. Seri kapasitörler ve şönt reaktörler genellikle uzun iletim hatlarının sırasıyla seri endüktansını ve şönt kapasitesinin etkisini azaltmak için kullanılırlar.

Seri kompanzasyon, uzun alternatif akım enerji iletim koridorlarında, sürekli-hal kararlılığı ve dinamik kararlılık kadar, güç iletim kapasitesinin de artırılması için kullanılır. Seri kompanzasyon iletim hattının her faz iletkenine seri olarak yerleştirilen kapasite grupları ile yapılır. Çoğu kez, bir yeni veya ilave iletim hattı kurmak yerine seri kompanzasyon kullanmak zaman ve paradan kazanç sağlamaktadır.

Dünya üzerinde çeşitli uygulamaların getirdiği deneyim, seri kompanzasyonun yararlarını göstermektedir. Seri kompanzasyon, iletim reaktansını azaltır ve bu etki,

iletim hatlarının güç iletim yeteneğini artırmanın yanı sıra sistemin kararlılığını iyileştirir, gerilim ayarı yapar ve reaktif güç dengesini iyileştirir, paralel hatlar arasında güç paylaşımını iyileştirir ve iletim kayıplarını azaltır.

Seri kapasitör grubunun değerleri, seri kompanzasyon faktörü k_s ile belirlenir,

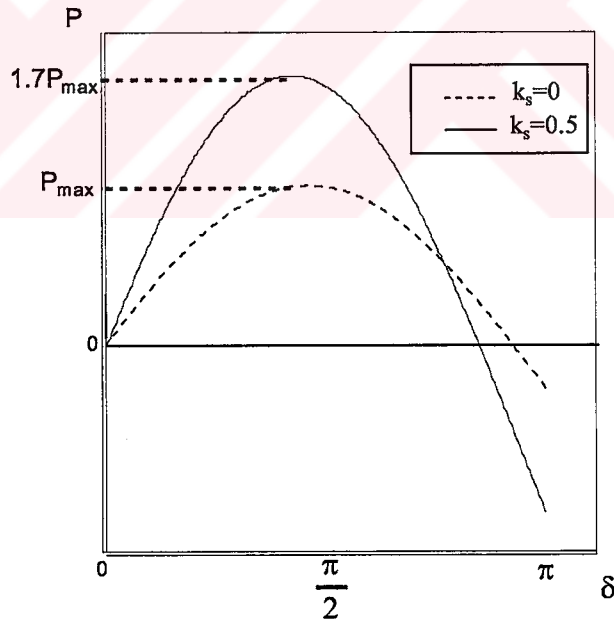
$$k_s = \frac{x_C}{x_{ij}} \quad (3.3)$$

değerindedir. Burada,

x_C hattın bir fazına yerleştirilen seri kapasitör gruplarının toplam reaktansı

x_{ij} hattın bir fazının toplam reaktansını

ifade etmektedir. Seri kompanzasyon yapılmış ve yapılmamış durumda hattın iletebilecek aktif gücün, yük açısı δ 'ya bağlı değişimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Seri kompanzasyon durumunda aktif gücün yük açısına bağlı değişimi

Kompanzasyon oranı yüksek olursa, sistem empedansı fazla küçüleceği için, kısa devre akımları kabul edilebilir değerlerin üzerine çıkabilir. Ayrıca iletim hattına seri kapasitör yerleşimi, subsenkron (senkron-altı) rezonans (SSR) adı verilen bir soruna neden olabilir. Bir güç sisteminin doğal seri empedansı endüktiftir. Seri kondansatör

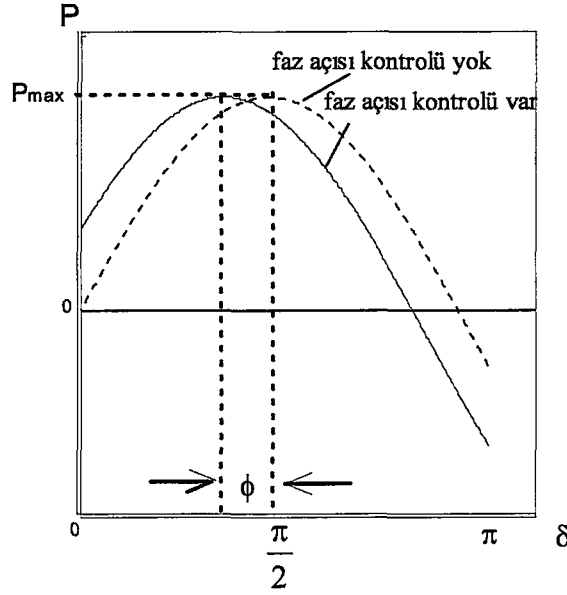
yerleştirilirse, seri L-C devresi, bir rezonans frekansına (f_r) sahip olacaktır. Sorunun SSR filtreleri ile çözülmesi mümkünse de, üretim birimlerinde hasara yol açabilir.

Seri kompanzasyon, genelde iletim hattına seri kapasitör grupları yerleştirilerek yapılmaktadır. Ancak, bazı durumlarda, özellikle kısa hatların sonlandığı baralarda, sistem empedansı çok küçük olduğu zaman, kısa devre akımları, devre kesicilerin kesme kapasitelerini aşabilir. Bu yüzden, sistem empedansını yükseltmek için her faza seri bobinlerin yerleştirilmesiyle seri endüktif kompanzasyon gerçekleştirilmesi gerekebilir.

Enerji iletim hatlarında seri kompanzasyonun yanı sıra gerilimi kontrol etmek için, seri kompanze edilmiş iletim hattına şönt kompanzatörlerin de konulması yoluna gidilebilir Böylece seri ve şönt kompanzasyonun uygun kontrolü ile kabul edilebilir gerilim sınırları içinde güç iletim yeteneğinde önemli iyileştirmeler yapılabilir. Enerji iletim hatlarının şönt kompanzasyonu, genelde hattın her fazı ile nötr arasına yerleştirilmiş bobinler (reaktörler) ile gerçekleştirilir.

Enerji iletim hatlarında hafif yükleme koşullarında, hat gerilimleri yükselir, buna karşın, ağır yükleme koşullarında ise hat gerilimi düşer. Bu etkileri gidermek için iletim hattına hafif yükleme durumunda şönt endüktif reaktans (reaktörler) bağlanması gereklidir. Ayrıca bazı ağır yüklü çalışma durumunda iletim hattı gerilimi çok düşüyorsa, iletim hattına şönt kapasitif reaktans (kapasitörler) yerleştirilmelidir. Reaktif şönt kompanzasyon, pratik olarak genellikle yük baralarında da, yük değişimine karşı gerilimi ayarlamak amacıyla gerçekleştirilebilir. Bir hat ya da üretim birimi devreden çıkıp, besleme kapasitesi azaldığında, yük barasına gerilim desteği verir [7-9,45].

Güç sisteminde, pratikte, belli bir hattın optimal kullanımı için gerekli olan iletim açısı, tüm iletim sisteminin uygun çalışmasıyla uyumlu olmayabilir. Bu durum, elektriksel uzunluğu eşit olmayan paralel iki hat arasındaki güç iletiminde ya da iki bara arasındaki açı farkının güç iletimi için yeterli olmadığında oluşabilir. Faz açısı kontrolü yapılarak, daha uygun bir güç açısında iletim sağlanır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi faz açısı kontrolü, hattan iletilebilecek maksimum gücü arttırmasa da bu gücün daha küçük bir δ açısında iletimini sağlar [7-9].



Şekil 3.2 Faz açısı kontrolünde aktif gücün yük açısına bağlı değişimi

Elektrik enerji sistemlerinde bu işlemler, mekanik olarak ayar kademesi değiştirilen transformatörler ile anahtarlamalı kapasitör ve reaktörlerle gerçekleştirilir. Mekanik kontrolörlerin, işlem sayısı, mekanik parçaların yorulması nedeniyle sınırlıdır ve sistemdeki değişimlere yeterli hızda yanıt vermezler. Mekanik parçalar sık sık bakım gerektirdiğinden sınırlı bir ömre sahiptir. Mekanik kontrolörler sabit oranlarda ayar yapmaya izin verirken, son yıllarda güç elektroniği ve kontrol konusunda meydana gelen gelişmeler sayesinde daha esnek ve sürekli ayar olanağı sağlayan Esnek Alternatif Akım Sistemleri (FACTS) aygıtlarının kullanımı mümkün olmuştur [7-9,46].

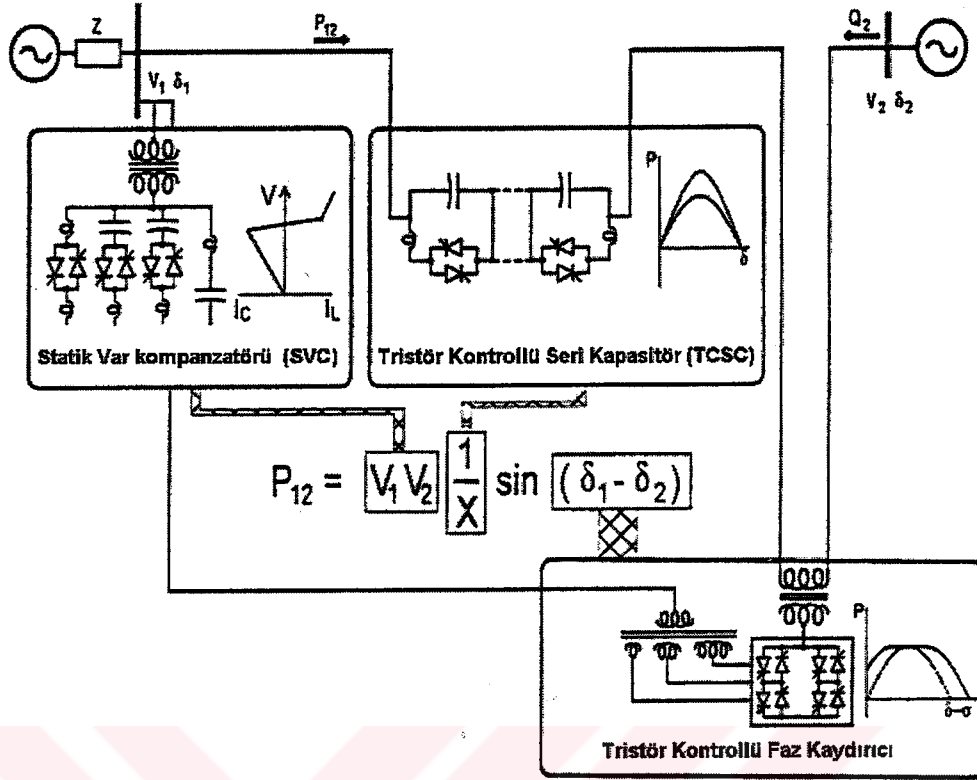
3.1 Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)

1980'lerde Electric Power Research Institute (EPRI) ve özellikle Hingorani tarafından ortaya konan FACTS kavramı alternatif akımla iletimin kontrol edilebilirliğini ve kullanım kapasitesini arttırmayı amaçlar. Güç elektroniği kontrol elemanları, ileri kontrol teknolojisi, gelişmiş bilgisayar sistemleri ve güçlü analitik aletlerin kullanımına dayanmakta ve son yıllarda giderek ivme kazanmaktadır. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere bağlı olan FACTS teknolojisi, güç elektroniği, dijital koruma röleleri, yüksek-hızlı dijital kontrol, gelişmiş kontrol merkezleri ile hızlı ve güvenilir iletim olanaklarını kullanmaktadır [7-9,46].

FACTS aygıtlarının kullanım amaçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Güç akışını daha iyi kontrol edilmesi. Böylece güç, önceden belirlenmiş iletim koridorlarına yönlendirilebilir, çevre akımları ve paralel akışlar önlenabilir, yeni iletim hatlarına gerek kalmadan iletim darboğazları ortadan kaldırılabilir.
- Uzun iletim hatlarının normal kararlılık sınırı ile sınırlanmış olan yüklenme durumunun hattın ısı sınırlarına çıkarılması.
- Kararlılık problemlerinin ortadan kaldırılması.
- Arzu edilmeyen reaktif güç akışlarının önlenmesi.
- Güç iletiminde yarattığı kontrol olanakları sayesinde yedek güç sınırlarının küçültülmesi.
- Aşırı yüksek ve alçak gerilimlerin önlenmesi.
- Kayıpların azaltılması.
- Arızaların etkisini sınırlayarak kaskat hat açmalarının önlenmesi.
- Kullanılabilir iletim kapasitesini sınırlayan ve/veya aygıtların hasar görmesine neden olabilen güç sistemi salınımlarının sönmülendirilmesi [6,32,45].

Amaçlanan iletim problemlerinin çözümü için FACTS aygıtlarının gelişimi iki farklı teknik yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Birinci grup, kontrol elemanı olarak, tristör anahtarlama reaktif empedansları ya da ayar kademesi değiştirilen transformatörleri kullanırken, ikinci grup, kontrol elemanı olarak self-komutasyonlu statik konvertörlerden yararlanır. Bu çalışmada, modelleme kolaylığı açısından ele alınan birinci grup kontrol elemanlarının temel çalışma prensipleri ve kullanılma amaçları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.3 Tristor kontrollü FACTS aygıtları

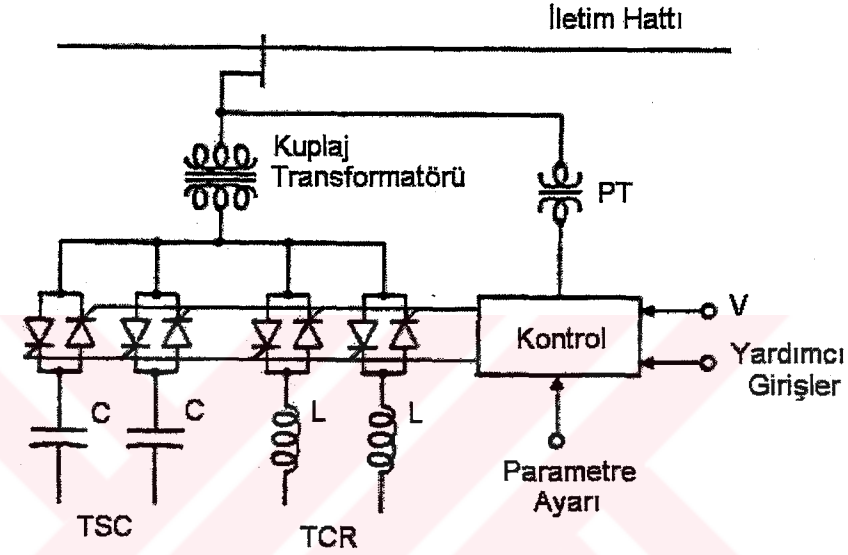
3.1.1 Tristor kontrollü FACTS aygıtları

Tristor kontrollü başlıca FACTS aygıtları, statik Var kompanzatör (SVC), tristor kontrollü seri kapasitör (TCSC) ve tristor kontrollü faz kaydırıcısıdır (TCPS). Bu kontrolörler, mekanik anahtarlama kapasitör, reaktör ve ayar kademesi değiştirilebilen transformatörlerle benzer yapıda, ancak kontrol düzeneğinde tristorlere sahiptir. Bu aygıtlar, klasik düzenlere göre, sistem değişimlerine daha hızlı yanıt verirler. Buna karşın kontrol düzenleri daha karmaşıktır. Bu kontrolörlerin her birinin güç iletimini etkileyen hangi parametreler üzerinde etkili olduğu Şekil 3.3'de görülmektedir [8,9].

3.1.1.1 Statik VAR kompanzatör (SVC)

İlk FACTS aygıtı olarak da kabul edilen statik VAR kompanzatörlerin, 1970'lerin ortalarından beri bir çok uygulaması yapılmıştır. SVC, iletim hattına paralel bağlı kapasitör ve reaktörlerin anahtarlama ile bir iletim hattı üzerindeki reaktif gücü ayarlayan bir kontrol elemanıdır. Tristor anahtarlama kapasitörler (TSC) ve tristor

kontrollü reaktörlerden oluşan tipik bir SVC düzeni Şekil 3.4'de verilmiştir. İlk önceleri ark fırınları gibi hızlı değişen yüklerin güç faktörünü kompanze etmek için geliştirilen SVC'ler, daha sonradan alternatif akım iletim hatlarının dinamik şönt kompanzasyonuna uyarlanmıştır. SVC'ler uzun hatlarda güç iletiminin artırılması, hızlı gerilim kontrolü ile hem sürekli-hal hem de dinamik kararlılığın iyileştirilmesi, salınımların sönümlendirilmesi, dinamik aşırı gerilimlerin kontrolü amaçlarıyla kullanılmaktadır.

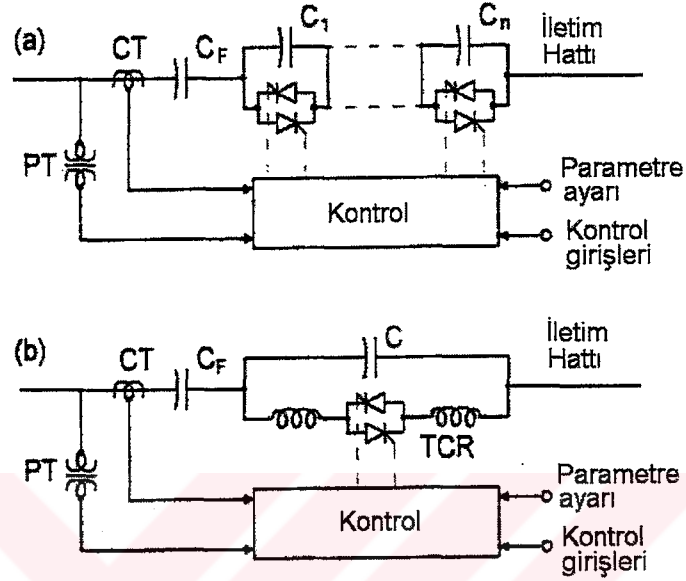


Şekil 3.4 Tristör kontrollü kapasitör ve reaktör kullanan SVC

3.1.1.2 Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC)

Tristör kontrollü seri kapasitörler hatta seri bir kapasitörün devreye alınması ile hat empedansının kontrolüne olanak sağlayan aygıtlardır. Tristör kontrollü seri kapasitörlerin iki temel düzeni Şekil 3.5.a ve Şekil 3.5.b'de verilmiştir. Şekil 3.5.a'da, tristör anahtarlamalı kapasitör düzeninde, seri kompanzasyonun derecesi, seri bağlı kapasitör gruplarının sayısını arttırarak ya da azaltarak kontrol edilir. Şekil 3.5b'de verilen devrede ise, kapasitif çalışma bölgesindeki seri kompanzasyon derecesi, tristörün geçirme periyodu ayarlanarak belirlenir. İletim hattına seri bağlı kapasitörler ile toplam hat empedansı küçültülerek veya büyütülerek ayarlanabilmektedir. Klasik seri kompanzasyon cihazları, dinamik olarak ayarlanamaz ve ancak büyük oranlarda kompanzasyon parçalarının anahtarlanmasına olanak verir. Tristör kullanan FACTS cihazları ise, hat kompanzasyon seviyelerini doğrudan kontrol edebilir ve hızlı bir şekilde sürekli ayar yapabilir. TCSC'lerin

kullanılma amaçları, güç akışının kontrol edilerek güç iletiminin arzu edilen hatlar üzerinden yapılabilmesi, güç salınımlarının ve SSR (subsynchronous Resonance-senkron altı rezonans)'nin sönümlendirilmesi, kararlılığın iyileştirilmesi olarak özetlenebilir.



Şekil 3.5 a) Tristör anahtarlama kapasitör kullanan TCSC
b) Seri kapasitöre paralel bağlı tristör kontrollü reaktör

3.1.1.3 Tristör kontrollü faz kaydırıcı (TCPS)

Bu aygıtın temel fonksiyonu, faz açısını değiştirerek bir iletim hattı üzerindeki güç akışını kontrol etmektir. Bu faz kaydırma işlemi, hattın faz gerilimine, değiştirilebilir bir gerilim bileşeni ilave edilerek veya çıkarılarak yapılır. Klasik bir TCPS düzeneği Şekil 3.4'de görülmektedir. TCPS, şönt bağlı ayar kademeli transformatör, seri transformatör ve tristör kontrol düzenini içermektedir.

3.1.2 Tristör kontrollü FACTS aygıtlarının güç akışında modellenmesi

Güç sisteminde FACTS aygıtlarının etkilerini incelemek için, bu aygıtların modellerinin oluşturulması gereklidir. Genel olarak üç tip modelleme yapılır. Bunlar elektromanyetik modeller [8], sistemin sürekli durum incelemeleri için sürekli durum modelleri [8-12] ve kararlılık çalışmaları için kullanılan dinamik modellerdir [8]. Bu

Tristör anahtarlarının düzenlenmesi

Şekil 3.6 Güç iletim açısının kontrolü için tristör kontrollü faz kaydırıcı transformatör

3.1.2.1 SVC'nin güç akışı modeli

Göç alanında SVC'nin konumunu için Şekil 3.7'de sunulduğu gibi varsayalım ki

3.1.2.1 SVC'nin güç akışı modeli

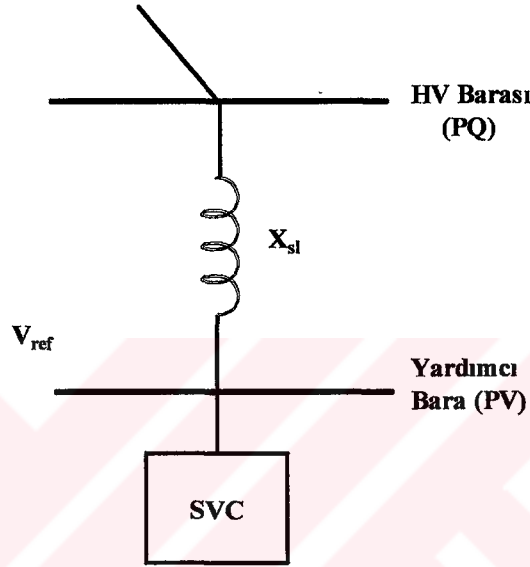
Güç akışında SVC'nin konumu için, Şekil 3.7'de verildiği gibi yardımcı bir bara ele alınmaktadır. Bu yardımcı bara gerilim kontrollü (PV) barası olmalıdır. Bunun için, aktif güç üretimi olmayan, SVC'nin reaktif güç akışını gösteren belirli reaktif güç sınırlarına sahip herhangi bir generatör barası seçilebilir. Gerilim kontrol karakteristiğinin eğimine eşit olan x_{sl} , yardımcı bara ile sistemin yük barası arasına eklenmiştir [47-49]. Bu modelde, SVC'nin kontrol aralığı sürekli kabul edilir. SVC'nin reaktif güç çıkışı,

şeklinde hesaplanabilir. V_t ve V_{ref} ise sırasıyla, düğüm gerilimi ve referans gerilimi genlikleridir. (3.4) denklemi SVC'nin reaktif güç çıkışı, sınırlar içindeyse geçerlidir. Bu sınır, B_{ind} ve B_{cap} süseptanslarıyla belirlenir. Buna göre reaktif güç sınırları,

$$Q_{ind} = B_{ind} V_{ref}^2 \quad (3.5)$$

$$Q_{cap} = B_{cap} V_{ref}^2 \quad (3.6)$$

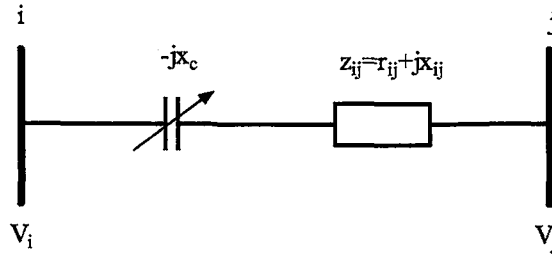
şeklinde tanımlanır. Bu çalışmada, SVC (3.5) ve (3.6)'da verilen sınırlara sahip bir reaktif güç kaynağı olarak alınmıştır.



Şekil 3.7 SVC'nin güç akışı modeli

3.1.2.2 TCSC'nin güç akışı modeli

Sürekli durumda TCSC'nin modeli, iletim hattına eklenmiş kontrol edilebilen bir kapasite olarak gerçekleştirilebilir. TCSC'li devre modeli Şekil 3.8'de verilmiştir. Bu çalışmada, kontrol edilebilen x_c reaktansı doğrudan hat reaktansına eklenmiştir [10,50].



Şekil 3.8 Seri kompanzasyon yapılan hat

Bu modelden yola çıkarak, i. baradan j. baraya ve j. baradan i. baraya doğru aktif ve reaktif güç akışı denklemleri sırasıyla,

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.7)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.8)$$

$$P_{ji} = V_j^2 g_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.9)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 b_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2} \quad (3.11)$$

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_c}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2} \quad (3.12)$$

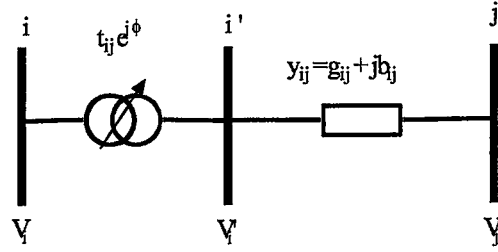
olarak verilmiştir. Bu denklemlerde daha önce tanımlanmış büyüklüklerden farklı olan büyüklükler.

δ_i, δ_j i ve j bara gerilimlerinin açıları

r_{ij} i ve j baraları arasındaki hattın direncidir.

3.1.2.3 TCPS'nin güç akışı modeli

TCPS'yi güç akışında modellerken, güç enjeksiyon modeli göz önüne alınmıştır [10,50]. Şekil 3.9'da verilen eşdeğer devrede TCPS, çevirme oranı $t_{ij}e^{j\phi}$, kompleks olan bir transformatör olarak modellenmiştir.



Şekil 3.9 TCPS'nin eşdeğer devresi

TCPS, bara gerilimi V_i' 'yi, ϕ açısına bağlı olarak

$$V_i' = V_i t_{ij} e^{j\phi} \quad (3.13)$$

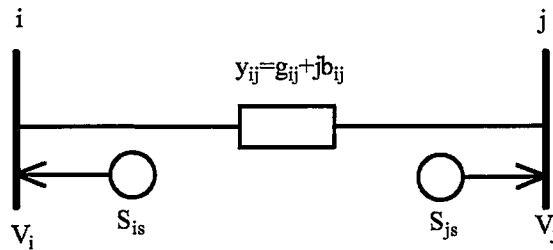
şeklinde değiştirir. Burada, $t_{ij} = \cos(\phi)$ gerilim genliklerinin dönüşüm oranıdır. TCPS'nin kontrol edilen parametresi ϕ 'dir. Bu modelden yola çıkılarak i. baradan j. baraya ve j. baradan i. baraya aktif ve reaktif güç akışı denklemleri

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} t_{ij}^2 - V_i V_j t_{ij} [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi)] \quad (3.14)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} t_{ij}^2 - V_i V_j t_{ij} [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi)] \quad (3.15)$$

$$P_{ji} = V_j^2 g_{ij} - V_i V_j t_{ij} [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi) - b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi)] \quad (3.16)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 b_{ij} + V_i V_j t_{ij} [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi) + b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi)] \quad (3.17)$$



Şekil 3.10 TCPS'nin güç enjeksiyon modeli

olarak çıkartılabilir. TCPS'nin etkisi, i ve j baralarına enjekte edilen güçler olarak modellenebilir. Bu model, Şekil 3.10'da görülmektedir,

Buna göre i ve j baralarına enjekte edilen güçler,

$$P_{is} = -V_i^2 \tan^2 \phi g_{ij} - V_i V_j \tan \phi [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.18)$$

$$Q_{is} = V_i^2 \tan^2 \phi b_{ij} + V_i V_j \tan \phi [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.19)$$

$$P_{js} = -V_i V_j \tan \phi [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.20)$$

$$Q_{js} = -V_i V_j \tan \phi [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.21)$$

$$S_{is} = P_{is} + jQ_{is} \quad (3.22)$$

$$S_{js} = P_{js} + jQ_{js} \quad (3.23)$$

şeklinde verilebilir.

Enjekte edilen bu eşdeğer güçler, normal iletim hattı denklemleri ile beraber güç akışı denklemlerinde kullanılacaktır. [10]'da gösterildiği gibi, enjekte edilen gerilimlerin i. ve j. bara gerilimlerinin genlik ve açılara göre türevleri, güç akışı denklemlerinin Jacobian matrisine karşılık gelen elemanlarına göre ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu nedenle, güçler i ve j baralarına enjekte edilen yük ya da üretim olarak alınabilir. Bu güçler, güç akışının her iterasyonunda hesaplanırsa da, Jacobian matrisinin hesaplanmasında kullanılmasına gerek yoktur.

3.2 FACTS Aygıtlarının Optimal Yerleşimi

Elektrik güç sistemine FACTS aygıtı yerleştirilmeye karar verildikten sonra, üzerinde durulması gereken konular, hangi tip aygıtın kullanılacağı, nereye yerleştirileceği ve ne kapasitede olacağıdır. FACTS aygıtının maliyetinin güç iletim kapasitesinin bir fonksiyonu olduğu düşünülürse, ekonomik olarak, amaca uygun bir kapasite belirlenmesi gereklidir. Hangi tip aygıtın kullanılacağı ise amaca bağlıdır.

Sistemin sürekli durum incelemeleri için ele alınabilecek başlıca amaçlar şunlardır [11].

- *Göz akımlarının önlenmesi:* İletim devrelerinde çok sayıda hattın birbirine bağlanmasından gözler oluşmaktadır. Bu durumda FACTS aygıtı göz akımlarının bulunduğu yere yerleştirilmelidir. Bunlar yardımıyla güç akışı ya sıfırlanır ya da akışın yönü değiştirilir. Aynı baralar arasında paralel başka bir hat varsa, aygıtın bu amaç için etkinliği azalır.
- *Elektronik çit:* Güç sağlayan bir şirketin iletim hattı mülkiyetini koruma amacı elektronik çit kavramını doğurmuştur. Bu durumda, geçiş noktaları şirketi komşularına bağlayan sınırlı sayıda bağlantı hatlarıdır. Güç akışını kontrol edebilme yeteneği, geçiş noktalarındaki kapılara bağlıdır. FACTS'lerin yerleştirilmesi için en uygun yerler, ağır yüklü bağlantı hatlarıdır.
- *İyileştirilmiş ekonomik çalışma:* FACTS aygıtının yerleştirilmesindeki bir amaç da, güç iletim kapasitesinin artırılmasıdır. Böylece üretim birimlerinin daha ekonomik işletimi sağlanır. FACTS aygıtı ya kapasitesinin altında kullanılan bir hatta yerleştirilerek hattın kullanım kapasitesi artırılır ya da yükü fazla olan bir hatta yerleştirilerek, hattın aşırı yüklenmesi önlenir.
- *Belirli çalışma koşullarının elde edilmesi:* İstenilen çalışma koşulları, gerilim iyileştirilmesi ya da hatlar üzerindeki akışların belirli değerlere ayarlanmasıdır.

Bu çalışmada, FACTS'ler ile güç sisteminin ekonomik çalışmasının iyileştirilmesi ve istenilen bir çalışma durumunun elde edilmesi amaçlanmıştır. Ancak amaçlar üzerinde FACTS 'lerin maliyeti de etkili olmaktadır. Bu çalışmada özellikle TCSC ve TCPS maliyetleri üzerinde durulmuştur.

TCSC'nin maliyeti hatta yerleştirilen seri kompanzasyon oranına bağlı olarak

$$C_{sc} = c \cdot x_c \cdot \frac{IS^2}{TG} + TM \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemde

c \$/MVar.yıl

IS TCSC'nin yerleştirildiği hattın ısı sınırı

TG temel güç

TM tesis masrafını ifade etmektedir.

TCPS'nin maliyeti ise sabittir ve sadece hattın yerleştirildiği devrenin kapasitesine bağlıdır. Bu maliyet,

$$C_{PS} = c \cdot IS + TM \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir [12,51,52].

Şimdiye kadar FACTS'lerin yerleştirileceği en uygun yerlerin bulunması için duyarlılık analizi ön görülmüştür. Duyarlılık analizi genellikle göz önüne alınan amaca göre FACTS'lerin kontrol değişkenlerine bağlı türevleri alınarak gerçekleştirilir. Buna göre sıralama indisleri belirlenir [48]. Duyarlılık analizi, amaç fonksiyonunun kontrol değişkeniyle lineer değiştiği durumlarda, iyi sonuç verse de lineer olmayan durumlarda geçerliliği tartışılır. Ayrıca, sisteme birden fazla FACTS aygıtı yerleştirilecekse, bir FACTS aygıtı yerleştirildikten sonra sistem topolojisi değiştiğinden sıralamada da değişiklik olabilir. Bu nedenle optimizasyon çalışmasında, amaca uygun olarak FACTS aygıtlarının yerleştirileceği en uygun yerlerin bulunmasında, lineer olmayan bağıntılarda iyi bir arama yöntemi olan genetik algoritmalar kullanılmıştır.

4. GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ KULLANILARAK ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN OPTİMAL ÇALIŞMA DURUMLARININ BELİRLENMESİ

Bu çalışmada, güç sisteminin optimal çalışma durumunun bulunması için genetik algoritma çözümü önerilmiştir. Genetik algoritmalar, doğal genetik ve seçim yöntemine dayanan arama algoritmalarıdır. Klasik optimizasyon problemlerine göre üstünlükleri, amaç fonksiyonun yapısına herhangi bir kısıtlama getirmemeleri ve bir başlangıç değerine bağlı olmamalarıdır. Bu çalışmada da, bu özellikten yararlanarak farklı amaç fonksiyonları ele alınmıştır ve generatörlerin yakıt maliyetleri daha gerçekçi olarak modellenmiştir. Ayrıca çok amaçlı optimizasyon, FACTS aygıtlarının getirdiği yeni kontrol değişkenleriyle, sistemdeki güç akışının ve gerilim dağılımının getirdiği yeni kısıtlamalar altında gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.1’de problemin matematiksel modeli, Bölüm 4.2’de ise çözüm için önerilen genetik algoritma modeli verilmiştir.

4.1 Problemin Matematiksel Modeli

Bu çalışmada, generatörlerin yakıt maliyeti, sistemdeki aktif güç kayıplarının getirdiği maliyet ve FACTS aygıtlarının maliyetinin en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Bu farklı amaçlar, ağırlık katsayılarıyla tek bir amaç fonksiyonu,

$$C_T = \omega_1 \sum_{i \in NG} C_{Gi} + \omega_2 \sum_{i \in NL} C_{Li} + \omega_3 \sum_{i \in NF} C_{Fi} \quad (4.1)$$

şeklinde alınmıştır. Bu denklemden büyüklükler şunları göstermektedir.

C_{Gi} : i. generatörün yakıt maliyeti

C_{Li} : i. hattaki aktif güç kayıplarının getirdiği maliyet

C_{Fi} : i. FACTS aygıtının maliyeti

NG, NL, NF : sırasıyla, sistemdeki generatör, iletim hattı ve FACTS aygıtı sayısı

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$: ağırlık katsayıları

Generatör yakıt maliyetleri, Bölüm 1'deki (2.1), (2.2) ve (2.3) denklemleriyle verildiği gibi ele alınmıştır.

Aktif güç kayıplarının getirdiği maliyet,

$$C_{Li} = h P_{Li} \quad (4.2)$$

olarak verilebilir. Burada, P_{Li} , i. hattaki aktif güç kaybı olarak

$$P_{Li} = P_{ij} + P_{ji} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer şekilde reaktif güç kayıplarını da modellemek olasıdır [34]. P_{ij} ve P_{ji} güç akışları, sırasıyla (3.7) ile (3.14) ve (3.9) ile (3.16) denklemleri ile belirlenmiştir. Sistemin marjinal maliyetine bağlı olan h , \$/MW saat olarak verilen kayıp maliyeti katsayısıdır [52].

FACTS aygıtlarının maliyetleri de, kullanılan FACTS aygıtlarına göre (3.24) ve (3.25) denklemleriyle göz önüne alınmıştır.

Problemin eşitlik kısıtlamaları FACTS aygıtlarının kontrol değişkenlerinin dahil edildiği,

$$P_{Gi} + P_{is}(\phi) - P_{di} - \sum_{i,j \in NB} V_i V_j Y_{ij}(x_C) \cos(\theta_{ij} - \delta_j - \delta_i) = 0 \quad (4.4)$$

$$Q_{Gi} + Q_{SVCi} + Q_{is}(\phi) - Q_{di} - \sum_{i,j \in NB} V_i V_j Y_{ij}(x_C) \sin(\theta_{ij} - \delta_j - \delta_i) = 0 \quad (4.5)$$

güç akışı dengesini gösteren denklemlerdir. Generatörlerin aktif ve reaktif güç sınırları, bara gerilimlerinin sınırları, transformatörlerin ayar kademeleri üzerindeki sınırlar, transformatör ve iletim hatları üzerindeki ısı sınırlar, FACTS aygıtlarının kontrol değişkenleri üzerindeki sınırlar sırasıyla

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i \in NG \quad (4.6)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad i \in NG \quad (4.7)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in NB \quad (4.8)$$

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad i \in NT \quad (4.9)$$

$$|S_i| \leq S_i^{\max} \quad i \in (NL+NT) \quad (4.10)$$

$$\phi_i^{\min} \leq \phi_i \leq \phi_i^{\max} \quad i \in NP \quad (4.11)$$

$$x_{Ci}^{\min} \leq x_{Ci} \leq x_{Ci}^{\max} \quad i \in NS \quad (4.12)$$

$$Q_{SVCi}^{\min} \leq Q_{SVCi} \leq Q_{SVCi}^{\max} \quad i \in NC \quad (4.13)$$

eşitsizlikleri ile göz önüne alınmıştır. Bu kısıtlamalara ek olarak, bu çalışmada TCPS ve TCSC'lerin yerleştirildiği hatlardaki aktif güç (akışı) sınırları,

$$P_i = P_i^{\text{belirli}} \quad i \in (NS+NP) \quad (4.14)$$

SVC'nin yerleştirildiği yük baralarındaki gerilim sınırları da

$$V_i = V_i^{\text{belirli}} \quad i \in NC \quad (4.15)$$

şeklinde verilmiştir.

Bu denklemlerde,

- NB : sistemdeki toplam bara sayısı
- NT : sistemdeki transformatör sayısı
- NP : sistemdeki TCPS sayısı
- NS : sistemdeki TCSC sayısı
- NC : sistemdeki SVC sayısı
- Y_{ij} ve θ_{ij} : admitans matrisinde elemanların genliği ve faz açısı
- P_{Gi} ve Q_{Gi} : i. baradaki aktif ve reaktif güç üretimi
- P_{di} ve Q_{di} : i. baradaki aktif ve reaktif yük
- P_{is} ve Q_{is} : i. barada TCPS modelinden gelen güç enjeksiyonları
- V_i ve δ_i : i. baradaki gerilimin genliği ve açısı
- S_i : i. daldaki görünür güç (akışı)
- ϕ_i : i. TCPS'nin faz kaydırma açısı
- x_{Ci} : i. TCSC'nin reaktansı
- Q_{SVCi} : i. SVC'nin verdiği reaktif güç

büyükliklerini göstermektedir.

Bu durumda sistemdeki kontrol değişkenleri, generatörlerin aktif güç üretimleri, generatör baralarının gerilimleri, transformatörlerin ayar kademeleri ve FACTS aygıtlarının kontrol büyüklükleridir. Bu büyüklükler üzerindeki sınırlar,

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i \in NG, i \neq s \quad (4.16)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in NG \quad (4.17)$$

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad i \in NT \quad (4.18)$$

$$\phi_i^{\min} \leq \phi_i \leq \phi_i^{\max} \quad i \in NP \quad (4.19)$$

$$x_{Ci}^{\min} \leq x_{Ci} \leq x_{Ci}^{\max} \quad i \in NS \quad (4.20)$$

$$Q_{SVCi}^{\min} \leq Q_{SVCi} \leq Q_{SVCi}^{\max} \quad i \in NC \quad (4.21)$$

şeklinde ifade edilir.

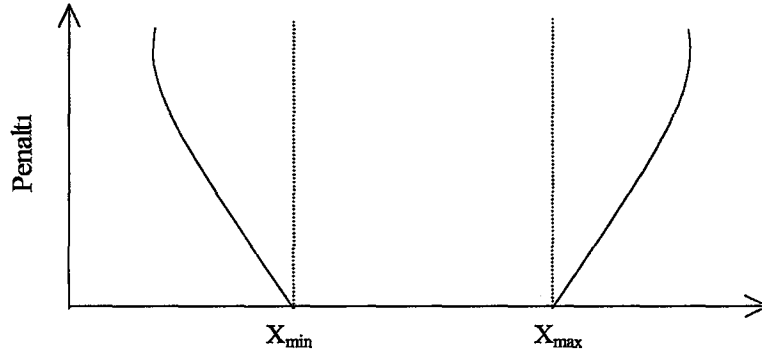
4.2 Problemin Çözümünde Kullanılan Genetik Algoritma Modeli

Genetik algoritmalar, optimizasyon probleminin değişkenleri, sabit uzunlukta bir katar olarak kodlanır. Bu katarlar, kromozom ya da topluluk içindeki bir birey olarak adlandırılır. Optimize edilecek amaç fonksiyonu ise uygunluk fonksiyonu adını alır. Genetik algoritmanın seçim, çaprazlama ve mutasyon olarak başlıca üç operatörü vardır. Genetik algoritma, önce rastlantısal olarak bir başlangıç topluluğu oluşturur. Topluluktaki bireylerin uygunluk fonksiyonu değerleri hesaplandıktan sonra, genetik operatörler yardımıyla yeni topluluklar üretilir. Bu işlem, belli bir nesil değerinde (iterasyonda) sona erdirilir. Oluşturulan genetik algoritma modelinin etkin çalışabilmesi, amaç fonksiyonunun kurulmasına, başlangıç topluluğunun oluşturulmasına, seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin belirlenmesine ve sonlandırma kriterine bağlıdır [17-33, 54].

4.2.1 Amaç fonksiyonu

Genetik algoritmalar, kısıtlamasız optimizasyon problemleri için çalışan algoritmalarlardır. Kısıtlamaların ele alınmasında kullanılan en genel yöntemlerden biri, kısıtlamaların penaltı fonksiyonları olarak amaç fonksiyonuna eklenmesidir [55]. Bu problemde, salınım barasındaki aktif güç üretimi, yük baralarının gerilimleri, hatlar ve transformatörler üzerindeki görünür güçler ve (4.14) ve (4.15)'de verilen ek kısıtlamalar, problemin durum değişkenleridir. Durum değişkenleri üzerindeki kısıtlamalar, maliyet fonksiyonuna, ikinci dereceden penaltı fonksiyonları olarak eklenmiştir.

Değişkenler sınırlar içindeyse, penaltı terimi eklenmez, fakat sınırlar aşıldığında, Şekil 4.1 deki gibi bir penaltı terimi eklenir [2].



Şekil 4.1 Penaltı fonksiyonu

Penaltı terimi, değişkeni alt ve üst sınırları içinde izin verilen aralığa çeker. Bu durumda genişletilmiş amaç fonksiyonu,

$$\begin{aligned}
 F = & C_T + \lambda_{PGS} (P_{GS} - \text{Sat}(P_{GS}))^2 + \sum_{i \in NPQ} \lambda_{Vi} (V_i - \text{Sat}(V_i))^2 \\
 & + \sum_{i \in NG} \lambda_{Gi} (Q_{Gi} - \text{Sat}(Q_{Gi}))^2 + \sum_{i \in (NL+NT)} \lambda_{Si} (|S_i| - S_i^{\max})^2 \\
 & + \sum_{i \in (NP+NS)} \lambda_{SPi} (|P_i| - P_i^{\text{belirli}})^2 + \sum_{i \in NC} \lambda_{Ci} (|V_i| - V_i^{\text{belirli}})^2
 \end{aligned} \quad (4.22)$$

şeklını alır. $\text{Sat}(x)$ doyma fonksiyonu,

$$\text{Sat}(x) = \begin{cases} x^{\min} & x < x^{\min} \\ x & x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \\ x^{\max} & x > x^{\max} \end{cases} \quad (4.23)$$

olarak tanımlanmıştır. P_{GS} , salınım barasının aktif güç üretimi, N_{PQ} yük baralarının sayısı, λ_{PGS} , λ_{Vi} , λ_{SPi} ve λ_{Ci} penaltı fonksiyonunun değerini maliyet fonksiyonuyla aynı boyuta getiren katsayılardır. Bu katsayıların değerleri denemelerle bulunmuş ve optimizasyonda sabit tutulmuştur.

Genetik algoritmalar, amaç fonksiyonunu maksimize etme yönünde çalışırlar. Bu yüzden maliyet minimizasyonu için uygunluk fonksiyonu,

$$f = \frac{1}{F} \quad (4.24)$$

ya da

$$f = F^{\max} - F \quad (4.25)$$

şeklinde alınmalıdır. Bu denklemlerde , $F^{\max}$ her nesilde amaç fonksiyonunun en iyi değeridir. Bu çalışmada, her iki uygunluk fonksiyonu ifadesi de ele alınmış, fakat elde edilen sonuçlara göre ikisinin birbirine herhangi bir üstünlüğü gözlenmemiştir.

4.2.2 Kodlama (kromozom gösterimi)

Herhangi bir genetik algortmada, topluluk içerisindeki bireyleri tanımlamak için kromozom gösterimi gereklidir. Bu gösterim genetik algortmada, problemin yapısını ve kullanılan genetik operatörleri belirler. Her bir birey ya da kromozom, belirli bir alfabeden ya da gen dizisinden oluşur. Bu alfabe, ikili (binary) düzendeki sayılardan (0 ve 1), gerçel sayılardan (kayan nokta), tam sayılardan, sembollerden, matrislerden vb. oluşabilir. Holland'ın orjinal tasarımında [17], bu alfabe sadece ikili düzendeki sayılarla sınırlıydı. İkili düzende verilen sayılardan oluşan gösterim, genetik algortma yapısında maksimum şema verdiğiinden en çok kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. Ancak, Michalewicz, modellemede kullanılan kayan nokta gösteriminin daha etkin olduğunu ve daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [18]. Kayan nokta gösteriminde, her kromozom vektörü, çözüm vektörüyle aynı uzunlukta gerçel sayılarla kodlanır. Her değişken, alt ve üst sınır değerleri içinde kalacak şekilde düzenlenir. Bu gösterimin hassasiyeti, kullanılan genetik operatörlere bağlıdır. Gerçel sayılarla kodlama, oldukça büyük çözüm kümelerini ele alabilir. Bunun yanında ikilik düzende gösterim, sabit bit sayısında büyük çözüm yüzeylerinde doğruluktan ödün verir. Gerçel sayılarla gösterim, problem uzayına daha yakın olduğundan, probleme özgü diğer operatörleri tasarlamak daha kolaydır. Bu özellik kısıtlamaların ele alınmasında önemli bir parametredir. Gerçel sayılarla kodlanarak oluşturulan genetik algortmalar, her çalıştırmada daha kararlı sonuç vermektedir [18].

Bu çalışmada, (4.16-4.21) denklemleriyle verilen optimizasyon probleminin kontrol değişkenleri yanında, FACTS aygıtlarının tipi ve yeri de genetik aloritmada kontrol değişkenleri olarak alınmıştır. En genel haliyle, tüm kontrol değişkenlerinin dahil edildiği çözüm vektörleri X ve Y,

$$X = \begin{bmatrix} ty_{(1...NF)_x} & sp_{(1...NB,NL)_x} & \phi_{(1...NP)_x} & k_{(1...NS)_x} & Q_{SVC(1...NC)_x} & \dots\dots \\ t_{(1...NT)_x} & P_{(1...NG)_x} & V_{(1...NG)_x} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$Y = \begin{bmatrix} ty_{(1...NF)_y} & sp_{(1...NB,NL)_y} & \phi_{(1...NP)_y} & k_{(1...NS)_y} & Q_{SVC(1...NC)_y} & \dots\dots \\ t_{(1...NT)_y} & P_{(1...NG)_y} & V_{(1...NG)_y} \end{bmatrix}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada ty, FACTS aygıtının tipi, sp ise yeridir. Çalışmada üç tip FACTS aygıtı ele alındığından, ty, 1, 2 ve 3 değerini alan bir tamsayıdır. sp, TCPS ve TCSC ele alındığında hat sayısına (NL) kadar, SVC ele alındığında ise bara sayısına kadar (NB) tam sayı değerini alabilir. Problemin diğer kontrol değişkenleri, alt ve üst sınırları içinde virgülden sonra dört haneye kadar bir duyarlılıkla gerçel sayılarla kodlanmıştır.

4.2.3 Seçim

Genetik aloritmada, birbirini izleyen nesillerin oluşmasında bireylerin seçimi, önemli bir rol oynar. Topluluktaki bireylerin uygunluk fonksiyonunda aldıkları değerlerine göre bir seçim uygulanır. Olasılığa bağlı bu seçimde, uygunluk değerleri yüksek olan bireylerin seçilme olasılıkları daha fazladır.

Başlıca üç seçim yöntemi vardır. Bunlar, uygunluk fonksiyonuyla orantılı yöntemler, sıralama yöntemleri ve turnuva yöntemleridir [17-19]. Uygunluk fonksiyonuyla orantılı olan yöntemlerde, bireylerin seçilme olasılıkları doğrudan uygunluk fonksiyonu değerlerine bağlıdır. Uygunluk fonksiyonu değerleri çok iyi olan bireylerin topluluğu etkilerine almamaları için, çeşitli şekillerde ölçeklendirme yapılır. Rulet tekerleği seçim yöntemi, bu gruba giren en basit ve klasik seçim yöntemidir. Sıralama yöntemleri [17], uygunluk fonksiyonu değerlerine göre bireylerin bağlı sıralamasını göz önüne alır. Bu yöntemlerde, çok iyi bireylerin

(dominant) baskısı azaldığından, herhangi bir ölçeklendirme yapılmasına gerek yoktur. Turnuva seçiminin temel mekanizması [18], rastlantısal olarak topluluktan p birey alınarak, uygunluk fonksiyonlarına göre, bu bireylerin kıyaslanması ile, en iyi bireyi seçmeye dayanır. Bu işlem, topluluktaki birey sayısı kadar tekrarlanır. p'nin değeri, seçim baskısını uygulayan önemli bir parametredir. p değeri büyük olursa, algoritma zamanından önce alt-optimal çözümlere yakınsayabilir. Yöntemin başlıca üstünlüklerinden biri, seçim baskısının yani p'nin kontrol edilebilmesidir. Ayrıca uygunluk fonksiyonları birebir karşılaştırılabildikleri için ölçeklendirmeye gerek duyulmamaktadır.

Bu çalışmada, rulet tekerleği, turnuva ve Joines ve Houck un normalize geometrik sıralama yöntemi [57] kullanılarak bir kıyaslama yapılmıştır. Rulet tekerleği seçim yöntemi, Ek A'da açıklanmıştır.

Normalize geometrik sıralamada, topluluktaki i. bireyin seçilme olasılığı,

$$p_i = q' (1 - q)^{r-1} \quad (4.27)$$

olarak tanımlanmıştır.

Bu denklemde

q : en iyi bireyin seçilme olasılığı

r : bireyin sıralamadaki yeri

$$q' : q' = \frac{q}{1 - (1 - q)^{TP}}$$

TP : topluluğu oluşturan birey sayısı

olarak verilmiştir.

Seçimi uygularken, herhangi bir nesilde bulunan “en iyi” değer, daha sonraki nesillerde kaybolmaması için elitist strateji uygulanmıştır [18]. Bunun için, herhangi bir nesilde bulunan en iyi değer saklanmış, bir sonraki nesilde bulunan “en kötü” değer yerine konulmuştur.

4.2.4 Çaprazlama ve mutasyon

Çaprazlama ve mutasyon, genetik algoritmanın temel arama mekanizmasını oluşturur. Bunlar, toplulukta var olan çözümlere bağlı olarak, yeni çözümlerin bulunmasında kullanılır. Çaprazlama, katarlar arasında bilgi alışverişini sağlayan bir mekanizmadır. Mutasyon operatörü, yeni bir çözüme varmak için tek bir bireyi değiştirir. Bu iki operatör toplulukta sırasıyla p_c ve p_m olasılıklarıyla uygulanır. Çaprazlama toplulukta yakınsamayı, mutasyon ise çeşitliliği sağladığından her iki operatörün olasılıkları uygun olarak seçilmelidir. Gerçel sayılarla kodlamada, mutasyon operatörü, ikili kodlamaya göre daha fazla önem taşır. Mutasyon operatörünün olasılığı daha fazla seçilerek yerel arama özelliği kazandırılır [18,56]. Gerçel sayılarla kodlamada kullanılabilecek operatörler aşağıda verilmiştir

4.2.4.1 Çaprazlama operatörleri

Çaprazlama için topluluktan p_c değerine bağlı olarak (4.26) denklemiyle verildiği gibi iki birey seçilir

Basit çaprazlama

Bu çaprazlama operatörü, X ve Y 'nin boyutuna göre (0,1) arasında üretilen rastlantı sayısı k ya bağlı olarak,

$$\begin{aligned} x'_i &= \begin{cases} x_i & i < k \\ y_i & i > k \end{cases} \\ y'_i &= \begin{cases} y_i & i < k \\ x_i & i > k \end{cases} \end{aligned} \quad (4.28)$$

şeklinde iki yeni birey oluşturur. Basit çaprazlama, temelde ikili kodlamada kullanılan tek noktalı çaprazlamaya benzerdir [56].

Aritmetik çaprazlama

Aritmetik çaprazlama, lineer kombinasyonla,

$$\begin{aligned} X' &= kX + (1 - k)Y \\ Y' &= (1 - k)X + kY \end{aligned} \quad (4.29)$$

şeklinde iki birey sağlar. Oluşan iki bireyin, değişken sınırları içinde kalacağı açıktır [56].

Heuristic çaprazlama

Bu çaprazlama operatörü, lineer ekstrapolasyonla,

$$\begin{aligned} X' &= X + k(X - Y) \\ Y' &= X \end{aligned} \quad (4.30)$$

şeklinde iki yeni birey oluşturur. Uygunluk fonksiyonu değerini kullanan tek çaprazlama operatörüdür. (4.30)'da verilen bağıntılarda X 'in uygunluk fonksiyonu değeri Y 'ye göre daha iyidir. Eğer, X' geçerli bir sonuç değilse, yeni bir rastlantı sayısı üretilerek tekrar iki yeni birey oluşturulur. Bu işlem, belirli bir sayıda tekrarlanır. Bu tekrarlar sonunda, başarısız olunursa, eski bireyler doğrudan yeni topluluğa konur [56].

4.2.4.2 Mutasyon Operatörleri

Mutasyon operatörü bir birey üzerinde işlem yapar. X vektöründen j değişkeni rastlantısal olarak seçildiği varsayılın.

Düzgün mutasyon

Düzgün mutasyon, bu değişkeni,

$$x'_i = \begin{cases} U(x_i^{\min}, x_i^{\max}) & i = j \\ x_i & i \neq j \end{cases} \quad (4.31)$$

şeklinde değiştirir.

Bu denklemde $U(x_i^{\min}, x_i^{\max})$, değişkenin alt ve üst sınırları arasında düzgün dağılımdan üretilen rastlantı sayısıdır. Bu operatör, arama algoritmasının ilk aşamalarında daha geniş bir çözüm uzayının taranmasına olanak sağlar. Bu özellik, başlangıç topluluğunda birden fazla geçerli çözümün bulunduğu durumlarda önem kazanır. Bu tür durumlar, başlangıç topluluğunun kullanıcı tarafından belirlendiği, kısıtlamalı optimizasyon problemlerinde oluşabilir. Operatör, arama algoritmasının daha sonraki aşamalarında yerel optimuma yakınsamayı önlemede etkilidir [56].

Düzgün olmayan mutasyon

Düzgün olmayan mutasyonun oluşturduğu yeni birey,

$$x_i' = \begin{cases} x_i + (x_i^{\max} - x_i)f(G) & k_1 < 0.5 \\ x_i - (x_i^{\min} - x_i)f(G) & k_1 \geq 0.5 \end{cases} \quad (4.32)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde,

$$f(G) = \left(k_2 \left(1 - \frac{G}{G^{\max}} \right) \right)^b \quad (4.33)$$

k_1, k_2 : (0,1) aralığında düzgün rastlantı sayıları

G : nesil sayısı

$G^{\max}$: maksimum nesil sayısı

b : şekil katsayısı

olarak ifade edilmiştir. $f(G)$ 'nin olasılığı, G arttıkça artar. Bu özellik sayesinde başlangıçta çözüm uzayında daha düzgün, sonra daha yerel bir arama yapılabilir [56].

Gaussian mutasyon

Bu mutasyon operatörü, seçilen değişkeni ortalaması sıfır, standart sapması σ olan normal dağılımdan üretilen bu rastlantı sayısıyla,

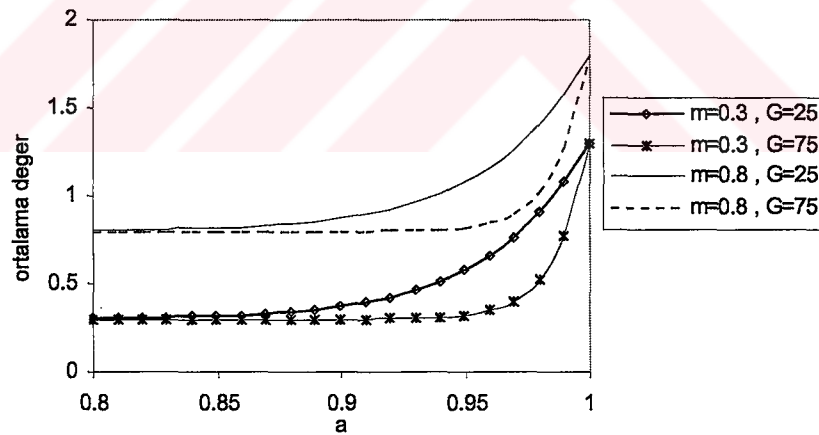
$$x_i' = x_i + N(0, \sigma) \quad (4.34)$$

şeklinde değiştirir. Bu denklemde,

$$\sigma = (x_i^{\max} - x_i^{\min}) (m + a^G) \quad (4.35)$$

$$m = \frac{f^{\max} - f_i}{f^{\max}}$$

olarak ifade edilir. Burada a , birden küçük fakat bire yakın bir sayıdır. Bu denklemden görüldüğü gibi, en iyi uygunluk değerinden daha kötü bir değere sahip olan çözüm için kullanılan ortalama değer büyük olacaktır. Bu da çözümü daha optimal bir sonuca götürebilecektir. a^G 'nin değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu değer, algoritmanın ilk aşamalarında ortalama değeri daha fazla, son aşamalarında ise daha az etkileyecektir. Bu operatörün özelliği parametre değerini, her nesilde bulunan en iyi uygunluk değerine göre ayarlamasıdır.



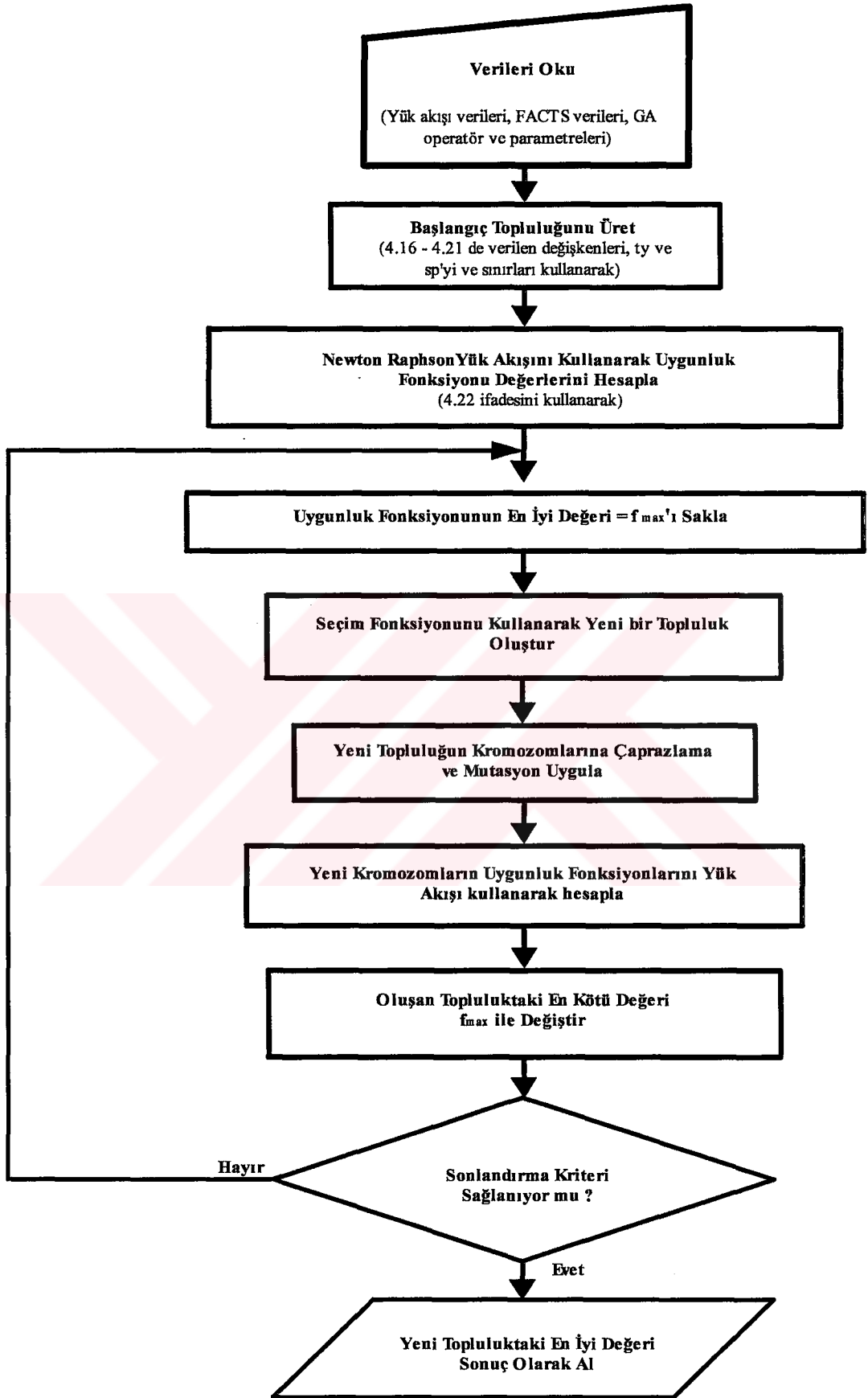
Şekil 4.2 Ortalama değerin a 'ya göre değişimi

4.2.5 Topluluğun yenilenmesi

Topluluğun güncellenmesi (yenilenmesi) için iki temel yaklaşım vardır. Nesilsel (generational) yaklaşımda, her nesilde topluluk, seçim, mutasyon ve çaprazlama operatörleri tarafından oluşturulan yeni toplulukla değiştirilir. Bu durumda, her nesildeki bireyler sadece kendi nesillerindeki bireylerle üreme yapabilir. Sürekli

durum yaklaşımlarında, oluşan toplulukta bireyler hemen yerlerini alır. Yeni topluluk bireyleri ve eski topluluk bireyleri aynı ortamda beraber bulunabilir. Genetik algoritmalarda, genellikle nesilsel yaklaşım kullanılır. Başlangıç topluluğunun oluşturulmasında, topluluktaki birey sayısı önemlidir. Topluluktaki birey sayısı, tam olarak arama uzayının modelini oluşturabilmeli, fakat algoritmanın çalışma süresini fazla uzatmamalıdır. Genelde, başlangıç topluluğunun birey sayısı deneylerle bulunur. Başlangıç topluluğunun oluşturulmasında izlenecek en kolay yol, değişkenlerin sınırları içinde rastlantısal olarak üretilmesidir. Bunun yanında var olan mühendislik bilgileri kullanılarak, elde edilmiş bir takım iyi sonuçlar başlangıç topluluğunun bir kısmına dahil edilebilir. Genetik algoritmanın sona erdirilmesinde kullanılan en basit kriter, algoritmayı belli bir nesil sayısında durdurmaktır. Başka bir sona erdirme kriteri, topluluktaki ortalama uygunluk değeriyle en iyi uygunluk değerinin karşılaştırılması şeklinde alınabilir. Ayrıca, topluluktaki en iyi birey belirli bir nesil sayısı boyunca değişmiyorsa, bu da algoritmanın durdurulması için bir kriter olarak alınabilir [17,19].

Genel algoritma, çalışmada göz önüne alınan parametrelerin kullanımıyla geliştirilerek Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Optimizasyon probleminde kullanılan GA

5. ÖRNEK SİSTEM İNCELEMELERİ

Örnek sistem incelemeleri, sonuçları karşılaştırma kolaylığı açısından IEEE-30 baralı test sistemi [4] üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sistem, 6 generatör barasına, 21 yüke ve 41 hat/transformatör dalına sahiptir. 11,12, 15 ve 36'nolu dallarda ayar kademesi değiştirilebilen transformatörler vardır. Örnek sistem verileri EK B'de verilmiştir.

5.1 Generatörlerin Yakıt Maliyeti Optimizasyonu

Amaç fonksiyonu olarak generatörlerin yakıt maliyeti Bölüm 2'de verilen denklemlere göre ifade edilmiştir. Buna göre,

Durum 1 Yakıt maliyeti ikinci dereceden bir fonksiyon (2.1 denklemi)

Durum 2 Yakıt maliyeti parçalı-ikinci dereceden bir fonksiyon (2.2 denklemi)

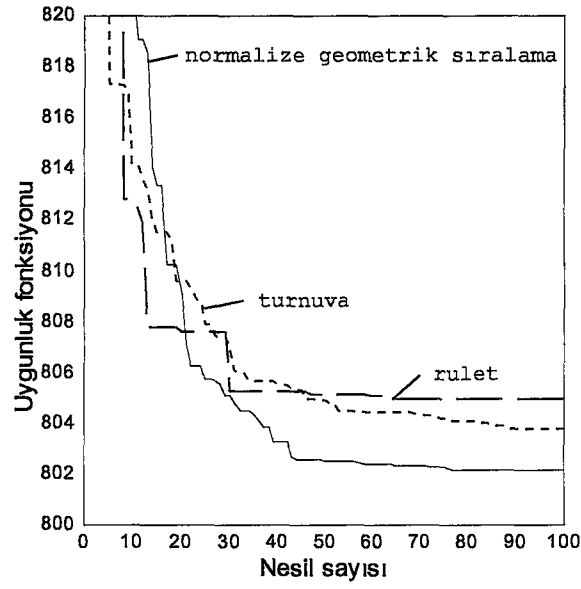
Durum 3 Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip ikinci dereceden bir fonksiyon (2.3 denklemi) ile belirlenmiştir.

Bu üç farklı ifade için yakıt maliyeti katsayıları sırasıyla Tablo B.4, Tablo B.5 ve Tablo B.6'da verilmiştir. Veriler, Durum 1 için, [4] nolu referanstan, Durum 2 için [28]'nolu referanstan alınmıştır. Ancak, Durum 3'e ilişkin veriler tarafımızdan gerçekleştirilmiştir. Bu üç durumda da, generatörlerin aktif güç üretimleri ve gerilim genlikleri ile transformatörlerin ayar kademeleri kontrol değişkenleri olarak belirlenmiştir. Sistemin başlangıç değerleri, Ray Zimmerman tarafından geliştirilen MATPOWER 2.0 [58] paketi içindeki Newton Raphson yük akışı kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 5.1'de verilmiştir. Güç akışında, 1 nolu generatörün bulunduğu bara salınım barası olarak seçilmiştir. Başlangıç koşulları olarak genelde kullanılan değerlerden yola çıkılmıştır. Ancak burada şunu belirtmek gerekir ki kullanılan genetik algoritma yöntemi bu koşullardan bağımsızdır.

Tablo 5.1 IEEE-30 baralı test sisteminin geleneksel güç akışı sonuçları

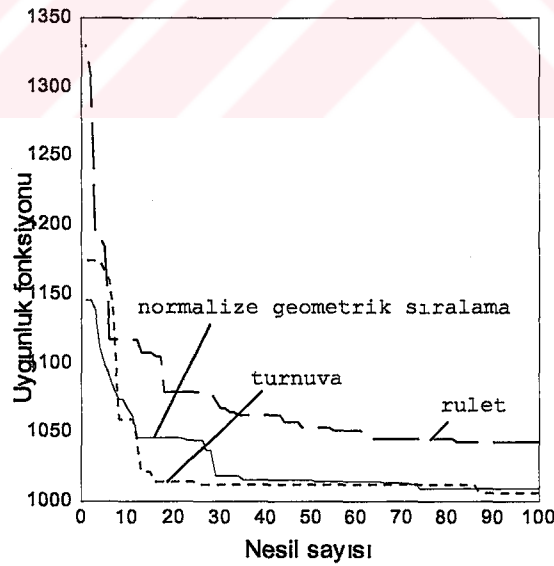
			Güç akışı sonuçları
Kontrol değişkenler	V[pu]	V ₁	1.0
		V ₂	1.0
		V ₅	1.0
		V ₈	1.0
		V ₁₁	1.0
		V ₁₃	1.0
	P _G [pu]	P _{G2}	0.8
		P _{G5}	0.5
		P _{G8}	0.2
		P _{G11}	0.2
		P _{G13}	0.2
	t [pu]	t ₁₁	1.0
		t ₁₂	1.0
		t ₁₅	1.0
		t ₃₆	1.0
Toplam üretim [MW, MVar]			289.61, 137.87
Toplam kayıp [MW, MVar]			6.21, 28.15
Durum 1 [\$/saat]			903.0147
Durum 2 [\$/saat]			1013.5
Durum 3 [\$/saat]			1124.5

Genetik algoritma yazılımında GAOT [57]'den yararlanılmıştır. Çözüm için kullanılan operatörler ile parametrelerin seçimleri şekillerle açıklanmıştır. Ele alınan problemin çözümü için kullanılan operatörler Bölüm 4'de tanımlanmıştır. Bu operatörler yakıt maliyetinin üç farklı formülasyonu için denenmiştir. Parametre değerleri sabit tutularak seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin performansı kendi içlerinde birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma için GA 30 kere çalıştırılmış ve ortalama değerler alınmıştır. Seçim operatörlerinin karşılaştırılmaları Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de verilmiştir.

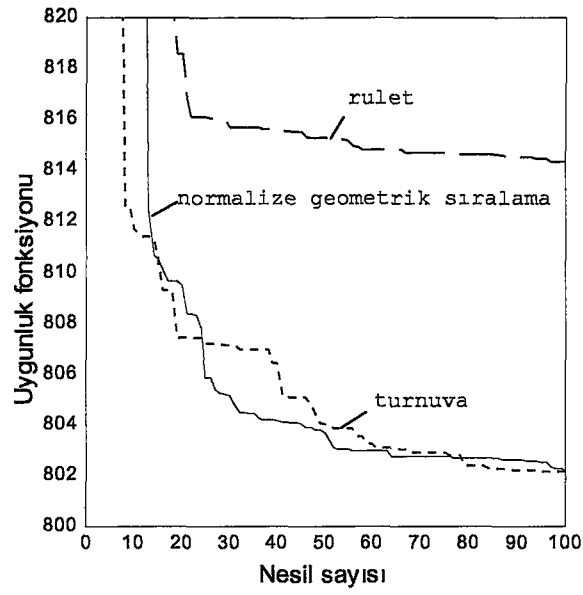


Şekil 5.1 Yakıt maliyeti ikinci dereceden fonksiyon olarak alındığında seçim operatörlerinin değişimi

Bu şekillerden görüldüğü üzere, rulet tekerleği seçim yöntemi diğerlerine göre çok daha kötü sonuç vermektedir. Turnuva ve normalize geometrik sıralama seçim yöntemleri arasında çok belirgin bir fark görülmemektedir.

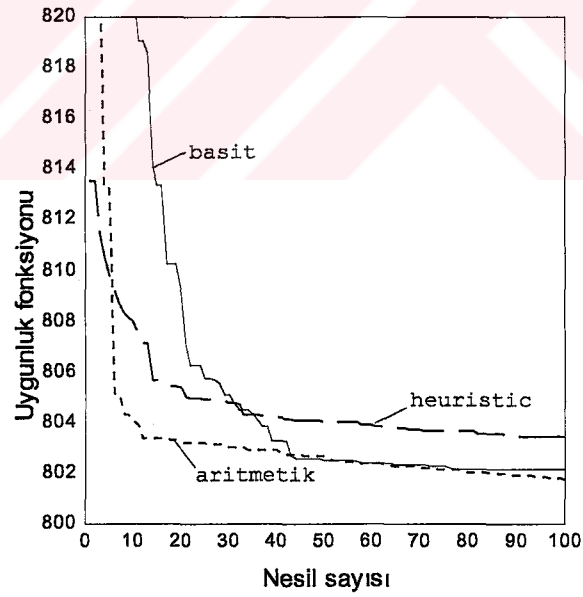


Şekil 5.2 Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon olarak alındığında seçim operatörlerinin değişimi

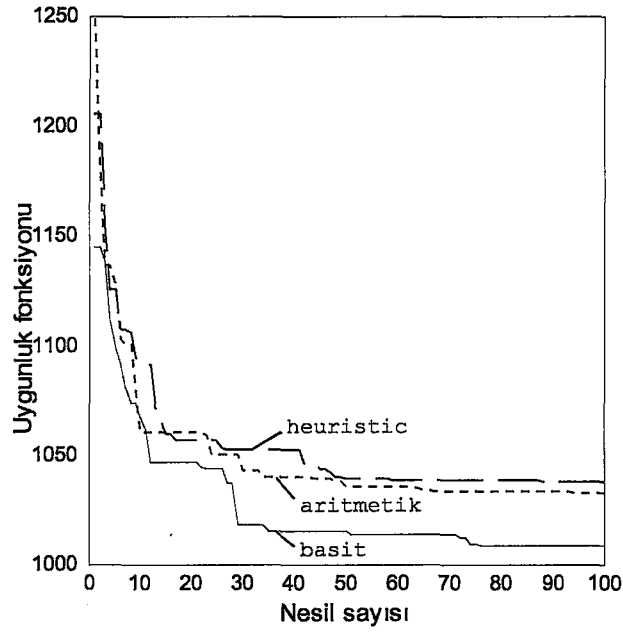


Şekil 5.3 Yakıt maliyeti parçalı-ikinci dereceden bir fonksiyon olarak alındığında seçim operatörlerinin değişimi

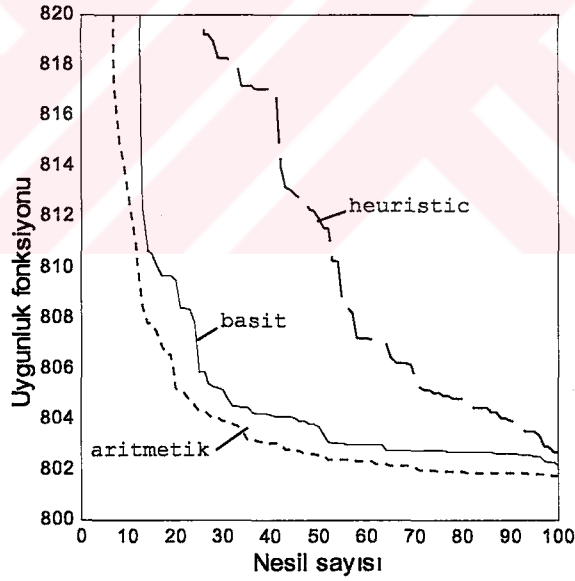
Çaprazlama operatörlerinin karşılaştırılmaları Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.4 Yakıt maliyeti ikinci dereceden fonksiyon olarak alındığında çaprazlama operatörlerinin değişimi

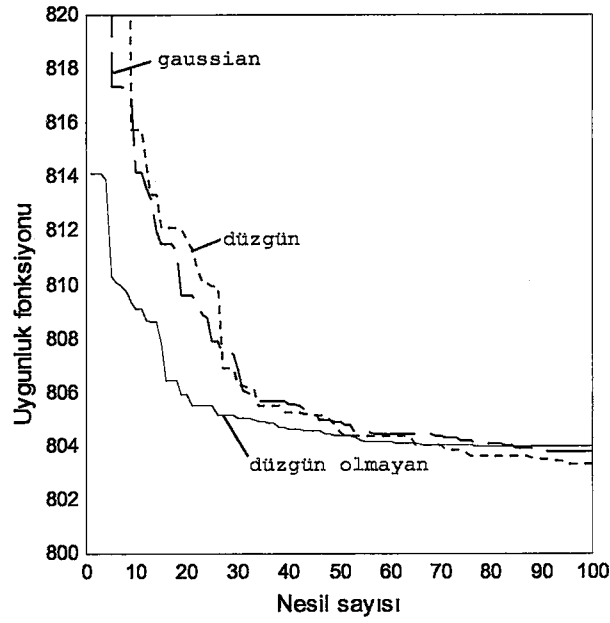


Şekil 5.5 Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon olarak alındığında çaprazlama operatörlerinin değişimi



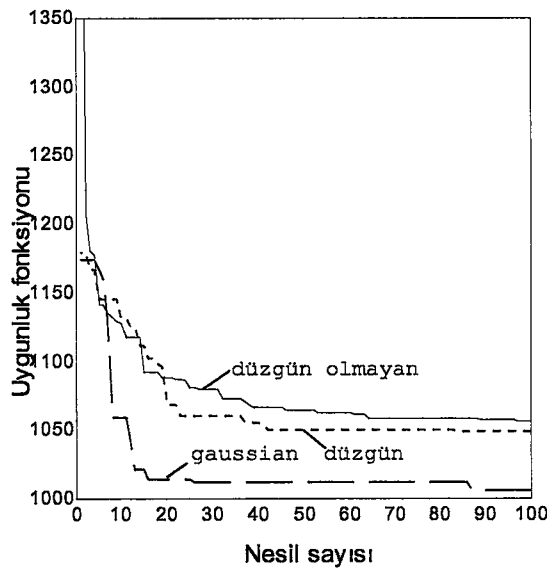
Şekil 5.6 Yakıt maliyeti parçalı-ikinci dereceden bir fonksiyon olarak alındığında çaprazlama operatörlerinin değişimi

Şekillerden de görüldüğü gibi, çaprazlama operatörleri arasında en kötü sonucu veren çaprazlama operatörü heuristic çaprazlamadır. Aritmetik ve basit çaprazlama arasında büyük bir fark gözlenmemektedir. Heuristic çaprazlamada geçerli çözümün bulunması için üç kez işlem yapılmıştır.

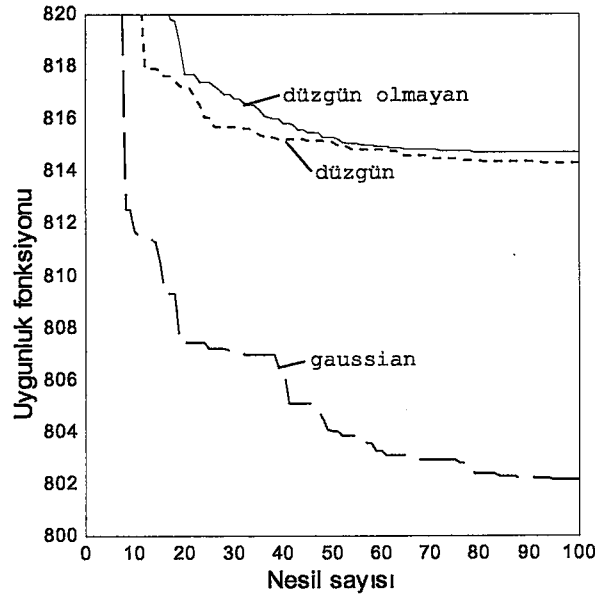


Şekil 5.7 Yakıt maliyeti ikinci dereceden fonksiyon olarak alındığında mutasyon operatörlerinin değişimi

Mutasyon operatörlerinin karşılaştırılması Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ile verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, amaç fonksiyonu, yakıt maliyeti ikinci dereceden fonksiyon olarak alındığında, mutasyon operatörleri arasında büyük bir fark gözükmemektedir. Yakıt maliyetinin diğer ifadelerinde Gaussian mutasyonun üstünlüğü çok daha belirgindir. Düzgün olmayan mutasyonda $b=2$, Gaussian mutasyonda $a=0.9$ olarak alınmıştır.

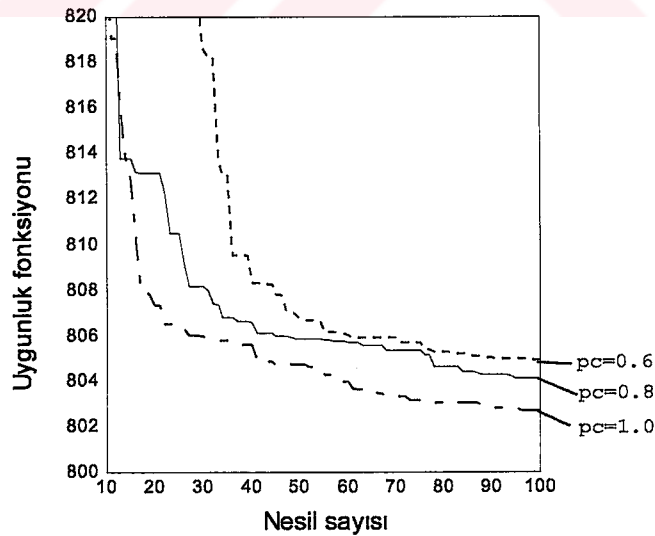


Şekil 5.8 Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon olarak alındığında mutasyon operatörlerinin değişimi



Şekil 5.9 Yakıt maliyeti parçalı-ikinci dereceden bir fonksiyon olarak alındığında mutasyon operatörlerinin değişimi

Denemelerden çıkarılan sonuçlara göre, seçilen operatörler Tablo 5.2'de verilmiştir. Operatörler belirlendikten sonra amaç fonksiyonu (2.2) denklemiyle verilen yakıt maliyeti ifadesi kullanılarak, uygun parametre seçimi için denemeler yapılmıştır. Denemelerde kullanılan parametreler literatürde en çok uygulanan değerler arasından seçilmiştir [20-32].

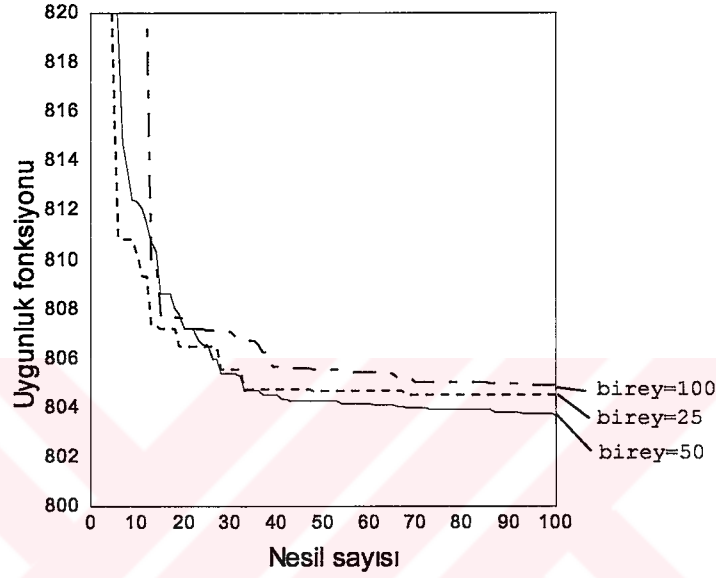


Şekil 5.10 Çaprazlama olasılığının değişimi

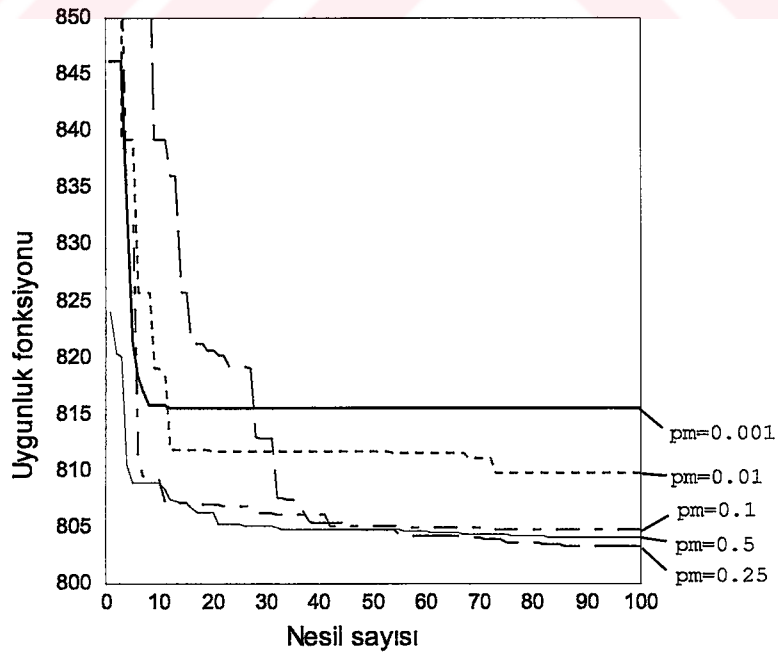
Çaprazlama olasılıkları 0.6, 0.8 ve 1.0 olarak alınmıştır. Bu çaprazlama olasılıklarına göre uygunluk fonksiyonunun değişimi Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekilden

görüldüğü gibi çaprazlama olasılığı arttırıldığında sonuçlar da iyileşmektedir. Fakat, bunun yanında algoritma yavaşlamaktadır.

Başlangıç topluluğundaki birey sayısı değiştirilerek elde edilen sonuçlar ve mutasyon olasılığı için denemeler sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Bu şekillerden çıkarılan sonuçlara göre seçilen parametre değerleri de Tablo 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.11 Başlangıç topluluğundaki birey sayısının değişimi



Şekil 5.12 Mutasyon olasılıklarının değişimi

Tablo 5.2GA'da kullanılan operatörler

GA Operatörleri	
Seçim	Turnuva
Çaprazlama	Basit çaprazlama
Mutasyon	Gaussian

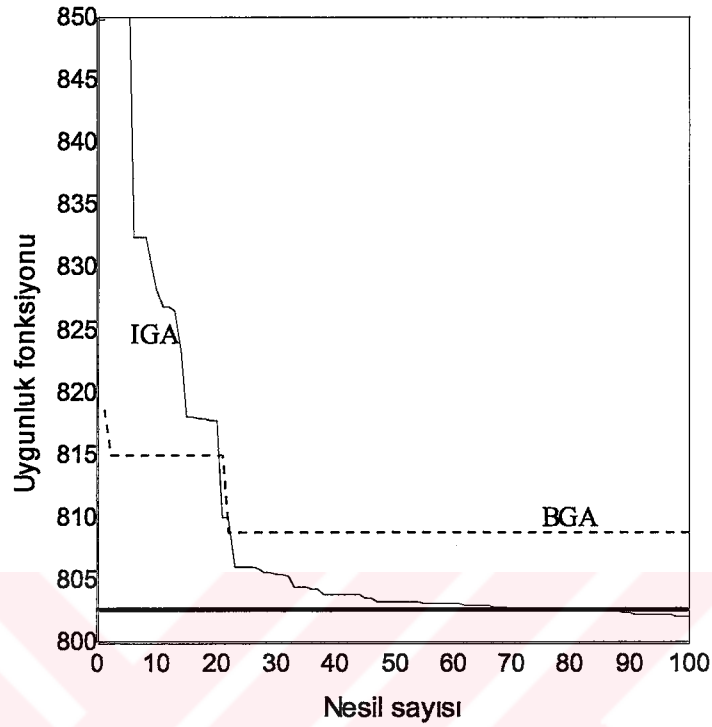
Tablo 5.3 GA'da kullanılan parametre değerleri

Parametreler	Değer
Başlangıç topluluğundaki birey sayısı	50
Çaprazlama olasılığı	0.6
Mutasyon olasılığı	0.25
Maksimum nesil sayısı	100

Optimizasyonda kullanılacak en uygun GA operatör ve parametreleri belirlendikten sonra, iyileştirilmiş bu algoritma ile Goldberg'in [17] basit genetik algoritması (BGA) karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, generatör yakıt maliyetinin ikinci dereceden bir fonksiyon olarak alındığı Durum 1 için yapılmıştır. BGA'da kullanılan bit sayısı, virgülden sonra dört haneye kadar duyarlı olacak şekilde belirlenmiştir. BGA ile ilgili daha detaylı bilgi Ek A'da verilmiştir. Karşılaştırmanın daha iyi yapılabilmesi için, BGA'daki rulet tekerleği seçim yöntemi yerine turnuva seçim yöntemi ve elitizm kullanılmış ve her iki yöntemde de parametre değerleri aynı seçilmiştir. Algoritmaların 30 kez çalıştırılmaları sonunda, iyileştirilmiş algoritma (IGA) ile elde edilen en iyi maliyet değeri 801.7959 \$/saat, ortalama maliyet değeri 802.9151 \$/saattir. BGA ile elde edilen en iyi değer ise 807.3320 \$/saat, ortalama değer ise 810.3320 \$/saattir. IGA ile elde edilen sonuçların standart sapması 1.7589, BGA ile elde edilen sonuçların standart sapması ise 3.0786'dır. IGA'nın çalışma süresinin BGA'nın çalışma süresine oranı 1:2'dir. Her iki algoritmayla elde edilen uygunluk fonksiyonlarının ortalama değerlerinin nesiller boyunca değişimi Şekil 5.13'de verilmiştir.

Şekilde, sabit bir çizgi olarak alınan optimum değer (802.4 \$/saat) [4]'den alınmıştır. Kalın çizgiyle gösterilen değişim, iyileştirilmiş algoritma, kesikli çizgiyle gösterilen değişim ise basit genetik algoritmayla elde edilen değişimdir. Şekilden de görüldüğü gibi, BGA ile elde edilen çözüm optimuma daha uzaktır ve yaklaşık 25. nesilde

optimum olmayan bu noktaya yakınsamıştır. Elde edilen bu değerler Bölüm 4.2.2'de verilenlerle uyusmaktadır.



Şekil 5.13 GA'nın nesiller boyunca değişimi

Üç durum için elde edilen "en iyi" değerler ve bu değerlere karşılık gelen kontrol değişkenleri Tablo 5.4'de verilmiştir. Tabloda AGK, aktif güç kayıpları, RGK, reaktif güç kayıpları, YM ise yakıt maliyeti olarak ifade edilmiştir. Kontrol değişkenleri, yük baralarının gerilimleri, generatörlerin reaktif güçleri ve hatlardaki güçler sınırlar içindedir. Optimizasyon programının sonuçları tablolar halinde Ek C'de verilmiştir.

Tablo 5.4'den görüldüğü gibi, Durum 1'de yakıt maliyeti temel duruma göre yaklaşık %11.21, Durum 2'de %20.91 ve Durum 3'de %8.07 azalmıştır.

Tablo 5.4 Yakıt maliyeti optimizasyon sonuçları

		Durum 1	Durum 2	Durum 3
V [pu]	V ₁	1.0777	1.0866	1.0774
	V ₂	1.062	1.0679	1.0688
	V ₅	1.0275	1.0319	1.0683
	V ₈	1.0314	1.0406	1.0502
	V ₁₁	1.1	1.1	1.0278
	V ₁₃	1.0641	1.0349	1.036
P_G [pu]	P _{G1}	1.7657	1.7788	1.7974
	P _{G2}	0.4982	0.492	0.2
	P _{G5}	0.2145	0.2015	0.15
	P _{G8}	0.225	0.2127	0.2406
	P _{G11}	0.1041	0.123	0.2312
	P _{G13}	0.12	0.12	0.3101
t [pu]	t ₁₁	0.9687	1.0481	0.9133
	t ₁₂	1.0284	0.9328	1.1
	t ₁₅	1.0486	0.9936	0.9932
	t ₃₆	1.0777	0.979	1.0268
MW	AGK	9.358	9.3979	9.5310
MVA_r	RGK	41.6622	42.7511	43.5307
\$/saat	YM	801.7959	801.5777	1033.7069

5.2 Kayıp Optimizasyonu

Burada amaç fonksiyonu olarak, aktif ve reaktif güç kayıpları ele alınmıştır. Optimizasyon sonuçları, Tablo 5.5'de gösterilmiştir.

Durum 4 Amaç fonksiyonu sistemdeki aktif güç kayıpları olarak alındı.

Durum 5 Amaç fonksiyonu sistemdeki reaktif güç kayıpları olarak alındı.

Tablo 5.5'den görüldüğü gibi, aktif ve reaktif güçler sırasıyla %45.55 ve %36.52 azalmıştır.

5.3 FACTS Aygıtlarının Sistem Üzerindeki Etkileri

FACTS aygıtlarının sistem üzerindeki etkileri ayrı ayrı göz önüne alındı. TCPS ve TCSC'nin aktif güç akışı kontrolündeki etkilerinin üzerinde duruldu. SVC'nin özelliği dolayısıyla, sistem gerilimleri üzerindeki etkisi incelendi. TCPS ve TCSC iletim hatlarına, SVC ise yük baralarına yerleştirildi. FACTS'lerin etkilerini tam olarak incelemek amacıyla farklı amaç fonksiyonları ve kısıtlamalar kullanıldı.

TCSC'nin kompanzasyon oranı k_s 0 ile %70 arasında, TCPS nin kontrol açısının sınırları da $-20^\circ \leq \phi \leq 20^\circ$ olarak alındı [10]. SVC gücünün sınırları da (3.5) ve (3.6) denklemlerine uygun olarak -5MVar ve +5MVar arasında değiştirildi. Bu değerler, hem literatüre hem de kullanılan örnek sisteme uygun olarak seçilmiştir.

Tablo 5.5 Aktif ve reaktif güç kayıplarının optimizasyonu

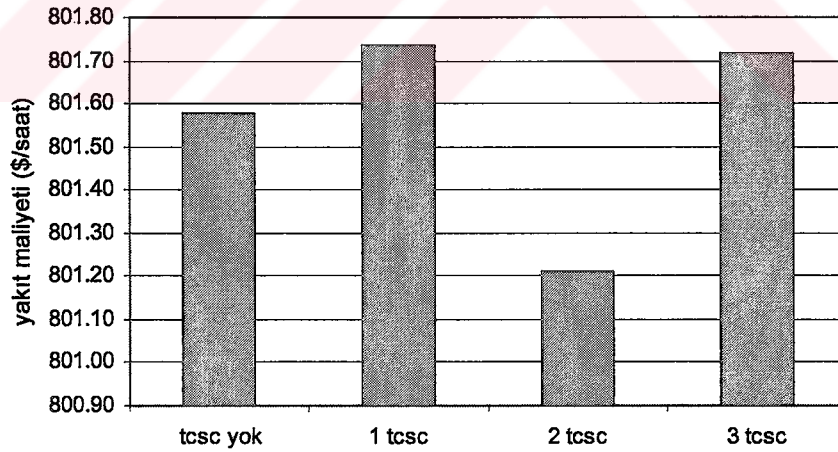
		Durum 4	Durum 5
V [pu]	V ₁	1.0578	1.0619
	V ₂	1.0574	1.057
	V ₅	1.0346	1.0397
	V ₈	1.0404	1.0447
	V ₁₁	1.1	1.0759
	V ₁₃	1.0867	1.0725
P _G [pu]	P _{G1}	0.5178	0.5182
	P _{G2}	0.80	0.80
	P _{G5}	0.50	0.50
	P _{G8}	0.35	0.35
	P _{G11}	0.30	0.30
	P _{G13}	0.40	0.40
t [pu]	t ₁₁	1.0402	0.9724
	t ₁₂	0.9	0.9907
	t ₁₅	1.0349	0.9752
	t ₃₆	0.9789	0.9882
MW	AGK	3.3814	3.4417
MVar	RGK	23.1596	17.8685

5.3.1 TCSC, TCPS ve SVC'nin yakıt maliyetine etkisi

Amaç fonksiyonu olarak (2.2) denklemlerinde verilen yakıt maliyeti alındı. Bu amaç fonksiyonu ile sırasıyla sisteme bir, iki ve üç TCSC yerleştirildi. Aynı işlemler TCPS ve SVC için tekrarlandı. FACTS aygıtlarının yeri ve kontrol değişkenleri, sistemdeki diğer kontrol değişkenleriyle beraber, genetik algoritmadaki çözüm vektöründe yer aldı. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 5.6, Tablo 5.7 ve Tablo 5.8'de verildi. Karşılaştırmaların daha iyi yapılabilmesi için, sonuçlar Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da grafiksel olarak da sunulmuştur.

Tablo 5.6 TCSC'nin yakıt maliyetine etkisi

		1 TCSC	2 TCSC	3 TCSC
V [pu]	V_1	1.08	1.09	1.0762
	V_2	1.064	1.0638	1.0592
	V_5	1.0311	1.034	1.0312
	V_8	1.0365	1.021	1.0313
	V_{11}	1.1	1.08	1.1
	V_{13}	1.074	1.0788	1.0834
P_G [pu]	P_{G1}	1.7478	1.7737	1.7712
	P_{G2}	0.4963	0.4883	0.4835
	P_{G5}	0.2207	0.226	0.218
	P_{G8}	0.2248	0.2123	0.215
	P_{G11}	0.1162	0.1104	0.1197
	P_{G13}	0.12	0.12	0.12
t [pu]	t_{11}	1.0191	1.0492	1.0554
	t_{12}	0.9	0.9766	0.9
	t_{15}	1.0162	1.0312	1.0483
	t_{36}	0.9648	0.995	0.9657
TCSC li hatlar		(3-4)	(3-4), (2-5)	(15-23), (2-5), (6-28)
k_s (%)		43.4	70 ,15.6	36.81, 32.6, 25.01
\$/saat	YM	801.733	801.213	801.7154

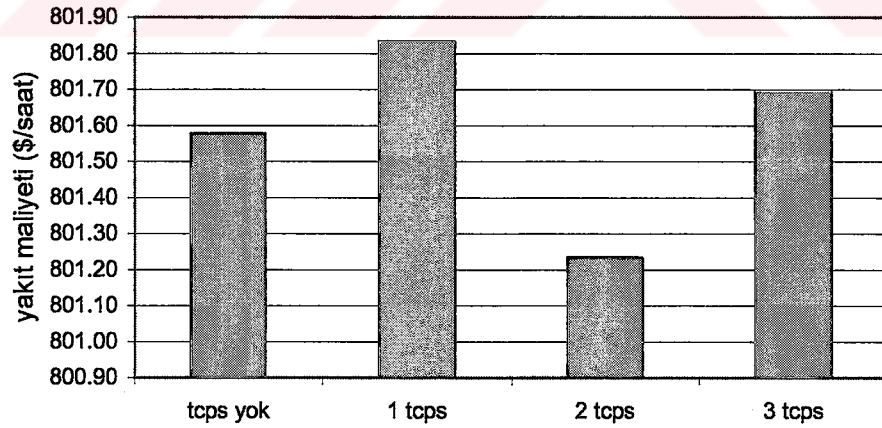


Şekil 5.14 TCSC'nin yakıt maliyetine etkisi

Grafikten görüldüğü gibi, (3-4) ve (2-5) hatlarına yerleştirilen TCSC'ler yakıt maliyetini az da olsa düşürmüştür. Diğer durumlarda, maliyet artmıştır.

Tablo 5.7 TCPS'nin yakıt maliyetine etkisi

		1 TCPS	2 TCPS	3 TCPS
V [pu]	V_1	1.084	1.085	1.0857
	V_2	1.0687	1.0663	1.0655
	V_5	1.0427	1.0351	1.0295
	V_8	1.0377	1.0338	1.0246
	V_{11}	1.1	1.1	1.1
	V_{13}	1.0532	1.0183	1.0488
P_G [pu]	P_{G1}	1.8118	1.7631	1.7762
	P_{G2}	0.4832	0.4948	0.4739
	P_{G5}	0.2098	0.2104	0.2033
	P_{G8}	0.1832	0.2124	0.2204
	P_{G11}	0.1226	0.1254	0.1334
	P_{G13}	0.12	0.12	0.12
t [pu]	t_{11}	0.9964	1.0517	1.0377
	t_{12}	0.9824	0.9943	0.9674
	t_{15}	0.9661	1.029	1.0504
	t_{36}	1.084	0.9964	0.9719
TCPS li hatlar		(25-26)	(1-2), (6-7)	(1-3), (6-7), (25-26)
ϕ (°)		-11.6055	1.0411, 1.3423	3.1505, -1.4558, -20
$\$/saat$	YM	801.8329	801.2346	801.6948

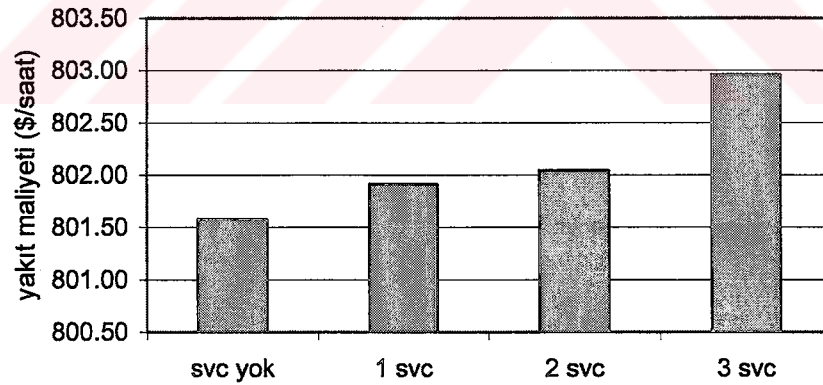


Şekil 5.15 TCPS'nin yakıt maliyetine etkisi

(1-2) ve (6-7) hatlarına yerleştirilen TCPS'ler yakıt maliyetini az da olsa düşürmüştür. Diğer durumlarda, TCSC'de olduğu gibi yakıt maliyeti artmıştır.

Tablo 5.8 SVC'nin yakıt maliyetine etkisi

		1 SVC	2 SVC	3 SVC
V [pu]	V ₁	1.0866	1.1	1.0866
	V ₂	1.0679	1.0774	1.0679
	V ₅	1.0206	1.0491	1.0319
	V ₈	1.0406	1.04	1.0406
	V ₁₁	1.1	1.1	1.0409
	V ₁₃	1.0431	1.0405	1.0579
P_G [pu]	P _{G1}	1.7579	1.816	1.8011
	P _{G2}	0.4927	0.4741	0.4217
	P _{G5}	0.2164	0.1955	0.2377
	P _{G8}	0.2397	0.2184	0.2165
	P _{G11}	0.1	0.1068	0.13
	P _{G13}	0.12	0.12	0.12
t [pu]	t ₁₁	1.0789	1.0536	0.9826
	t ₁₂	0.9	0.9319	0.9147
	t ₁₅	0.9748	0.9247	1.0342
	t ₃₆	0.9773	0.9975	0.9653
SVC li baralar		3	27, 30	4, 29, 3
Q(MVAr)		3.6704	-1.2183, 3.7966	5, 0.7954, -5
\$/saat	YM	801.9153	802.0414	802.9569



Şekil 5.16 SVC'nin yakıt maliyetine etkisi

Yük baralarına yerleştirilen SVC'ler ise yakıt maliyetini %0.2 dolayında artırmıştır. Sonuç olarak FACTS aygıtlarının yakıt maliyetini çok etkilediği söylenemez.

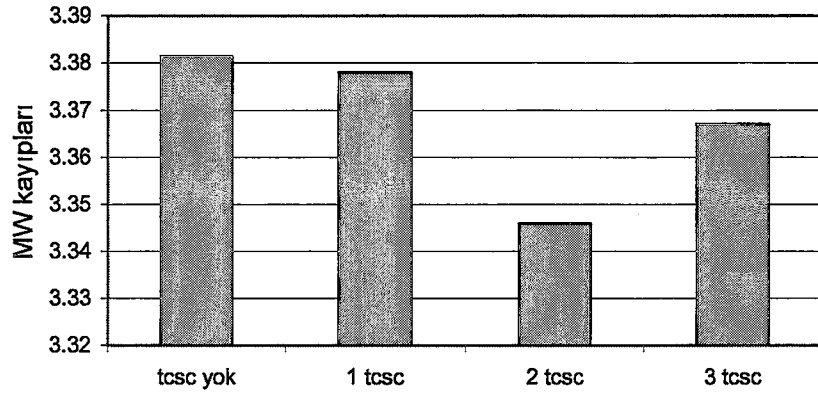
5.3.2 TCSC, TCPS ve SVC'nin kayıplara etkisi

Amaç fonksiyonu olarak ayrı ayrı aktif ve reaktif güç kayıpları alınmış, yakıt maliyeti optimizasyonunda yapılan işlemler tekrarlanmıştır. Aktif güç kayıpları için elde edilen sonuçlar, Tablo 5.9, Tablo 5.10 ve Tablo 5.11 ile Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmiştir. Benzer şekilde reaktif güç kayıpları için elde edilen sonuçlar, Tablo 5.12, Tablo 5.13 ve Tablo 5.14 ve Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de gösterilmiştir.

Tablo 5.9 TCSC'nin aktif güç kayıplarına etkisi

		1 TCSC	2 TCSC	3 TCSC
V [pu]	V ₁	1.0665	1.0628	1.062
	V ₂	1.0648	1.0569	1.0617
	V ₅	1.044	1.0384	1.0387
	V ₈	1.0513	1.0498	1.044
	V ₁₁	1.1	1.1	1.1
	V ₁₃	1.0109	1.0698	1.0779
P_G [pu]	P _{G1}	0.5178	0.5175	0.5177
	P _{G2}	0.8	0.8	0.8
	P _{G5}	0.5	0.5	0.5
	P _{G8}	0.35	0.35	0.35
	P _{G11}	0.3	0.3	0.3
	P _{G13}	0.4	0.4	0.4
t [pu]	t ₁₁	1.0925	1.0497	1.0516
	t ₁₂	0.937	0.9	0.9
	t ₁₅	0.9909	0.9981	1.0076
	t ₃₆	0.9903	0.972	0.9619
TCSC li hatlar		(2-5)	(2-5), (6-28)	(2-5), (4-6), (6-28)
k_s (%)		29.58	22.3, 70	31.28, 70, 70
MW	AGK	3.378	3.346	3.367

(2-5) hattına yerleştirilen TCSC, aktif güç kayıplarını %11, (2-5) ve (6-28) hatlarına yerleştirilen TCSC'ler kayıpları %12.27 ve (2-5), (4-6) ve (6-28) hatlarına yerleştirilen TCSC'ler ise kayıpları %11.72 azaltmıştır. Görüldüğü gibi aktif güç kayıplarını için en uygun sonucu sisteme yerleştirilen iki TCSC vermiştir.

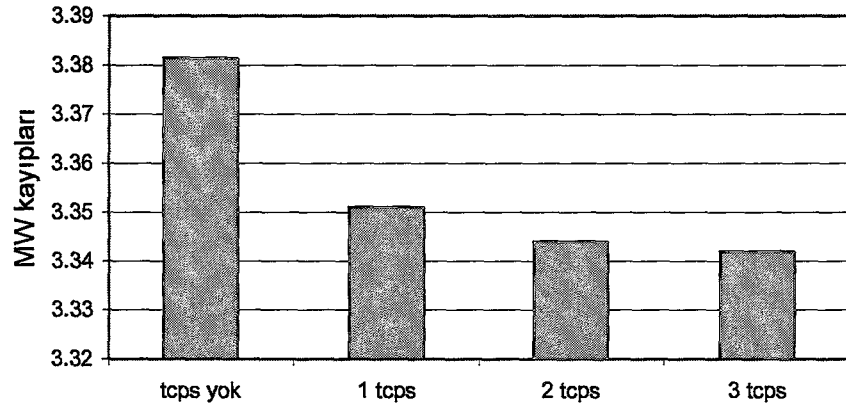


Şekil 5.17 TCSC'nin aktif güç kayıplarına etkisi

Tablo 5.10 TCPS'nin aktif güç kayıplarına etkisi

		1 TCPS	2 TCPS	3 TCPS
V [pu]	V ₁	1.0559	1.0567	1.0622
	V ₂	1.0502	1.0496	1.0605
	V ₅	1.0329	1.0282	1.0292
	V ₈	1.0362	1.0376	1.0457
	V ₁₁	1.1	1.1	1.1
	V ₁₃	1.0819	1.0749	1.0394
P _G [pu]	P _{G1}	0.5175	0.5174	0.5174
	P _{G2}	0.8	0.8	0.8
	P _{G5}	0.5	0.5	0.5
	P _{G8}	0.35	0.35	0.35
	P _{G11}	0.3	0.3	0.3
	P _{G13}	0.4	0.4	0.4
t [pu]	t ₁₁	1.0349	1.079	1.0125
	t ₁₂	0.9073	0.9	0.983
	t ₁₅	1.0057	1.0388	1.0462
	t ₃₆	0.9727	0.9684	0.9936
TCPS li hatlar		(25-27)	(25-27), (25-26)	(10-17), (24-25), (25-26)
φ(°)		0.5928	4.4315, -4.1504	-0.4298, 2.7155, 20
MW	AGK	3.351	3.344	3.342

(25-27) hattına yerleştirilen TCPS aktif güç kayıplarını %12.14, (25-26) ve (25-27) hatlarına yerleştirilen TCPS'ler %12.32 ve (10-17), (24-25) ve (25-26) hatlarına yerleştirilen TCPS'ler %12.38 azaltmıştır.

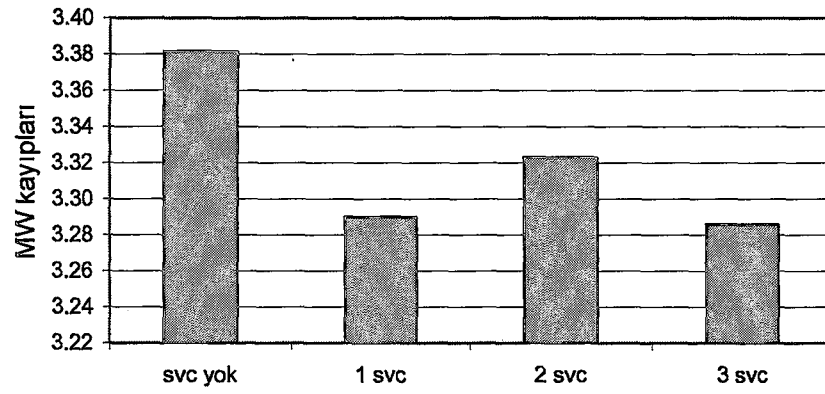


Şekil 5.18 TCPS'nin aktif güç kayıplarına etkisi

Tablo 5.11 SVC'nin aktif güç kayıplarına etkisi

		1 SVC	2 SVC	3 SVC
V [pu]	V ₁	1.0646	1.0577	1.06
	V ₂	1.0587	1.0471	1.0562
	V ₅	1.0419	1.0349	1.0369
	V ₈	1.0474	1.0374	1.0437
	V ₁₁	1.1	1.0936	1.1
	V ₁₃	1.0425	1.07	1.0469
P _G [pu]	P _{G1}	0.5169	0.5172	0.5169
	P _{G2}	0.8	0.8	0.8
	P _{G5}	0.5	0.5	0.5
	P _{G8}	0.35	0.35	0.35
	P _{G11}	0.3	0.3	0.3
	P _{G13}	0.4	0.4	0.4
t [pu]	t ₁₁	1.0899	0.988	0.9763
	t ₁₂	0.9	0.9863	1.0658
	t ₁₅	1.0034	1.0129	1.0304
	t ₃₆	0.9884	0.9859	0.803
SVC li baralar		23	26, 22	23, 19, 21
Q (MVar)		5	4.4204, 3.8631	5, 0.8414, 2.5363
MW	AGK	3.29	3.323	3.286

23 nolu baraya yerleştirilen SVC aktif güç kayıplarını %13.74, 22 ve 26 nolu baralara yerleştirilen SVC'ler %12.87 ve 19, 21 ve 23 nolu baralara yerleştirilen SVC'ler %13.84 azaltmıştır.

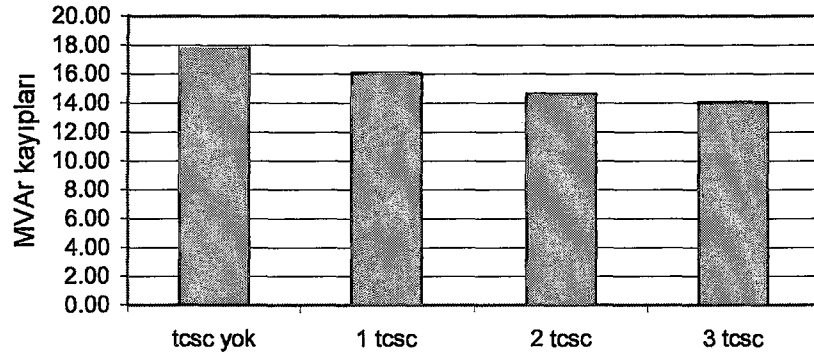


Şekil 5.19 SVC'nin aktif güç kayıplarına etkisi

Tablo 5.12 TCSC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi

		1 TCSC	2 TCSC	3 TCSC
V [pu]	V ₁	1.0687	1.0686	1.0634
	V ₂	1.0594	1.0606	1.0623
	V ₅	1.0452	1.0369	1.0437
	V ₈	1.046	1.0411	1.0545
	V ₁₁	1.0744	1.0629	1.0581
	V ₁₃	1.0763	1.0708	1.0764
P_G [pu]	P _{G1}	0.5772	0.5719	0.5563
	P _{G2}	0.8	0.8	0.8
	P _{G5}	0.5	0.5	0.5
	P _{G8}	0.35	0.35	0.35
	P _{G11}	0.2733	0.2508	0.3
	P _{G13}	0.3735	0.4	0.3639
t [pu]	t ₁₁	0.9837	0.9782	0.9943
	t ₁₂	0.9819	0.9975	1.0115
	t ₁₅	0.9866	0.9738	0.9767
	t ₃₆	0.9849	0.9663	1.0121
TCSC li hatlar		(1-3)	(1-3), (2-5)	(1-3), (2-5), (2-6)
k_s (%)		70	70, 70	70, 70, 70
MVar	RGK	16.07	14.62	14.05

(1-3) hattına yerleştirilen TCSC reaktif güç kayıplarını %10.06, (1-3) ve (2-5) hatlarına yerleştirilen TCSC'ler %18.18 ve (1-3), (2-5) ve (2-6) hatlarına yerleştirilen TCSC'ler de %21.87 azaltmıştır.

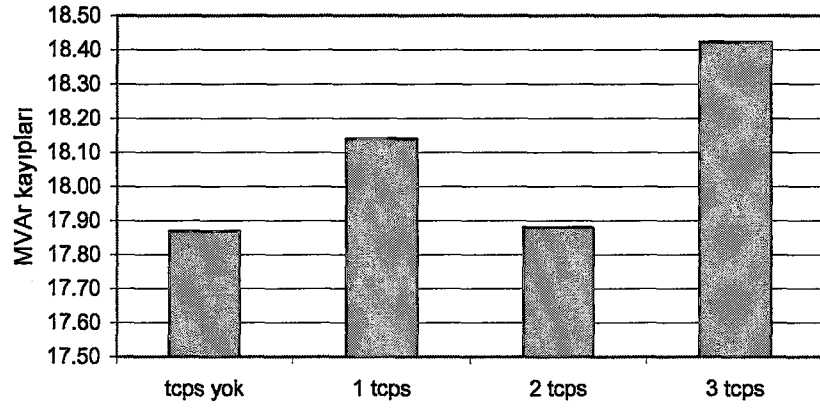


Şekil 5.20 TCSC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi

Tablo 5.13 TCPS'nin reaktif güç kayıplarına etkisi

		1 TCPS	2 TCPS	3 TCPS
V [pu]	V ₁	1.0742	1.0636	1.061
	V ₂	1.0671	1.0606	1.057
	V ₅	1.0442	1.0369	1.0319
	V ₈	1.0413	1.0488	1.0406
	V ₁₁	1.0613	1.0603	1.0683
	V ₁₃	1.0625	1.0715	1.0548
P _G [pu]	P _{G1}	0.5187	0.5184	0.5194
	P _{G2}	0.8	0.8	0.8
	P _{G5}	0.5	0.5	0.5
	P _{G8}	0.35	0.35	0.35
	P _{G11}	0.3	0.3	0.3
	P _{G13}	0.4	0.4	0.4
t [pu]	t ₁₁	0.9964	0.9789	0.9607
	t ₁₂	0.9854	0.9752	0.9837
	t ₁₅	0.9911	0.9762	0.9796
	t ₃₆	0.9743	0.9795	0.9627
TCPS li hatlar		(25-27)	(25-27), (24-25)	(27-29), (15-18), (19-20)
φ (°)		0.0766	3.6387, -3.6255	-0.203, 0.5871, -0.3355
MVAr	RGK	18.14	17.88	18.4229

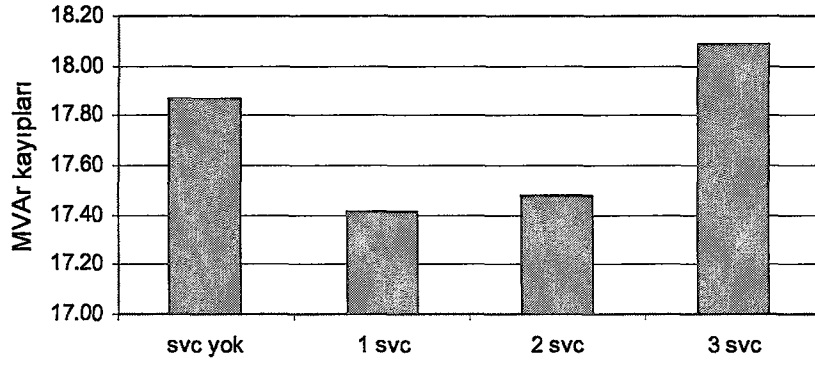
Grafikten ve tablodan görüldüğü üzere TCPS'ler reaktif güç kayıplarını %1-3 oranında arttırmıştır.



Şekil 5.21 TCPS'nin reaktif güç kayıplarına etkisi

Tablo 5.14 SVC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi

		1 SVC	2 SVC	3 SVC
V [pu]	V ₁	1.0641	1.06	1.0549
	V ₂	1.0592	1.0559	1.0415
	V ₅	1.0428	1.0334	1.019
	V ₈	1.0492	1.0398	1.0198
	V ₁₁	1.065	1.0571	1.0579
	V ₁₃	1.0625	1.0517	1.0638
P _G [pu]	P _{G1}	0.5172	0.5174	0.5252
	P _{G2}	0.8	0.8	0.8
	P _{G5}	0.5	0.5	0.5
	P _{G8}	0.35	0.35	0.35
	P _{G11}	0.3	0.3	0.3
	P _{G13}	0.4	0.4	0.4
t [pu]	t ₁₁	0.9893	0.9784	0.9575
	t ₁₂	0.9815	0.9814	0.9628
	t ₁₅	0.9881	0.9999	0.955
	t ₃₆	0.9847	0.9904	0.9586
SVC li baralar		24	19, 24	19, 10, 24
Q (MVar)		5	5, 5	5, 3.933, 2.1923
MVar	RGK	17.41	17.48	18.09



Şekil 5.22 SVC'nin reaktif güç kayıplarına etkisi

SVC'ler reaktif güç kayıplarını %2-3 oranında azaltmış, fakat 10, 19 ve 24 nolu baralara yerleştirilen üç SVC kayıpları az da olsa arttırmıştır.

5.3.3 Güvenlik kısıtlamaları, hatlardaki aktif güç akışı ve bara gerilimleri üzerindeki kısıtlamalarla optimizasyon

Bu bölümde generatörlerin yakıt maliyeti optimizasyonuna (2.2), güvenlik kısıtlamaları, hatlardaki aktif güç kısıtlamaları ve yük baraları gerilimlerinin kısıtlamaları eklenmiş ve bu durumlar üzerinde FACTS aygıtlarının etkileri incelenmiştir.

Güvenlik kısıtlamalarını optimizasyona dahil etmek amacıyla, güvenlik indisleri (2.6) ve (2.7) denklemlerine göre hesaplanarak Tablo 5.15'de verilmiştir. Gerilim indisine göre sistem için en kötü durumu (27-30) hattının devreden çıkması, aktif güç indisine göre en kötü durumu (10-20) hattının devreden çıkması vermiştir. Bu durumlara ilişkin optimizasyon sonuçları Tablo 5.16'da verilmiştir. (27-30) hattının devreden çıkması durumunda 30 nolu baranın gerilimi, sınırların dışında 0.9367pu olarak bulunmuştur. Her iki durumda da yakıt maliyetinin arttığı görülmektedir. (10-20) hattının devreden çıkması durumunda sisteme TCPS ve TCSC yerleştirilerek inceleme yapılmıştır. Bu FACTS aygıtlarının, (10-20) hattının devre dışı kalması durumunda da yakıt maliyetine fazla bir etkisi olmamıştır.

Tablo 5.15 Güvenlik indisleri

Hat	PI _p	PI _v
27-30	1.5489	135.2256
27-29	1.2990	132.2371
12-15	1.3283	120.7882
25-27	0.9463	104.3510
10-20	2.1930	98.6458
15-23	1.0567	82.2024
10-21	1.0703	78.5071
22-24	0.9527	76.8925
6-8	1.2713	73.4467
15-18	0.8329	67.2909
19-20	1.5124	65.5666
6-28	1.2182	65.2756
12-16	1.0134	63.4387
12-14	1.1070	61.0514
29-30	0.9709	58.9862
8-28	0.8295	58.8005
4-6	1.5877	56.0500
23-24	0.8537	56.1791
10-22	1.0028	55.8049
5-7	0.8143	55.1683
2-6	1.1892	54.1973
2-5	2.1896	53.1715
16-17	0.8802	54.1905
1-2	1.5044	52.5661
3-4	1.6679	52.2019
2-4	1.0430	52.6632
18-19	0.7732	52.0329
10-17	0.8906	51.1959
14-15	0.8405	50.7166
21-22	0.8310	47.6233
6-7	0.7366	46.7068
24-25	0.8090	41.3293

Benzer şekilde, sistemdeki gerilim dağılımını etkileyen en kötü durumda, yani (27-30) hattının devre dışı kalma durumunda, sisteme SVC yerleştirilerek inceleme yapılmıştır. SVC yakıt maliyetini az da olsa azaltarak 30 nolu baranın gerilimini 0.9782pu yapıp sınırlar içine çekmiştir. Bu inceleme sonuçları Tablo 5.17'de verilmiştir. FACTS aygıtlarının bu etkileri sistemin yapısına bağlıdır. Güvenlik indislerine bakılırsa, nominal yüklenme durumunda sistemin bara gerilimleri konusunda daha zayıf olduğu görülmektedir.

Tablo 5.16 Güvenlik kısıtlamalı optimizasyon

		(27-30) devre dışı	(10-20) devre dışı
V [pu]	V ₁	1.0877	1.0911
	V ₂	1.0784	1.07
	V ₅	1.0565	1.0335
	V ₈	1.0499	1.0384
	V ₁₁	1.0366	1.1
	V ₁₃	1.0374	1.0452
P _G [pu]	P _{G1}	1.7544	1.7994
	P _{G2}	0.471	0.4639
	P _{G5}	0.2164	0.2032
	P _{G8}	0.2497	0.2249
	P _{G11}	0.1217	0.1221
	P _{G13}	0.12	0.12
t [pu]	t ₁₁	1.0226	1.0199
	t ₁₂	0.9128	0.9614
	t ₁₅	0.9367	0.9778
	t ₃₆	0.9653	0.9683
MW	AGK	9.9224	9.954
MVAR	RGK	42.7558	41.9165
\$/saat	YM	804.6304	803.5498

Tablo 5.17 Güvenlik kısıtlamalı optimizasyona FACTS aygıtlarının etkisi

		TCSC	TCPS	SVC
		(10-20) devre dışı		(27-30) devre dışı
V [pu]	V ₁	1.0975	1.0802	1.0975
	V ₂	1.0784	1.0603	1.077
	V ₅	1.0315	1.0292	1.0313
	V ₈	1.0401	1.034	1.0319
	V ₁₁	1.1	1.1	1.1
	V ₁₃	1.0307	1.0691	1.0219
P _G [pu]	P _{G1}	1.7699	1.7775	1.8082
	P _{G2}	0.4685	0.4803	0.4652
	P _{G5}	0.2181	0.2149	0.2093
	P _{G8}	0.2161	0.2325	0.2134
	P _{G11}	0.1222	0.1078	0.1186
	P _{G13}	0.12	0.12	0.12
t [pu]	t ₁₁	1.1	1.032	1.0227
	t ₁₂	0.9	0.9387	0.9147
	t ₁₅	0.9367	0.9844	0.9665
	t ₃₆	0.9653	0.9665	0.9713
FACTS yerleri		(15-18) hattı	(18-19) hattı	30 nolu bara
FACTS lerin kontrol değişkenleri		k _s =%70	φ=-10.5207°	Q=2.1727MVar
\$/saat	YM	803.7038	803.6563	803.642
MW	AGK	9.8898	9.8953	10.0562
MVAR	RGK	48.9998	42.6531	44.1376

Günümüzdeki özelleştirmenin getirdiği kısıtlamaları da göz önüne alabilmek amacıyla, IEEE-30 baralı test sisteminde (3-4) hattına 50MW, (12-15) hattına 15MW ve (8-28) hattına ise 10MW aktif güç kısıtlaması konuldu. Sisteme üç adet TCSC veya TCPS yerleştirildi. Hangi FACTS aygıtının yerleştirileceği, nereye yerleştirileceği ve aldığı değer sistemdeki diğer kontrol değişkenleriyle beraber GA ile belirlendi. Bulunan en uygun çözüm Tablo 5.18'de verilmiştir. Sisteme yerleştirilen TCSC ve TCPS'ler (3-4) hattındaki aktif gücü 50.13MW, (12-15) hattındaki aktif gücü 15.57MW, (8-28) hattındaki aktif gücü de 9.38MW'a çekmiştir. Bu durumda sistemin yakıt maliyeti ve kayıpları da artmıştır. Benzer şekilde, 3, 26 ve 30 nolu yük baraları gerilimlerinin 1.0pu'ya getirilmesi için sisteme üç SVC yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.19'da verilmiştir. 3 nolu baranın gerilimi 0.9987pu, 26 nolu baranın gerilimi 0.9691pu ve 30 nolu baranın gerilimi de 1.0067pu olarak bulunmuştur.

Tablo 5.18 Hat akışı kısıtlamaları altında optimizasyon

V [pu]	V ₁	1.0297		
	V ₂	1.0429		
	V ₅	1.017		
	V ₈	1.0688		
	V ₁₁	0.95		
	V ₁₃	1.1		
P _G [pu]	P _{G1}	1.6419		
	P _{G2}	0.4131		
	P _{G5}	0.15		
	P _{G8}	0.35		
	P _{G11}	0.2665		
	P _{G13}	0.1606		
t [pu]	t ₁₁	0.9157		
	t ₁₂	1.1		
	t ₁₅	0.9		
	t ₃₆	0.9735		
FACTS lerin tipi, yeri kontrol değişkeni		TCPS (24-25) φ=20°	TCSC (15-18) k _s =%60.21	TCSC (5-7) φ=2.1883
\$/saat	YM	870.9814		
MW	AGK	14.8085		
MVAR	RGK	64.7592		

Tablo 5.19 Bara gerilimlerinin kısıtlamaları altında optimizasyon

V [pu]	V ₁	1.0369		
	V ₂	1.0315		
	V ₅	1.0136		
	V ₈	0.9863		
	V ₁₁	1.0064		
	V ₁₃	1.0662		
P _G [pu]	P _{G1}	1.7987		
	P _{G2}	0.4649		
	P _{G5}	0.2212		
	P _{G8}	0.2264		
	P _{G11}	0.113		
	P _{G13}	0.12		
t [pu]	t ₁₁	0.9451		
	t ₁₂	0.9		
	t ₁₅	0.9084		
	t ₃₆	0.9249		
SVC lerin yeri kontrol değişkeni (MVar)		3 4.6842	24 0.8753	25 2.5874
\$/saat	YM	807.4779		
MW	AGK	11.016		
MVar	RGK	45.0269		

5.3.4 Maliyet optimizasyonu

Bu bölümde, (4.1) denklemindeki amaç fonksiyonu, ağırlık katsayıları $w=1$ kabul edilerek ele alınmıştır. Generatörlerin yakıt maliyetini, kayıpların getirdiği maliyeti ve FACTS maliyetlerini en aza indirmek üzere, sisteme yerleştirilecek FACTS aygıtının tipi, yeri ve değeri sistemin diğer kontrol değişkenleriyle beraber GA ile belirlenmiştir. IEEE-30 baralı test sisteminin marjinal maliyeti $h=3.96\$/MW$ olarak bulunmuştur [34]. FACTS aygıtlarının maliyetlerinin hesaplanması için $c = 26.3 \cdot 10^3 \$/MVA$ yıl, TCSC'nin tesis masrafı $5.43 \cdot 10^3 \$/MVA$ yıl, TCPS'nin tesis masrafı da $2.26 \cdot 10^3 \$/MVA$ yıl olarak [53]'den alınmıştır. Elde edilen en uygun sonuç Tablo 5.20'de verilmiştir. Sonuçta, toplam maliyeti en aza indiren FACTS aygıtı, TCSC, (14-15) hattına yerleştirilmiştir.

Tablo 5.20 Maliyet optimizasyonu sonuçları

V [pu]	V₁	1.0885
	V₂	1.0667
	V₅	1.028
	V₈	1.0315
	V₁₁	1.1
	V₁₃	1.0416
P_G [pu]	P_{G1}	1.6608
	P_{G2}	0.4852
	P_{G5}	0.2411
	P_{G8}	0.2347
	P_{G11}	0.1535
	P_{G13}	0.1445
t [pu]	t₁₁	1.0654
	t₁₂	0.9
	t₁₅	0.9963
	t₃₆	0.96
TCSC li hat		(14-15)
k_s (%)		10
MW	AGK	8.5839
MVAr	RGK	41.7765
\$/saat	C_G	803.5384
	C_L	33.9921
	C_F	0.7784
	C_T	838.3038

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çağdaş bir elektrik güç sisteminin temel işlevi, kabul edilebilir güvenilirlik ve kalitede, mümkün olduğunca ekonomik olarak tüketicilere gerekli enerjiyi sağlamaktır. Elektrik güç sistemi bu görevi yerine getirirken, aynı zamanda bir takım işletim kısıtlamaları içinde kalmak zorundadır. İşletim kısıtlamaları koşulları altında, en uygun enerji durumunu önceden belirlemek amacıyla, elektrik güç sistemleri analizi ve bu analizin içinde özellikle optimal güç akışı incelemeleri yapılmaktadır. Optimal güç akışı, amaç fonksiyonunun ekstremum değerini bulma yönünde, iletim sisteminin limitlerini de kısıtlamalara dahil ederek, sistemdeki güç dağılımını elde eder.

Optimal güç akışında göz önüne alınabilecek temel amaçlar, üretim birimlerinin yakıt maliyetinin ve/veya güç sistemindeki kayıpların azaltılması, sistem güvenliğinin artırılması, reaktif güç aygıtlarının sağlayacağı niteliklerde optimal değerlerin bulunması şeklinde olabilir. Optimal güç akışı problemi hesaplarında kullanılan pek çok eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları vardır. Bunlar, üretim ve tüketim güçleri arasındaki dengeyi belirleyen eşitlikler, generatörlerin aktif ve reaktif güç üretimleri üzerindeki kısıtlamalar, generatör ve yük baralarının gerilimlerindeki kısıtlamalar, iletim hatları ile transformatörler için güç akışı sınırları ve diğer kontrol değişkenlerinin sınırlarıdır. Bunlara ayrıca, sistemdeki hat, transformatör ya da generatörlerin bir veya birkaçının devreden çıkması gibi, göz önüne alınması gereken işletim kısıtlamaları da eklenebilir.

Elektrik enerjisine karşı artan talep, sistemin kapasitelerini kararlılık sınırlarına yaklaşan düzeylere kadar yükselterek , üretim birimlerinin optimal güç dağılımına daha fazla kısıtlama getirerek, maliyeti arttırmaktadır. Bunun için var olan güç sistemlerinin kontrol edilebilirliği ile iletim kapasitelerini artırma gereksinimi doğmuştur. Bunu sağlayacak çözüm, FACTS kavramı ile önerilmiştir.

Bu çalışmada optimal güç akışı incelemesi, FACTS aygıtlarının tipi, yeri ve kontrol değişkenleri de dahil edilerek yapılmıştır. Bu inceleme için genetik algoritma

kullanılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıda verilen maddeler ışığında yeni bir modellemeye gidilmiş ve geniş bir uygulama yapılmıştır.

- Genetik algoritmada genelde kullanılan ikili kodlama yerine çalışmada, gerçel sayılarla kodlama yapılmıştır. Bu kodlamaya uygun olarak operatörlerde yeni bir düzenleme gerçekleştirilmiştir. Böylelikle uygun parametre ve operatör seçimi sağlanarak genetik algoritmanın çalışması iyileştirilmiştir. Bu iyileştirilmiş algoritmanın, gerçekleştirilen güç sistemleri uygulamasında Goldberg'in basit genetik algoritmasından hem hız hem de sonuç bakımından daha üstün olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.13). Genetik algoritmada sağlanan uygun parametre ve operatör seçimiyle generatörlerin yakıt maliyeti optimizasyonu yapılmıştır. Uygun operatör ve parametre değerleri üç farklı yakıt maliyeti denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, daha önce klasik çözümlerle varılmış olanlarla karşılaştırılmış ve sonuçların daha iyi olduğu gözlenmiştir.
- Klasik optimizasyon çalışmalarında generatör yakıt maliyeti denklemlerinde yaklaşıklık varsayımlarına genellikle çok yer verilmiştir. Bu çalışmada gerçeğe daha uygun modeller kullanılmıştır.
- Yapılan çalışmalardan farklı olarak çeşitli amaç fonksiyonları ele alınmıştır. Generatör yakıt maliyetleri ve kayıplar ayrı ayrı göz önüne alındıktan sonra, FACTS'lerin maliyeti ve aktif güç kayıp maliyeti de eklenerek genel bir maliyet optimizasyonu yapılmış ve sonuçta maliyeti azaltan en uygun FACTS aygıtı TCSC olarak bulunmuştur.
- Sürekli durumda, sistemin normal çalışma koşullarında FACTS 'lerin üretim maliyeti ve kayıpları üzerindeki etkileri incelenerek, TCSC, TCPS ve SVC'nin normal çalışma koşullarında yakıt maliyetini fazla etkilemediği görülmüştür. TCSC'nin reaktif güç kayıplarını azalttığı, TCPS'nin de aktif güç kayıpları üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada, bu amaçlar doğrultusunda sisteme yerleştirilecek FACTS aygıtlarının sayısının da önemli olduğu da gösterilmiştir.
- Güvenlik indisleri hesaplanarak sistem için aktif güç akışları ve bara gerilimleri açısından en kötü durumu veren hat çıkması için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Aktif güçler için sisteme TCPS ve TCSC yerleştirilmiş ve bu

aygıtların yakıt maliyetini arttırdığı görülmüştür. Bara gerilimler açısından en kötü durumu veren hat çıkması durumunda sisteme SVC yerleştirilmiş ve aygıtın, bara gerilimlerini sınırlar içine çektiği görülmüştür.

- İletim hatlarındaki aktif güçlere, özelleştirmede etkili olan sınırlar konulmuştur. Bu sınırlara ulaşmak için sisteme TCSC ve TCPS yerleştirilmiştir. Yakıt maliyeti oldukça artsa da, aktif gücün istenilen koridorlardan, istenilen miktarda geçmesi sağlanmıştır. Benzer şekilde bara gerilimlerine sınırlar konularak, sisteme yerleştirilen SVC'lerin gerilimleri istenilen sınırlara çektiği görülmüştür. Burada FACTS aygıtlarının yerlerinin ilk başta düşünüldüğü gibi, kontrol edilmek istenilen hat veya baralar olarak çıkmadığı da izlenmiştir.

Tartışma

Çalışmada sadece termik santraller ele alınmıştır. Hidrotermal santraller de ele alınarak, gerçek sistem uygulamaları yapılabilir. FACTS aygıtlarının modellenmesinde daha önceki çalışmalarda yapılan birtakım varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlar koşullara bağlı olarak daha da azaltılabilir. Bu çalışmada tristör kontrollü FACTS aygıtları üzerinde durulmuştur ancak, kontrol olanakları daha fazla olan yeni nesil FACTS aygıtlarının modellemesi üzerine gidilebilir. Güç sisteminin yeni yapılanmasının getirdiği amaç ve kısıtlamalar probleme eklenebilir. Ayrıca genetik algoritmayı iyileştirmek için yapılanlara rağmen parametre ve operatör ayarları zaman almıştır. Algoritma bu ayarları kendinden yapacak şekilde (self-adaptive) geliştirilerek, bu uygulama daha büyük ve gerçek bir güç sistemi üzerinde gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Wood, A.J. and Wollenberg, B.F.**, 1996. Power Generation Operation and Control, 2nd.Edition, John Wiley and Sons, New York.
- [2] **Arrillaga J. and Arnold C.P.**, 1990. Computer Analysis of Power Systems, John Wiley and Sons, Chichester.
- [3] **Dommel, H.W. and Tinney, W.F.**, 1968. Optimal Power Flow Solutions, *IEEE Transactions*, PAS-87, 1866-1876.
- [4] **Alsac, O., and Stott, B.**, 1974, Optimal Load flow with Steady State Security, *IEEE Transactions*, PAS-93, 745-751.
- [5] **Momoh, J.A., El-Hawary, M.E. and Adapa, R.**, February 1999, A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part I: Nonlinear and Quadratic programming Approaches, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No.1, 96-104.
- [6] **Momoh, J.A., El-Hawary, M.E. and Adapa, R.**, February 1999, A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part II: Newton, Linear Programming and Interior point Methods, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No.1, 105-111.
- [7] **Hingorani, N.G.**, April 1993. Flexible AC Transmission, *IEEE Spectrum*, 40-45.
- [8] **Song, Y.H. and Johns, A.T.**, 1999. Flexible AC Transmission Systems (FACTS), IEE Power and Energy Series, England.
- [9] **Hingorani, N.G., Gyugi L.**, 1999. Understanding FACTS, IEEE PRESS, New York.

- [10] **Noroozian, M. and Andersson G.**, July 1993. Power Flow Control by Use of Controllable Series Components, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.8, No.3, 1420-1429.
- [11] **Gotham, D.J. and Heydt, G.T.**, February 1998. Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.13, No.1, 60-65
- [12] **Tjing, T. L. and Wanhong, Deng**, 1997, Optimal Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices allocation, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol 19, No 2, 125-134
- [13] **Ge, S.Y. and Chung, T.S.**, May 1999, Optimal Active Power Flow Incorporating Power Flow Control Needs in Flexible AC Transmission Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No.2, 738-744
- [14] **Fuerte-Esquivel, C.R. and Acha, E.**, November 1997. A Newton -type algorithm for the control of power flow in electrical power networks, *IEEE Transactions on Power System*, Vol.12. No.4, 1474-1480.
- [15] **Miranda, V., Srinivasan D. and Proença, L.M.**, 1998, Evolutionary Computation in Power Systems, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 20, No 2, 89-98.
- [16] **Fogel, D.B.**, February 2000, What is evolutionary Computation, *IEEE Spectrum*, 26-32.
- [17] **Golberg, D.E.**, 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Reading, MA: Addison Wesley.
- [18] **Michalewicz, Z.**, 1992, Genetic Algorithm+Data Structures=Evolution Programs, Springer Verlag, New York.
- [19] **Fogel, D.B.**, January 1994, Guest Editorial: Evolutionary Computation , *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No 1, 3-14.

- [20] **Walter, D.C. and Scheble, G.B.**, August 1993. Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve point Loading, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No.3, 1325-1332.
- [21] **Bakirtzis, A., Petridis, V. and Kazarlis, S.**, July 1994. Genetic algorithm solution to the economic dispatch problem, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol 141, No 4, 377-382.
- [22] **Wong, K.P. and Wong, Y.W.**, September 1994. Genetic and genetic/simulated-annealing approaches to economic dispatch, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol 141, No 5, 507-513
- [23] **Orero, S.O. and Irving, M.R.**, November 1996, Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol 143, No 6, 529-534.
- [24] **Wen, F. and Han Z.**, 1995. Fault section estimation in power systems using a genetic algorithm, *Electric Power System Research*, 34, 165-172.
- [25] **Orero, S.O. and Irving M.R.**, May 1998. A Genetic Algorithm Modelling Framework and Solution Technique for Short Term Optimal Hydrothermal Scheduling, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No.2, 501-518.
- [26] **Iba, K.**, May 1994. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No.2, 685-692.
- [27] **Lee, K.Y., Bai, X. and Park, Y.M.**, November 1995, Optimization method for Reactive Power planning by using a modified simple genetic algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 10, No.4, 1843-1850.
- [28] **Lee, K.Y. and Yang, F.F.**, February 1998, Optimal Reactive Power Planning Using Evolutionary Algorithms: A Comparative Study for Evolutionary Programming, Evolutionary Strategy, Genetic Algorithm and Linear Programming, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No.1, 101-108.

- [29] **Paterni, P., Vitet, S., Bena, M. and Yokoyama, A.**, February 1999, Optimal Location of Phase Shifters in the French Network by Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No.1, 37-42.
- [30] **Ramirez-Rosado, I.J., Bernal-Agustin J.L.**, May 1998, Genetic Algorithms Applied to the Design of Large Power Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No.2, 696-703.
- [31] **Su, C.T. and Lii, G.R.**, 1999. Reliability Planning for Composite Electric Power Systems, *Electric Power System Research*, 51, 23-31.
- [32] **Levitin, G. and Lisnianski, A.**, 1999. Optimal Multistage Modernization of Power System Subject to Reliability and Capacity Requirements, *Electric Power System Research*, 50, 183-190.
- [33] **Eiben, A.E., Hinterding, R. and Michalewicz, Z.**, 1999. Parameter Control in Evolutionary Algorithms, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 3, No.2, 124-141.
- [34] **Saadat Hadi**, 1999. Power System Analysis, Mc Graw Hill.
- [35] **Grainger John, Stevenson William D.**, 1994. Power System Analysis, Mc Graw Hill
- [36] **El-Hawary M.E, Christensen G.S.**, 1979. Optimal Economic Operation of Electric Power Systems, Academic Press
- [37] **Song, Y.H.**, 1999. Modern Optimization Techniques in Power Systems, Kluwer Academic Publishers.
- [38] **Momoh J.A, Guo S.X., Ogbuobiri E.C., Adapa R.**, 1997. The Quadratic Interior Method Solving Power System Optimization Problems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No.3, 1327-1336.
- [39] **Momoh J.A, Koessler R.J., Bond M.S., Stott B., Sun D., Papalexopoulos A., Ristanovic P.**, 1997. Challenges to Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No.1, 444-447.

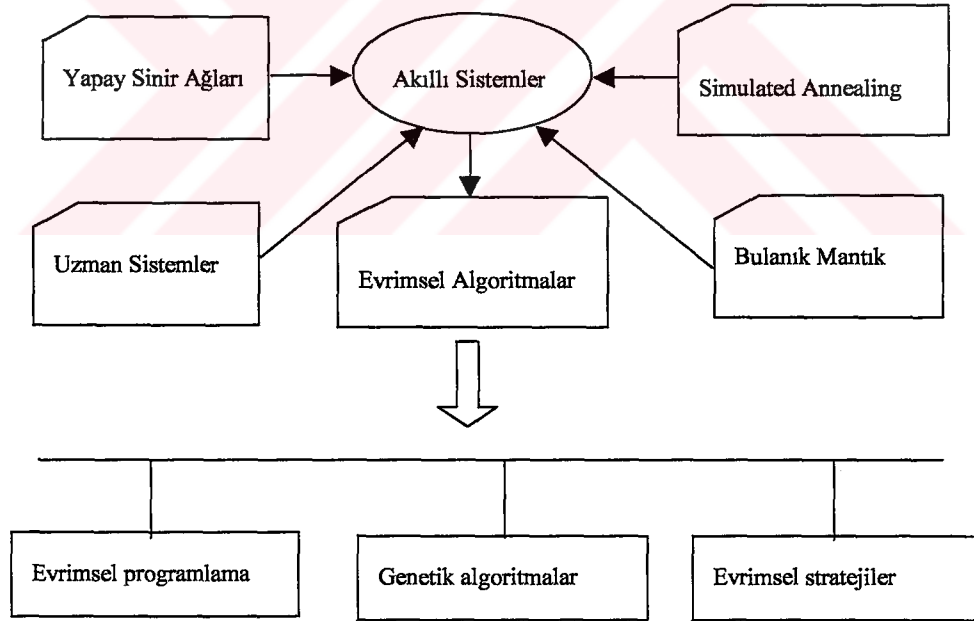
- [40] **Yalçınöz, T., Short M.J., Cory B.J.,** 1999. Security Dispatch Using Hoppefield Neural Network, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol 146, No 5, 465-470.
- [41] **Aggarwal, R.K., Song Y.H.,** 1997. Artificial Neural Networks in Power Systems, Part 1 General Introduction to Neural Computing, 1997. *IEE Power Engineering Journal*, Vol.11, No.5, 219-222.
- [42] **Song Y.H., Wang G.S., Wang P.Y., Johns A.T.,** 1997. Environmental/economic dispatch using fuzzy controlled genetic algorithms, *Proc IEE - GTD, Pt.C.*, Vol.144, No.4, 377-384.
- [43] **Chen L., Suzuki H., Katou K.,** 1997. Mean field theory for optimal power flow, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.12, 1481-1486.
- [44] **Chen L., Matoba S., Inabe H., Okabe T.,** 1998. Surrogate constraint method for optimal power flow, *IEEE Trans. Power Syst.* vol.13, 1084-1089.
- [45] **Bağrıyanık, F.G.,** 2000. Enerji iletim sistemlerinde 3-faz-6-faz dönüştürmelerinin iletim kapasitelerine etkilerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [46] **Edris,A.,** March 2000. Facts Technology Development: An Uptade, *IEEE Power Engineering Review*, Vol 20, No.3, 4-9.
- [47] **Taranto,G.N., Pinto,L.M.V.G. and Pereira, M.V.F,** 1992. Representation of FACTS devices in power system economic dispatch, *IEEE Transaction on Power System*, Vol.7, No.2.
- [48] **Preedawichit, P. and Srivastava, S.C.,** 1998. Optimal Reactive Power Dispatch Considering FACTS Devices, *Electric Power System Research*,46, 251-257.
- [49] **Chung, T.S. and Li, Y.Z.,** August 2000. A Hybrid GA Approach for OPF with Consideration of FACTS devices, *IEEE Power Engineering Review*, 54-57.

- [50] **IEEE Special Stability Controls Working Group** , February 1994. Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation, *IEEE Transaction on Power System*, Vol.9, No.1. 229-240.
- [51] **Oliveira, E.J., Manangon Lima, J.W., and Pereira J.L.R.**, 1999. Flexible AC Transmission system devices: allocation and transmission pricing, *Electrical Power and Energy Systems*, 21, 111-118.
- [52] **Oliveira, E.J., Manangon Lima, J.W., Almedia de K.C.**, 2000. Allocation of FACTS Devices in Hydrothermal Systems, *IEEE Transaction on Power System*, Vol.15, No.1, 276-282.
- [53] **Zhu, Jizhong, Momoh, A. James**, 1997. Security Constrained Power Dispatch Using Nonlinear Convex Network Flow Programming, *Proceedings of NAPS*, University of Wisconsin, 259-264.
- [54] **Michalewicz, Z.**, 1995. Genetic Algorithms, Numerical Optimization and Constraints, *Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms*, Pittsburgh, 151-158.
- [55] **Michalewicz, Z.**, 1996. The Significance of the Evaluation Function in Evolutionary Algorithms, *Proceedings of the Workshop on Evolutionary Algorithms*, Minnesota, 151-166.
- [56] **Sebald, A.V., Michalewicz, Z., Logan T.D. and Swarnalatha, S.**, 1994. Evolutionary Operators for Continuous Convex Parameter Spaces, *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming*, 84-97.
- [57] **GAOT, H.R., Joines, C.A. and Michel ,J.G.** , A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation, North Caroline State University.
- [58] **Zimmerman, R. and Oan, D.**, MATPOWER, PSERC,Cornell University, [http:// www.pserc.cornell.edu/matpower](http://www.pserc.cornell.edu/matpower)

EK A GENETİK ALGORİTMALAR

Evrim, her canlı organizmayı tarihsel olay zinciri içerisinde birbirine bağlayan biyolojik bir kavramdır. Bu zincir içinde her canlı, çevrenin etkisiyle rastlantısal olaylar sonucu seçilmiş bir üründür. Zaman içinde bir çok nesilden sonra, rastlantısal değişimler ve doğal seçicilik, bireylerin davranışlarını şekillendirir ve türlerin çevre koşullarına uymasına yardım eder. Bu uyum, olağandışı ve zorlayıcı olabilir; bu da evrimin yaratıcı olduğunu gösterir.

Evrim, geçerli fizik yasalarının topluluklar ve türler üzerindeki etkisini de yansıttığı için bireylerin var olma problemlerine akılcı mühendislik çözümleri getirebilir. Bu nedenle klasik algoritmaların çözüm üretmede yetersiz kalabildiği kaotik bozucu etkiler, rastlantısallık ve lineer olmayan kompleks dinamik içeren karmaşık mühendislik problemlerine bir çözüm sağlayabilir. Evrimsel hesaplama algoritmaları, evrim teorisine dayalı olarak bilgisayar desteğinde çeşitli problemlerin çözümü için kullanılan algoritmalarlardır. Bu algoritmalar içinde, genetik algoritmalar, evrimsel programlama, ve evrimsel stratejiler başlıca araştırma alanlarını teşkil eder.



Şekil A.1 Akıllı sistemlerin sınıflandırılması

Evrimsel algoritmaların, diğer akıllı sistemler içinde aldığı yer ve genetik algoritmaların yeri Şekil A.1’de verilmiştir.

İlk olarak 1960’lı yıllarda John Holland tarafında geliştirilen ve daha sonra bir çok araştırmacı tarafından çeşitli alanlarda uygulamaları gerçekleştirilen evrimsel

algoritmalar içinde yer alan genetik algoritmalar, doğal seçim ve üreme kavramlarına dayalı olarak, daha iyi çözümlere elde etmek için kullanılan arama algoritmalarıdır.

Genetik algoritmalar, doğal evrim teorisinden esinlenen stokastik optimizasyon yöntemidir. Genelde, genetik algoritma, çözüm uzayı içindeki rastlantısal olarak üretilen başlangıç çözüm kümesiyle başlar. Rastlantısal olarak oluşturulan bu çözüm kümesi topluluk adını alır. Topluluktaki her çözüm, optimizasyon probleminin olası bir çözümüdür ve “kromozom” olarak adlandırılır.

A.1 Genetik Algoritmaların Temel Terminolojisi

Genetik algoritmaların temelleri biyolojiye ve modern bilgisayar teknolojisine dayanmaktadır. Bu yüzden kullanılan terimler, hem doğal hem de yapay zekadan etkilenmektedir.

Tablo A1. Genetik algoritmalarda kullanılan terimler

GA Terimleri	İlgili Optimizasyon Tanımları
Kromozom (Chromosome)	Çözüm kümesi
Gen (Gene)	Çözümün bir kısmı
Alleles	Gen değeri
Fenotip (Phenotype)	Kodlanan çözüm
Genotip (Genotype)	Kodlanmış çözümden eski haline dönüştürülen çözüm
Locus	Genin konumu

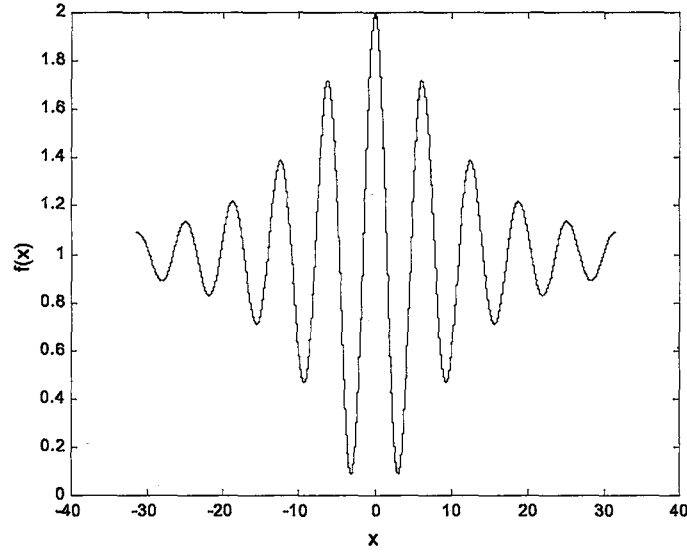
Biyolojik organizmalarda, kromozom, organizmanın yapısını oluşturan temel bilgileri taşır. Kromozomların hepsine ya da bir grubuna fenotip adı verilir. Her kromozomda gen adı verilen bireysel yapılar, organizmanın özel kodlanmış yapılarıdır. Genetik algoritmaların kullandığı bu terimler ve bunların klasik optimizasyon problemi karşılıkları Tablo A.1’de özet şeklinde verilmiştir.

A.2 Basit Genetik Algoritma

Basit genetik algoritmanın çalışması, bir örnek üzerinde gösterilecektir. (A.1) denkleminde verilen fonksiyonun maksimumu bulunacaktır ve bu geleneksel optimizasyon yöntemleriyle zordur.

$$f(x) = 1 + \frac{\cos(x)}{(1 + x^2 / 100)} \quad (A.1)$$

Şekil A.2’de gösterilen fonksiyonun global maksimumu $x=0$ ’dır. Fonksiyon birçok yerel maksimuma sahiptir.



Şekil A.2 Genetik algoritma ile maksimumu bulunacak örnek fonksiyon

Global maksimumun bulunması için kullanılan genetik algoritma adım adım verilmiştir.

1. *Koromozom gösterimi:* İkili kodlama kullanılarak, her kromozom on-bit uzunluğunda katarlar olarak kodlandı. Fenotip değerler, -40 ve 40 arasında ölçeklendirildi. Sonuçta $[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ kromozomu -40 değerine, benzer şekilde $[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1]$ kromozomu da 40 değerine karşılık geldi. Sonuçta $2^{10}=1024$ nokta, $\langle -40,40 \rangle$ aralığını modellemek üzere kullanılmıştır.
2. *Başlangıç topluluğunun oluşturulması:* On bireyden oluşan raslantısal bir topluluk $\langle -40,40 \rangle$ aralığında oluşturulur.
3. *Uygunluk fonksiyonu:* Optimize edilecek büyüklüğe bağlı olarak, her kromozoma bir uygunluk değeri atanır. Sonuçta, topluluktaki her birey, evrim sürecinde kaderini belirleyecek bir uygunluk değerine sahip olur. Şekil A.2’nin global maksimumunu bulmak için kullanılacak uygunluk değerler, A.1 denklemiyle verilen fonksiyonun kendisiyle hesaplanır.
4. *Ebeveyn Seçimi:* Üreme için ebeveynler seçilir. Rulet tekerleği yönteminde, bireyler en düşükten en büyük değerlerine kadar sıralanır. İki ebeveyn, uygunluk fonksiyonu değerleriyle doğru orantılı olarak seçilir.
5. *Üreme:* Ebeveynlere çaprazlama ve mutasyon uygulanır. Tek noktalı çaprazlama için, iki çift kromozom, örneğin, $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]$ ve $[1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0]$ seçilir. Yazı tura atılarak çaprazlama işlemine devam edilip edilmeyeceğine karar verilir. Eğer bu işlem başarılıysa, raslantısal olarak bir çaprazlama noktası seçilir. Çaprazlama noktasından kesilerek, iki yeni birey oluşturulur. Örneğin, yukarıdaki kromozomlar için çaprazlama noktası 4. ve

5. bit arasında seçilirse, çocuklar, [1 0 1 1 0 1 0 1 1 0] ve [1 1 1 1 0 0 0 1 0 1] şeklini alır. Eğer çaprazlama yapılmayacaksa, ebeveynler bir sonraki nesile değişmeden aktarılır. Mutasyon ise küçük bir olasılıkla bit bazında uygulanır. Raslantısal olarak seçilen bir bit 0 ya da 1'e dönüştürülür.

6. *Yeni toplulukların oluşturulması*: Burada en basit yöntem, çocukların, üreme sonucunda oluşturularak, yeni nesilde ebeveynlerin yerini almasıdır. Arada nesillerde bulunan en iyi değerler saklanarak, işlem sırasında kaybolması önlenir. Bu işleme elitizm denir.

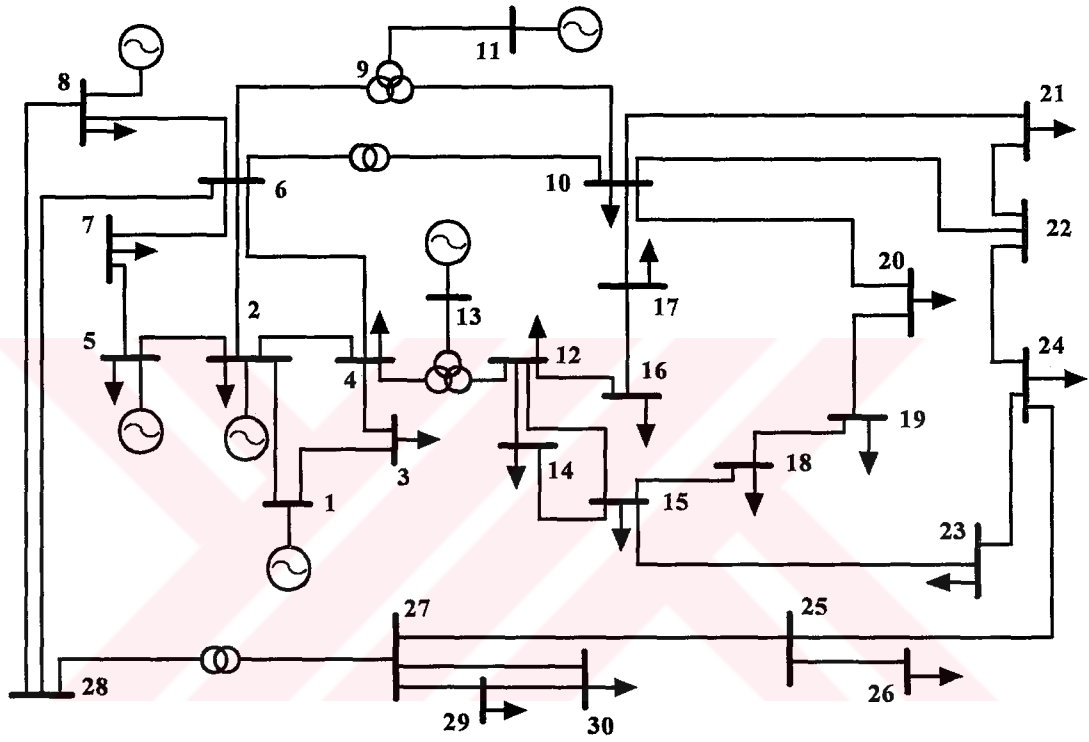
7. Yakınsama kriteri sağlanana kadar 3.adıma git.

Yukarıdaki örnek için, basit genetik algoritma 0.75 çaprazlama olasılığı, 0.008 mutasyon olasılığı ile 100 adaydan oluşan bir başlangıç topluluğu ile kullanılmıştır. Beş nesil sonra elde edilen $y=1.87132$, global maksimumun olduğu $y=2.0$ 'a çok yakındır.



EK B ÖRNEK SİSTEM VERİLERİ

Sayısal uygulamalar, IEEE-30 baralı test sistemi için gerçekleştirilmiştir.



Şekil B.1 IEEE-30 baralı test sistemi

Tablo B.1 Bara verileri

Bara No	Yük		Bara Gerilim Sınırları	
	MW	MVAR	Vmax [pu]	Vmin [pu]
1	0.00	0.00	1.10	0.95
2	21.70	12.70	1.10	0.95
3	2.40	1.20	1.05	0.95
4	7.60	1.60	1.05	0.95
5	94.20	19.00	1.10	0.95
6	0.00	0.00	1.05	0.95
7	22.80	10.90	1.05	0.95
8	30.00	30.00	1.10	0.95
9	0.00	0.00	1.05	0.95
10	5.80	2.00	1.05	0.95
11	0.00	0.00	1.10	0.95
12	11.20	7.50	1.05	0.95
13	0.00	0.00	1.10	0.95
14	6.20	1.60	1.05	0.95
15	8.20	2.50	1.05	0.95
16	3.50	1.80	1.05	0.95
17	9.00	5.80	1.05	0.95
18	3.20	0.90	1.05	0.95
19	9.50	3.40	1.05	0.95
20	2.20	0.70	1.05	0.95
21	17.50	11.20	1.05	0.95
22	0.00	0.00	1.05	0.95
23	3.20	1.60	1.05	0.95
24	8.70	6.70	1.05	0.95
25	0.00	0.00	1.05	0.95
26	3.50	2.30	1.05	0.95
27	0.00	0.00	1.05	0.95
28	0.00	0.00	1.05	0.95
29	2.40	0.90	1.05	0.95
30	10.60	1.90	1.05	0.95

Toplam Yük = 283.4 MW , 126.2 MVAR

Tablo B.2 Generatör verileri

Bara No	$P_G^{\max}$	$P_G^{\max}$	$Q_G^{\max}$	$Q_G^{\min}$
	MW	MW	MVAR	MVAR
1	200.0	50.0	200.0	-20.0
2	80.0	20.0	100.0	-20.0
5	50.0	15.0	80.0	-15.0
8	35.0	10.0	60.0	-15.0
11	30.0	10.0	50.0	-10.0
13	40.0	12.0	60.0	-15.0

Tablo B.3 Dal verileri

Dal No	Bara – Bara	R [pu]	X [pu]	B (toplam) [pu]	Isl Sınır MVA
1	1 – 2	0.0192	0.0575	0.0264	130.0
2	1 – 3	0.0452	0.1852	0.0204	130.0
3	2 – 4	0.0570	0.1737	0.0184	65.0
4	3 – 4	0.0132	0.0379	0.0042	130.0
5	2 – 5	0.0472	0.1983	0.0209	130.0
6	2 – 6	0.0581	0.1763	0.0187	65.0
7	4 – 6	0.0119	0.0414	0.0450	90.0
8	5 – 7	0.0460	0.1160	0.0102	70.0
9	6 – 7	0.0267	0.0820	0.0085	130.0
10	6 – 8	0.0120	0.0420	0.0045	33.0
11	6 – 9	0.0000	0.2080	0.0000	65.0
12	6 – 10	0.0000	0.5560	0.0000	32.0
13	9 – 11	0.0000	0.2080	0.0000	65.0
14	9 – 10	0.0000	0.1100	0.0000	65.0
15	4 – 12	0.0000	0.2560	0.0000	65.0
16	12 – 13	0.0000	0.1400	0.0000	65.0
17	12 – 14	0.1231	0.2559	0.0000	32.0
18	12 – 15	0.0662	0.1304	0.0000	32.0
19	12 – 16	0.0945	0.1987	0.0000	32.0
20	14 – 15	0.2210	0.1997	0.0000	16.0
21	16 – 17	0.0524	0.1923	0.0000	16.0
22	15 – 18	0.1073	0.2185	0.0000	16.0
23	18 – 19	0.0639	0.1292	0.0000	16.0
24	19 – 20	0.0340	0.0680	0.0000	32.0
25	10 – 20	0.0936	0.2090	0.0000	32.0
26	10 – 17	0.0324	0.0845	0.0000	32.0
27	10 – 21	0.0348	0.0749	0.0000	32.0
28	10 – 22	0.0727	0.1499	0.0000	32.0
29	21 – 22	0.0116	0.0236	0.0000	32.0
30	15 – 23	0.1000	0.2020	0.0000	16.0
31	22 – 24	0.1150	0.1790	0.0000	16.0
32	23 – 24	0.1320	0.2700	0.0000	16.0
33	24 – 25	0.1885	0.3292	0.0000	16.0
34	25 – 26	0.2544	0.3800	0.0000	16.0
35	25 – 27	0.1093	0.2087	0.0000	16.0
36	28 – 27	0.0000	0.3960	0.0000	65.0
37	27 – 29	0.2198	0.4153	0.0000	16.0
38	27 – 30	0.3202	0.6027	0.0000	16.0
39	29 – 30	0.2399	0.4533	0.0000	16.0
40	8 – 28	0.0636	0.2000	0.0214	32.0
41	6 – 28	0.0169	0.0599	0.0065	32.0
42	10 – 10	0.0000	-5.2600		
43	24 – 24	0.0000	-25.0000		

Temel Güç = 100 MVA

Tablo B.4 Generatör Yakıt Maliyeti Katsayıları (Durum 1)

Bara No	a	B	c
1	0.0	2.00	0.00375
2	0.0	1.75	0.01750
5	0.0	1.00	0.06250
8	0.0	3.25	0.00834
11	0.0	3.00	0.02500
13	0.0	3.00	0.02500

$$C_G = a + bP_G + cP_G^2 \quad [\$ / \text{saat}]$$

Tablo B.5 Generatör Yakıt Maliyeti Katsayıları (Durum 3)

Bara No	a	b	c	d	e
1	150	2.0	0.016	50	0.063
2	25	2.5	0.010	40	0.098
5	0.0	1.00	.06250	0.0	0.0
8	0.0	3.25	.00834	0.0	0.0
11	0.0	3.00	.02500	0.0	0.0
13	0.0	3.00	.02500	0.0	0.0

$$C_G = a + bP_G + cP_G^2 + |d \sin(e(P_G^{\min} - P_G))| \quad [\$ / \text{saat}]$$

Tablo B.6 Generatör Yakıt Maliyeti Katsayıları (Durum 2)

Bara No	Üretim					F	Maliyet Katsayıları		
	Min	P1	P2	Max					
	F1	F2	F3		a		B	c	
1	50	100	190	200	1	0.000	1.900	0.00355	
	1	2	3		2	0.000	2.000	0.00375	
					3	0.000	2.200	0.00415	
2	20	35	50	80	1	0.000	1.700	0.01700	
	1	2	3		2	0.000	1.750	0.01750	
					3	0.000	2.050	0.02350	
5	15	30	50		1	0.000	1.000	0.06250	
	1	2			2	0.000	1.200	0.08250	
8	10	25	35		1	0.000	3.250	0.00834	
	1	2			2	0.000	3.650	0.01234	
11	10	20	30		1	0.000	3.000	0.02500	
	1	2			2	0.000	3.300	0.03500	
13	12	25	40		1	0.000	3.000	0.02500	
	1	2			2	0.000	3.300	0.03500	

EK C OPTİMİZASYON SONUÇLARI

Tablo C.1.a Yakıt maliyeti ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0777	0	176.5699	-3.3604	-	-
2	1.062	-3.4554	49.8193	34.8269	21.7	12.7
3	1.0481	-5.3928	-	-	2.4	1.2
4	1.0412	-6.4845	-	-	7.6	1.6
5	1.0275	-9.9274	21.4543	26.9133	94.2	19
6	1.032	-7.5261	-	-	-	-
7	1.0221	-9.0131	-	-	22.8	10.9
8	1.0314	-7.761	22.5014	31.4231	30	30
9	1.049	-9.8237	-	-	-	-
10	1.0146	-11.7163	-	-	5.8	2
11	1.1	-8.7483	10.413	27.0473	-	-
12	1.0211	-10.9631	-	-	11.2	7.5
13	1.0641	-10.0772	12	32.7378	-	-
14	1.006	-11.9012	-	-	6.2	1.6
15	1.0016	-11.9867	-	-	8.2	2.5
16	1.0105	-11.5749	-	-	3.5	1.8
17	1.0081	-11.8978	-	-	9	5.8
18	0.9936	-12.6347	-	-	3.2	0.9
19	0.9921	-12.8144	-	-	9.5	3.4
20	0.9969	-12.6014	-	-	2.2	0.7
21	1.0005	-12.1764	-	-	17.5	11.2
22	1.0007	-12.1573	-	-	-	-
23	0.9901	-12.3497	-	-	3.2	1.6
24	0.9834	-12.4629	-	-	8.7	6.7
25	0.9837	-12.2667	-	-	-	-
26	0.9654	-12.7162	-	-	3.5	2.3
27	1.0035	-11.8721	-	-	-	-
28	1.0272	-7.982	-	-	-	-
29	0.9833	-13.1519	-	-	2.4	0.9
30	0.9715	-14.0717	-	-	10.6	1.9
Toplam			292.76	149.59	283.4	126.2

Tablo C.1.b Yakıt maliyeti ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında hat sonuçları

Baradan	Baraya	Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
		P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	117.87	-7.81	-115.57	11.69	2.303	6.9
1	3	58.7	4.45	-57.34	-1.21	1.353	5.54
2	4	34.4	1.26	-33.79	-1.47	0.601	1.83
3	4	54.94	0.01	-54.58	0.57	0.363	1.04
2	5	63.65	5.65	-61.94	-0.73	1.715	7.21
2	6	45.64	3.52	-44.56	-2.29	1.084	3.29
4	6	49.85	9	-49.56	-8.5	0.282	0.98
5	7	-10.81	8.64	10.89	-9.49	0.088	0.22
6	7	33.99	1.4	-33.69	-1.41	0.29	0.89
6	8	9.99	-1.61	-9.98	1.18	0.011	0.04
6	9	21.54	8.8	-21.54	-7.81	0	0.99
6	10	13.38	-1.5	-13.38	2.5	0	1
9	11	-10.41	-25.6	10.41	27.05	0	1.44
9	10	31.95	33.41	-31.95	-31.28	0	2.14
4	12	30.93	-9.7	-30.93	12.43	0	2.73
12	13	-12	-31.23	12	32.74	0	1.5
12	14	7.72	2.38	-7.64	-2.22	0.077	0.16
12	15	17.37	6.61	-17.15	-6.18	0.219	0.43
12	16	6.64	2.31	-6.6	-2.22	0.045	0.09
14	15	1.44	0.62	-1.44	-0.62	0.005	0
16	17	3.1	0.42	-3.09	-0.4	0.005	0.02
15	18	5.61	0.94	-5.58	-0.87	0.035	0.07
18	19	2.38	-0.03	-2.37	0.04	0.004	0.01
19	20	-7.13	-3.44	7.15	3.48	0.022	0.04
10	20	9.45	4.4	-9.35	-4.18	0.099	0.22
10	17	5.93	5.45	-5.91	-5.4	0.02	0.05
10	21	16.24	11.53	-16.11	-11.24	0.134	0.29
10	22	7.92	5.59	-7.86	-5.45	0.066	0.14
21	22	-1.39	0.04	1.39	-0.04	0	0
15	23	4.77	3.35	-4.74	-3.28	0.034	0.07
22	24	6.46	5.49	-6.38	-5.36	0.083	0.13
23	24	1.54	1.68	-1.53	-1.67	0.007	0.01
24	25	-0.79	0.37	0.79	-0.37	0.001	0
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-4.34	-2	4.37	2.05	0.025	0.05
28	27	17.66	6.75	-17.66	-5.4	0	1.34
27	29	6.2	1.68	-6.11	-1.51	0.09	0.17
27	30	7.1	1.68	-6.93	-1.36	0.169	0.32
29	30	3.71	0.61	-3.67	-0.54	0.035	0.07
8	28	2.48	0.25	-2.48	-2.5	0.005	0.02
6	28	15.22	3.7	-15.18	-4.25	0.039	0.14
					Toplam	9.358	41.6622

Tablo C.2.a Yakıt maliyeti parçalı ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0866	0	177.8817	6.0699	-	-
2	1.0679	-3.3933	49.2001	33.3903	21.7	12.7
3	1.0501	-5.2473	-	-	2.4	1.2
4	1.0418	-6.3086	-	-	7.6	1.6
5	1.0319	-9.8455	20.1463	25.3889	94.2	19
6	1.0383	-7.4238	-	-	-	-
7	1.0277	-8.9143	-	-	22.8	10.9
8	1.0406	-7.7243	21.2723	39.7675	30	30
9	1.031	-9.5935	-	-	-	-
10	1.0168	-11.4508	-	-	5.8	2
11	1.1	-8.3011	12.2975	36.6427	-	-
12	1.0223	-10.6101	-	-	11.2	7.5
13	1.0346	-9.6999	12	9.2141	-	-
14	1.0072	-11.5563	-	-	6.2	1.6
15	1.0029	-11.6541	-	-	8.2	2.5
16	1.0121	-11.2609	-	-	3.5	1.8
17	1.0102	-11.6155	-	-	9	5.8
18	0.9952	-12.3233	-	-	3.2	0.9
19	0.994	-12.5163	-	-	9.5	3.4
20	0.9989	-12.3114	-	-	2.2	0.7
21	1.0026	-11.9082	-	-	17.5	11.2
22	1.0027	-11.8888	-	-	-	-
23	0.9913	-12.0392	-	-	3.2	1.6
24	0.9846	-12.1835	-	-	8.7	6.7
25	0.9833	-12.0136	-	-	-	-
26	0.965	-12.4633	-	-	3.5	2.3
27	1.0123	-11.6437	-	-	-	-
28	1.0344	-7.8836	-	-	-	-
29	0.9923	-12.9008	-	-	2.4	0.9
30	0.9807	-13.8038	-	-	10.6	1.9
Toplam			292.8	150.47	283.4	126.2

Tablo C.2.b Yakıt maliyeti parçalı ikinci dereceden bir fonksiyon alındığında hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	119.16	-2.44	-116.85	6.29	2.309	6.92
1	3	58.72	8.51	-57.36	-5.29	1.356	5.56
2	4	34.42	4.57	-33.81	-4.76	0.608	1.85
3	4	54.96	4.09	-54.6	-3.5	0.364	1.04
2	5	64.27	6.46	-62.53	-1.48	1.734	7.28
2	6	45.67	3.37	-44.6	-2.19	1.073	3.25
4	6	49.4	-5.28	-49.13	5.73	0.27	0.94
5	7	-11.52	7.87	11.61	-8.73	0.088	0.22
6	7	34.71	2.18	-34.41	-2.17	0.3	0.92
6	8	11.03	-8.87	-11.01	8.46	0.022	0.08
6	9	18.59	-18.83	-18.59	20.32	0	1.48
6	10	14.3	19.79	-14.3	-17.12	0	2.67
9	11	-12.3	-34.07	12.3	36.64	0	2.57
9	10	30.89	13.76	-30.89	-12.58	0	1.18
4	12	31.4	11.94	-31.4	-9.31	0	2.63
12	13	-12	-8.91	12	9.21	0	0.3
12	14	7.76	2.32	-7.68	-2.16	0.077	0.16
12	15	17.58	6.41	-17.36	-5.97	0.222	0.44
12	16	6.86	1.99	-6.82	-1.9	0.046	0.1
14	15	1.48	0.56	-1.48	-0.56	0.005	0
16	17	3.32	0.1	-3.31	-0.08	0.006	0.02
15	18	5.7	0.74	-5.66	-0.67	0.035	0.07
18	19	2.46	-0.23	-2.46	0.24	0.004	0.01
19	20	-7.04	-3.64	7.06	3.69	0.022	0.04
10	20	9.36	4.61	-9.26	-4.39	0.099	0.22
10	17	5.71	5.78	-5.69	-5.72	0.021	0.05
10	21	16.33	11.77	-16.2	-11.47	0.136	0.29
10	22	7.98	5.74	-7.91	-5.6	0.068	0.14
21	22	-1.3	0.27	1.3	-0.27	0	0
15	23	4.94	3.29	-4.9	-3.22	0.035	0.07
22	24	6.61	5.87	-6.52	-5.73	0.089	0.14
23	24	1.7	1.62	-1.7	-1.61	0.007	0.02
24	25	-0.48	0.68	0.48	-0.68	0.001	0
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-4.03	-1.69	4.05	1.73	0.021	0.04
28	27	17.34	6.34	-17.34	-5.08	0	1.26
27	29	6.19	1.67	-6.1	-1.51	0.088	0.17
27	30	7.1	1.67	-6.93	-1.36	0.166	0.31
29	30	3.7	0.61	-3.67	-0.54	0.034	0.06
8	28	2.28	1.3	-2.27	-3.59	0.007	0.02
6	28	15.11	2.19	-15.07	-2.75	0.037	0.13
Toplam						9.3979	42.7511

Tablo C.3.a Yakıt maliyeti sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon alındığında bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0774	0	179.7391	-19.356	-	-
2	1.0688	-3.8546	20	41.4309	21.7	12.7
3	1.0501	-4.8014	-	-	2.4	1.2
4	1.0437	-5.7642	-	-	7.6	1.6
5	1.0683	-10.5108	15	65.118	94.2	19
6	1.0405	-6.8165	-	-	-	-
7	1.044	-8.8108	-	-	22.8	10.9
8	1.0502	-7.1764	24.0586	62.178	30	30
9	1.0459	-7.6892	-	-	-	-
10	1.0072	-9.5946	-	-	5.8	2
11	1.0278	-5.1254	23.1185	-8.416	-	-
12	1.0231	-8.2117	-	-	11.2	7.5
13	1.036	-5.8639	31.0148	10.1438	-	-
14	1.0077	-9.2501	-	-	6.2	1.6
15	1.0023	-9.4316	-	-	8.2	2.5
16	1.008	-9.0729	-	-	3.5	1.8
17	1.0024	-9.6658	-	-	9	5.8
18	0.9914	-10.2345	-	-	3.2	0.9
19	0.9882	-10.5075	-	-	9.5	3.4
20	0.9921	-10.341	-	-	2.2	0.7
21	0.9949	-10.0804	-	-	17.5	11.2
22	0.9957	-10.0682	-	-	-	-
23	0.9915	-10.0541	-	-	3.2	1.6
24	0.9858	-10.5195	-	-	8.7	6.7
25	1.0004	-10.9905	-	-	-	-
26	0.9824	-11.4248	-	-	3.5	2.3
27	0.9928	-10.9834	-	-	-	-
28	1.0359	-7.2378	-	-	-	-
29	0.9723	-12.2916	-	-	2.4	0.9
30	0.9604	-13.2325	-	-	10.6	1.9
Toplam			292.93	151.1	283.4	126.2

Tablo C.3.b Yakıt maliyeti parçalı sinüs bileşenine sahip bir fonksiyon alındığında hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	127.32	-23.42	-124.56	28.65	2.761	8.27
1	3	52.41	4.06	-51.33	-1.95	1.08	4.43
2	4	24	6.87	-23.68	-7.95	0.319	0.97
3	4	48.93	0.75	-48.65	-0.38	0.287	0.82
2	5	64.1	-12.29	-62.35	17.25	1.749	7.35
2	6	34.76	5.5	-34.12	-5.65	0.637	1.93
4	6	46.79	-5.04	-46.55	5.39	0.242	0.84
5	7	-16.85	28.87	17.31	-28.84	0.464	1.17
6	7	40.59	-17.39	-40.11	17.94	0.477	1.46
6	8	8.73	-26.89	-8.64	26.7	0.087	0.3
6	9	8.73	51.23	-8.73	-46.9	0	4.33
6	10	8.31	-10.23	-8.31	11.31	0	1.08
9	11	-23.12	9.61	23.12	-8.42	0	1.19
9	10	31.84	37.3	-31.84	-34.88	0	2.42
4	12	17.94	11.78	-17.94	-10.71	0	1.07
12	13	-31.01	-8.75	31.01	10.14	0	1.39
12	14	8.37	2.21	-8.28	-2.03	0.088	0.18
12	15	19.98	6.38	-19.7	-5.83	0.278	0.55
12	16	9.4	3.37	-9.31	-3.18	0.09	0.19
14	15	2.08	0.43	-2.07	-0.42	0.01	0.01
16	17	5.81	1.38	-5.79	-1.31	0.018	0.07
15	18	7.13	1.55	-7.08	-1.43	0.057	0.12
18	19	3.88	0.53	-3.87	-0.51	0.01	0.02
19	20	-5.63	-2.89	5.65	2.92	0.014	0.03
10	20	7.92	3.78	-7.85	-3.62	0.071	0.16
10	17	3.22	4.51	-3.21	-4.49	0.01	0.03
10	21	15.67	9.32	-15.56	-9.07	0.114	0.25
10	22	7.54	4.15	-7.49	-4.04	0.053	0.11
21	22	-1.94	-2.13	1.94	2.13	0.001	0
15	23	6.44	2.21	-6.39	-2.12	0.046	0.09
22	24	5.55	1.91	-5.51	-1.85	0.04	0.06
23	24	3.19	0.52	-3.18	-0.49	0.014	0.03
24	25	-0.02	-4.33	0.05	4.39	0.036	0.06
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.046	0.07
25	27	-3.6	-6.76	3.67	6.89	0.068	0.13
28	27	16.97	11.84	-16.97	-10.26	0	1.58
27	29	6.2	1.68	-6.11	-1.51	0.092	0.17
27	30	7.1	1.68	-6.93	-1.36	0.173	0.33
29	30	3.71	0.61	-3.67	-0.54	0.036	0.07
8	28	2.7	5.48	-2.67	-7.71	0.03	0.09
6	28	14.33	3.55	-14.3	-4.12	0.034	0.12
					Toplam	9.531	43.5307

Tablo C.4.a Maliyet optimizasyonu bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0885	0	166.0836	14.559	-	-
2	1.0677	-3.1057	48.5176	33.776	21.7	12.7
3	1.0488	-4.8286	-	-	2.4	1.2
4	1.0398	-5.798	-	-	7.6	1.6
5	1.028	-9.1682	24.1072	22.6118	94.2	19
6	1.0336	-6.791	-	-	-	-
7	1.0232	-8.2674	-	-	22.8	10.9
8	1.0315	-6.975	23.4712	26.2795	30	30
9	1.0261	-8.7418	-	-	-	-
10	1.0177	-10.6522	-	-	5.8	2
11	1.1	-7.1205	15.3535	39.3123	-	-
12	1.0243	-9.8264	-	-	11.2	7.5
13	1.0416	-8.7399	14.4508	13.0417	-	-
14	1.0088	-10.7796	-	-	6.2	1.6
15	1.004	-10.857	-	-	8.2	2.5
16	1.0136	-10.4674	-	-	3.5	1.8
17	1.0113	-10.8188	-	-	9	5.8
18	0.9962	-11.5242	-	-	3.2	0.9
19	0.9949	-11.7164	-	-	9.5	3.4
20	0.9998	-11.5117	-	-	2.2	0.7
21	1.0027	-11.1108	-	-	17.5	11.2
22	1.0026	-11.0917	-	-	-	-
23	0.9906	-11.2352	-	-	3.2	1.6
24	0.9815	-11.3715	-	-	8.7	6.7
25	0.972	-11.1631	-	-	-	-
26	0.9534	-11.6237	-	-	3.5	2.3
27	1.0154	-10.7871	-	-	-	-
28	1.0297	-7.2216	-	-	-	-
29	0.9954	-12.0364	-	-	2.4	0.9
30	0.9839	-12.9336	-	-	10.6	1.9
		Toplam:	291.98	149.58	283.4	126.2

Tablo C.4.b Maliyet optimizasyonu hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	111.24	3.62	-109.23	-0.68	2.009	6.02
1	3	54.85	10.93	-53.64	-8.33	1.204	4.93
2	4	32.39	6.17	-31.84	-6.53	0.551	1.68
3	4	51.24	7.13	-50.92	-6.67	0.322	0.92
2	5	60.83	8.8	-59.26	-4.48	1.574	6.61
2	6	42.82	6.79	-41.85	-5.92	0.966	2.93
4	6	45.83	2.66	-45.59	-2.34	0.232	0.81
5	7	-10.83	8.1	10.92	-8.96	0.084	0.21
6	7	34.01	1.94	-33.72	-1.94	0.29	0.89
6	8	8.88	2.31	-8.87	-2.76	0.01	0.03
6	9	16.29	-25.82	-16.29	27.88	0	2.06
6	10	14.15	27.48	-14.15	-23.45	0	4.03
9	11	-15.35	-36.25	15.35	39.31	0	3.06
9	10	31.64	8.37	-31.64	-7.25	0	1.12
4	12	29.34	8.94	-29.34	-6.73	0	2.21
12	13	-14.45	-12.55	14.45	13.04	0	0.49
12	14	7.9	2.47	-7.82	-2.3	0.08	0.17
12	15	17.77	7.07	-17.54	-6.62	0.231	0.45
12	16	6.91	2.24	-6.86	-2.14	0.048	0.1
14	15	1.62	0.7	-1.62	-0.69	0.007	0.01
16	17	3.36	0.34	-3.36	-0.32	0.006	0.02
15	18	5.71	0.77	-5.67	-0.7	0.035	0.07
18	19	2.47	-0.2	-2.47	0.21	0.004	0.01
19	20	-7.03	-3.61	7.05	3.65	0.021	0.04
10	20	9.35	4.57	-9.25	-4.35	0.098	0.22
10	17	5.66	5.53	-5.64	-5.48	0.02	0.05
10	21	16.74	12.55	-16.59	-12.24	0.147	0.32
10	22	8.25	6.25	-8.18	-6.09	0.075	0.16
21	22	-0.91	1.04	0.91	-1.04	0	0
15	23	5.25	4.04	-5.21	-3.95	0.044	0.09
22	24	7.26	7.13	-7.15	-6.94	0.119	0.18
23	24	2.01	2.35	-1.99	-2.32	0.013	0.03
24	25	0.44	2.61	-0.43	-2.58	0.014	0.02
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.049	0.07
25	27	-3.12	0.21	3.13	-0.19	0.01	0.02
28	27	16.42	4.22	-16.42	-3.15	0	1.07
27	29	6.19	1.67	-6.1	-1.51	0.088	0.17
27	30	7.09	1.67	-6.93	-1.36	0.165	0.31
29	30	3.7	0.61	-3.67	-0.54	0.034	0.06
8	28	2.34	-0.96	-2.34	-1.3	0.003	0.01
6	28	14.11	2.35	-14.08	-2.92	0.033	0.12
					Toplam:	8.5839	41.7765

Tablo C.5.a Hat akışları kısıtlamaları altında bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag (pu)	Açı (deg)	P(MW)	Q (MVar)	P(MW)	Q (MVar)
1	1.0369	0	179.872	-18.9759	-	-
2	1.0315	-4.0171	46.4867	67.5958	21.7	12.7
3	0.9987	-5.7429	-	-	2.4	1.2
4	0.9902	-6.9098	-	-	7.6	1.6
5	1.0136	-11.1015	22.1154	52.155	94.2	19
6	0.9871	-8.0382	-	-	-	-
7	0.9896	-9.8238	-	-	22.8	10.9
8	0.9863	-8.2768	22.6372	26.9406	30	30
9	1.0201	-10.1275	-	-	-	-
10	1.0155	-11.9517	-	-	5.8	2
11	1.0064	-8.8151	11.3047	-6.4744	-	-
12	1.048	-11.4075	-	-	11.2	7.5
13	1.0662	-10.546	12	13.9813	-	-
14	1.0299	-12.3322	-	-	6.2	1.6
15	1.0223	-12.3736	-	-	8.2	2.5
16	1.0264	-11.8665	-	-	3.5	1.8
17	1.0137	-12.1661	-	-	9	5.8
18	1.0075	-12.9482	-	-	3.2	0.9
19	1.0019	-13.0919	-	-	9.5	3.4
20	1.0045	-12.8652	-	-	2.2	0.7
21	1.0025	-12.4553	-	-	17.5	11.2
22	1.003	-12.4511	-	-	-	-
23	1.0047	-12.7856	-	-	3.2	1.6
24	0.9899	-12.9834	-	-	8.7	6.7
25	0.9874	-13.255	-	-	0	-18.99
26	0.9691	-13.701	-	-	3.5	2.3
27	1.0375	-12.0842	-	-	-	-
28	0.9906	-8.6162	-	-	-	-
29	1.018	-13.2799	-	-	2.4	0.9
30	1.0067	-14.1374	-	-	10.6	1.9
Toplam			294.42	135.22	283.4	107.21

Tablo C.5.b Hat akışları kısıtlamaları altında hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıp	
Baradan	Baraya	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	Aktif (MW)	Reaktif (MVar)
1	2	110.41	-57.37	-107.64	62.84	2.775	8.31
1	3	53.78	-7.23	-52.53	10.21	1.249	5.12
2	4	30.77	3.4	-30.26	-3.82	0.506	1.54
3	4	50.13	-11.41	-49.8	11.92	0.333	0.96
2	5	55	10.06	-53.63	-6.5	1.367	5.74
2	6	41.48	-6.27	-40.55	7.09	0.934	2.83
4	6	46.72	-40.94	-46.28	42	0.439	1.53
5	7	-25.57	2.31	25.87	-2.58	0.303	0.76
6	7	49.31	9.38	-48.67	-8.32	0.635	1.95
6	8	5.37	-93.91	-4.38	96.89	0.993	3.48
6	9	-3.36	60.75	3.36	-54.68	0	6.07
6	10	3.24	-8.78	-3.24	9.33	0	0.55
9	11	-26.65	31.98	26.65	-28.48	0	3.51
9	10	23.28	22.7	-23.28	-21.57	0	1.13
4	12	25.74	31.24	-25.74	-27.97	0	3.27
12	13	-16.06	-27.03	16.06	28.25	0	1.22
12	14	8.05	6.67	-7.93	-6.42	0.119	0.25
12	15	15.57	23.29	-15.11	-22.39	0.459	0.9
12	16	6.98	17.54	-6.68	-16.92	0.297	0.63
14	15	1.73	4.82	-1.68	-4.77	0.054	0.05
16	17	3.18	15.12	-3.06	-14.68	0.119	0.44
15	18	9.73	8.96	-9.55	-8.81	0.178	0.14
18	19	6.35	7.91	-6.28	-7.78	0.065	0.13
19	20	-3.22	4.38	3.23	-4.36	0.01	0.02
10	20	5.47	-3.57	-5.43	3.66	0.041	0.09
10	17	5.98	-8.79	-5.94	8.88	0.037	0.1
10	21	7.23	14.9	-7.13	-14.69	0.097	0.21
10	22	2.05	7.88	-2	-7.78	0.049	0.1
21	22	-10.37	3.49	10.38	-3.46	0.015	0.03
15	23	-1.14	15.7	1.37	-15.22	0.235	0.48
22	24	-8.38	11.24	8.62	-10.87	0.237	0.37
23	24	-4.57	13.62	4.85	-13.06	0.275	0.56
24	25	-22.17	17.27	23.58	-14.81	1.408	2.46
25	26	3.54	2.37	-3.5	-2.3	0.045	0.07
25	27	-27.12	12.44	28.01	-10.74	0.889	1.7
28	27	41.28	-1.15	-41.28	7.44	0	6.3
27	29	6.18	1.66	-6.1	-1.5	0.081	0.15
27	30	7.08	1.65	-6.93	-1.36	0.153	0.29
29	30	3.7	0.6	-3.67	-0.54	0.032	0.06
8	28	9.38	13.6	-9.2	-15.43	0.171	0.54
6	28	32.28	-16.53	-32.07	16.57	0.207	0.73
Toplam						14.8085	4.7592

Tablo C.6.a Bara gerilim kısıtlamaları altında bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0369	0	179.872	-18.9759	-	-
2	1.0315	-4.0171	46.4867	67.5958	21.7	12.7
3	0.9987	-5.7429	-	-	2.4	1.2
4	0.9902	-6.9098	-	-	7.6	1.6
5	1.0136	-11.1015	22.1154	52.155	94.2	19
6	0.9871	-8.0382	-	-	-	-
7	0.9896	-9.8238	-	-	22.8	10.9
8	0.9863	-8.2768	22.6372	26.9406	30	30
9	1.0201	-10.1275	-	-	-	-
10	1.0155	-11.9517	-	-	5.8	2
11	1.0064	-8.8151	11.3047	-6.4744	-	-
12	1.048	-11.4075	-	-	11.2	7.5
13	1.0662	-10.546	12	13.9813	-	-
14	1.0299	-12.3322	-	-	6.2	1.6
15	1.0223	-12.3736	-	-	8.2	2.5
16	1.0264	-11.8665	-	-	3.5	1.8
17	1.0137	-12.1661	-	-	9	5.8
18	1.0075	-12.9482	-	-	3.2	0.9
19	1.0019	-13.0919	-	-	9.5	3.4
20	1.0045	-12.8652	-	-	2.2	0.7
21	1.0025	-12.4553	-	-	17.5	11.2
22	1.003	-12.4511	-	-	-	-
23	1.0047	-12.7856	-	-	3.2	1.6
24	0.9899	-12.9834	-	-	8.7	6.7
25	0.9874	-13.255	-	-	0	-18.99
26	0.9691	-13.701	-	-	3.5	2.3
27	1.0375	-12.0842	-	-	-	-
28	0.9906	-8.6162	-	-	-	-
29	1.018	-13.2799	-	-	2.4	0.9
30	1.0067	-14.1374	-	-	10.6	1.9
Toplam			294.42	135.22	283.4	107.21

Tablo C.6.b Bara gerilim kısıtlamaları altında hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	121.5	-27.81	-118.74	33.25	2.761	8.27
1	3	58.37	8.83	-56.9	-4.91	1.474	6.04
2	4	34.28	13.06	-33.55	-12.7	0.735	2.24
3	4	54.5	3.71	-54.11	-2.99	0.395	1.13
2	5	64.55	-3.13	-62.7	8.72	1.85	7.77
2	6	44.69	11.71	-43.51	-10.04	1.179	3.58
4	6	45.06	-5.22	-44.81	5.64	0.249	0.87
5	7	-9.38	24.43	9.7	-24.65	0.318	0.8
6	7	32.85	-13.53	-32.5	13.75	0.343	1.05
6	8	9.39	-1.14	-9.38	0.74	0.011	0.04
6	9	18.67	12.55	-18.67	-11.58	0	0.97
6	10	13.67	16.5	-13.67	-14.38	0	2.12
9	11	-11.3	6.82	11.3	-6.47	0	0.35
9	10	29.98	4.76	-29.98	-3.79	0	0.97
4	12	34.99	19.31	-34.99	-15.87	0	3.44
12	13	-12	-13.56	12	13.98	0	0.42
12	14	8.43	3.38	-8.34	-3.19	0.093	0.19
12	15	19.4	10.93	-19.1	-10.34	0.299	0.59
12	16	7.96	7.61	-7.85	-7.39	0.104	0.22
14	15	2.14	1.59	-2.13	-1.58	0.015	0.01
16	17	4.35	5.59	-4.33	-5.5	0.025	0.09
15	18	6.56	3.73	-6.5	-3.61	0.058	0.12
18	19	3.3	2.71	-3.29	-2.69	0.011	0.02
19	20	-6.21	-0.71	6.22	0.74	0.013	0.03
10	20	8.49	1.59	-8.42	-1.44	0.068	0.15
10	17	4.68	0.32	-4.67	-0.3	0.007	0.02
10	21	16.56	9.92	-16.43	-9.65	0.126	0.27
10	22	8.12	4.53	-8.06	-4.41	0.061	0.13
21	22	-1.07	-1.55	1.07	1.55	0	0
15	23	6.47	5.69	-6.4	-5.55	0.071	0.14
22	24	6.99	2.86	-6.93	-2.76	0.065	0.1
23	24	3.2	3.95	-3.17	-3.88	0.034	0.07
24	25	1.39	-0.02	-1.39	0.03	0.004	0.01
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-2.16	16.58	2.43	-16.07	0.268	0.51
28	27	15.7	-11.25	-15.7	12.75	0	1.51
27	29	6.19	1.66	-6.1	-1.5	0.084	0.16
27	30	7.09	1.65	-6.93	-1.36	0.158	0.3
29	30	3.7	0.6	-3.67	-0.54	0.033	0.06
8	28	2.02	-3.8	-2.01	1.73	0.008	0.02
6	28	13.74	-9.98	-13.69	9.52	0.049	0.17
					Toplam	11.016	45.0269

Tablo C.7.a (10-20) hattı devre dışı kaldığında bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0911	0	179.9423	12.7589	-	-
2	1.07	-3.3834	46.3923	33.2042	21.7	12.7
3	1.0501	-5.1966	-	-	2.4	1.2
4	1.0408	-6.2475	-	-	7.6	1.6
5	1.0335	-9.7682	20.3189	26.2084	94.2	19
6	1.0379	-7.2831	-	-	-	-
7	1.0281	-8.7985	-	-	22.8	10.9
8	1.0384	-7.5292	22.4869	34.0855	30	30
9	1.0417	-9.2107	-	-	-	-
10	1.0246	-10.9444	-	-	5.8	2
11	1.1	-7.9404	12.2136	30.9408	-	-
12	1.0287	-11.0046	-	-	11.2	7.5
13	1.0452	-10.1093	12	12.4019	-	-
14	1.0094	-12.105	-	-	6.2	1.6
15	0.9997	-12.268	-	-	8.2	2.5
16	1.0198	-11.2675	-	-	3.5	1.8
17	1.0178	-11.2651	-	-	9	5.8
18	0.971	-13.8732	-	-	3.2	0.9
19	0.9576	-14.6434	-	-	9.5	3.4
20	0.9563	-14.7221	-	-	2.2	0.7
21	1.0094	-11.4621	-	-	17.5	11.2
22	1.0091	-11.4642	-	-	-	-
23	0.9901	-12.322	-	-	3.2	1.6
24	0.986	-12.0155	-	-	8.7	6.7
25	0.9799	-11.7855	-	-	-	-
26	0.9615	-12.2385	-	-	3.5	2.3
27	1.017	-11.3914	-	-	-	-
28	1.0342	-7.7313	-	-	-	-
29	0.9971	-12.6367	-	-	2.4	0.9
30	0.9855	-13.5309	-	-	10.6	1.9
		Toplam	293.35	149.6	283.4	126.2

Tablo C.7.b (10-20) hattı devre dışı kaldığında hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	120.91	1.67	-118.55	2.31	2.359	7.07
1	3	59.04	11.09	-57.65	-7.77	1.381	5.66
2	4	34.47	6.38	-33.85	-6.54	0.619	1.89
3	4	55.25	6.57	-54.88	-5.96	0.371	1.07
2	5	63.9	6.73	-62.19	-1.86	1.709	7.18
2	6	44.87	5.09	-43.83	-4.01	1.041	3.16
4	6	45.67	-5.45	-45.43	5.78	0.232	0.81
5	7	-11.69	9.06	11.79	-9.9	0.099	0.25
6	7	34.89	1.02	-34.59	-1	0.302	0.93
6	8	9.87	-4.27	-9.86	3.82	0.013	0.04
6	9	17.14	-11.5	-17.14	12.36	0	0.86
6	10	12.7	11.07	-12.7	-9.71	0	1.35
9	11	-12.21	-29.04	12.21	30.94	0	1.9
9	10	29.36	16.68	-29.36	-15.53	0	1.16
4	12	35.47	16.36	-35.47	-12.91	0	3.45
12	13	-12	-12.02	12	12.4	0	0.38
12	14	9.39	3.32	-9.27	-3.08	0.115	0.24
12	15	23.12	11.29	-22.71	-10.48	0.414	0.82
12	16	3.76	2.82	-3.74	-2.78	0.02	0.04
14	15	3.07	1.48	-3.05	-1.46	0.025	0.02
16	17	0.24	0.98	-0.24	-0.98	0.001	0
15	18	15.3	5.81	-15.01	-5.22	0.287	0.59
18	19	11.81	4.32	-11.7	-4.1	0.107	0.22
19	20	2.2	0.7	-2.2	-0.7	0.002	0
10	20	0	0	0	0	0	0
10	17	8.79	4.9	-8.76	-4.82	0.031	0.08
10	21	18.24	12.4	-18.08	-12.05	0.161	0.35
10	22	9.23	6.14	-9.15	-5.96	0.085	0.18
21	22	0.58	0.85	-0.58	-0.85	0	0
15	23	2.26	3.63	-2.24	-3.59	0.018	0.04
22	24	9.73	6.81	-9.57	-6.57	0.159	0.25
23	24	-0.96	1.99	0.97	-1.98	0.007	0.01
24	25	-0.1	1.88	0.11	-1.87	0.007	0.01
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-3.66	-0.5	3.67	0.53	0.015	0.03
28	27	16.96	5.03	-16.96	-3.87	0	1.16
27	29	6.19	1.67	-6.1	-1.51	0.087	0.17
27	30	7.09	1.67	-6.93	-1.36	0.164	0.31
29	30	3.7	0.61	-3.67	-0.54	0.034	0.06
8	28	2.34	0.26	-2.34	-2.54	0.004	0.01
6	28	14.65	1.91	-14.62	-2.48	0.034	0.12
					Toplam	9.954	41.9165

Tablo C.8.a (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCPS'li sistemin bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0802	0	177.7515	7.228	-	-
2	1.0603	-3.4072	48.0331	25.2433	21.7	12.7
3	1.045	-5.3509	-	-	2.4	1.2
4	1.0371	-6.4343	-	-	7.6	1.6
5	1.0292	-9.8887	21.4881	28.8112	94.2	19
6	1.0336	-7.4572	-	-	-	-
7	1.0238	-8.9548	-	-	22.8	10.9
8	1.034	-7.6857	23.2458	33.2332	30	30
9	1.0389	-9.4853	-	-	-	-
10	1.0272	-11.1674	-	-	5.8	2
11	1.1	-8.3614	10.7768	32.4103	-	-
12	1.0383	-11.288	-	-	11.2	7.5
13	1.0691	-10.4209	12	23.6393	-	-
14	1.0186	-12.3697	-	-	6.2	1.6
15	1.0084	-12.5172	-	-	8.2	2.5
16	1.0265	-11.5077	-	-	3.5	1.8
17	1.0217	-11.4969	-	-	9	5.8
18	0.98	-14.0941	-	-	3.2	0.9
19	0.9836	-14.8257	-	-	9.5	3.4
20	0.9824	-14.9003	-	-	2.2	0.7
21	1.0121	-11.6812	-	-	17.5	11.2
22	1.0119	-11.6829	-	-	-	-
23	0.9965	-12.5535	-	-	3.2	1.6
24	0.9892	-12.2279	-	-	8.7	6.7
25	0.9797	-11.9478	-	-	-	-
26	0.9613	-12.4009	-	-	3.5	2.3
27	1.0166	-11.5287	-	-	-	-
28	1.0303	-7.9051	-	-	-	-
29	0.9966	-12.7751	-	-	2.4	0.9
30	0.9851	-13.6701	-	-	10.6	1.9
Toplam			293.3	150.57	283.4	126.2

Tablo C.8.b (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCPS'li sistemin hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	118.78	-0.33	-116.45	4.26	2.322	6.95
1	3	58.97	7.56	-57.6	-4.22	1.377	5.64
2	4	34.64	2.65	-34.02	-2.8	0.615	1.87
3	4	55.2	3.02	-54.83	-2.42	0.37	1.06
2	5	63.32	3.86	-61.63	0.97	1.694	7.12
2	6	44.83	1.77	-43.79	-0.65	1.043	3.16
4	6	45.1	-4.15	-44.87	4.45	0.227	0.79
5	7	-11.09	8.84	11.18	-9.68	0.092	0.23
6	7	34.27	1.22	-33.98	-1.22	0.294	0.9
6	8	9.16	-3.71	-9.15	3.26	0.011	0.04
6	9	17.7	-17.67	-17.7	18.97	0	1.3
6	10	13.16	15.06	-13.16	-13.23	0	1.83
9	11	-10.78	-30.4	10.78	32.41	0	2.01
9	10	28.48	11.44	-28.48	-10.48	0	0.96
4	12	36.15	7.77	-36.15	-4.61	0	3.15
12	13	-12	-22.78	12	23.64	0	0.86
12	14	9.49	3.52	-9.38	-3.27	0.117	0.24
12	15	23.38	12.13	-22.96	-11.29	0.426	0.84
12	16	4.08	4.25	-4.05	-4.18	0.03	0.06
14	15	3.18	1.67	-3.15	-1.65	0.027	0.02
16	17	0.55	2.38	-0.54	-2.37	0.003	0.01
15	18	15.29	5.78	-15	-5.21	0.282	0.57
18	19	11.8	4.31	-11.7	-4.1	0.102	0.21
19	20	2.2	0.7	-2.2	-0.7	0.002	0
10	20	0	0	0	0	0	0
10	17	8.48	3.49	-8.46	-3.43	0.026	0.07
10	21	18.17	12.32	-18.01	-11.98	0.159	0.34
10	22	9.19	6.09	-9.11	-5.91	0.084	0.17
21	22	0.51	0.78	-0.51	-0.78	0	0
15	23	2.62	4.65	-2.59	-4.6	0.028	0.06
22	24	9.62	6.7	-9.47	-6.46	0.154	0.24
23	24	-0.61	3	0.62	-2.97	0.012	0.03
24	25	0.14	2.77	-0.13	-2.74	0.015	0.03
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-3.42	0.37	3.43	-0.34	0.013	0.02
28	27	16.72	4.1	-16.72	-3	0	1.11
27	29	6.19	1.67	-6.1	-1.51	0.087	0.17
27	30	7.09	1.67	-6.93	-1.36	0.165	0.31
29	30	3.7	0.61	-3.67	-0.54	0.034	0.06
8	28	2.39	-0.03	-2.39	-2.24	0.004	0.01
6	28	14.36	1.29	-14.33	-1.86	0.033	0.12
					Toplam	9.8953	42.6531

Tablo C.9.a (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCSC'li sistemin bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0975	0	176.991	13.7276	-	-
2	1.0784	-3.3021	48.6462	51.6918	21.7	12.7
3	1.0499	-5.0129	-	-	2.4	1.2
4	1.0393	-6.0239	-	-	7.6	1.6
5	1.0315	-9.4128	21.8149	18.0465	94.2	19
6	1.0397	-7.0825	-	-	-	-
7	1.0283	-8.5356	-	-	22.8	10.9
8	1.0401	-7.3436	21.6132	34.0079	30	30
9	1.0221	-8.999	-	-	-	-
10	1.0225	-10.6731	-	-	5.8	2
11	1.1	-7.7032	12.2245	41.3126	-	-
12	1.0338	-10.7072	-	-	11.2	7.5
13	1.0307	-9.8038	12	-2.2198	-	-
14	1.0143	-11.808	-	-	6.2	1.6
15	1.0044	-11.9743	-	-	8.2	2.5
16	1.0218	-10.966	-	-	3.5	1.8
17	1.017	-10.9899	-	-	9	5.8
18	0.9845	-12.2201	-	-	3.2	0.9
19	0.9713	-12.9688	-	-	9.5	3.4
20	0.97	-13.0453	-	-	2.2	0.7
21	1.0077	-11.1914	-	-	17.5	11.2
22	1.0075	-11.1932	-	-	-	-
23	0.9928	-12.0401	-	-	3.2	1.6
24	0.986	-11.7519	-	-	8.7	6.7
25	0.9794	-11.5345	-	-	-	-
26	0.961	-11.988	-	-	3.5	2.3
27	1.0193	-11.1504	-	-	-	-
28	1.0361	-7.5306	-	-	-	-
29	0.9994	-12.3899	-	-	2.4	0.9
30	0.9879	-13.2799	-	-	10.6	1.9
Toplam			293.29	156.57	283.4	126.2

Tablo C.9.b (10-20) hattı devre dışı kaldığında TCSC'li sistemin hat sonuçları

Baradan	Baraya	Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
		P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	118.64	-1.38	-116.39	4.97	2.243	6.72
1	3	58.36	15.11	-56.98	-11.81	1.378	5.65
2	4	35.08	12.44	-34.38	-12.39	0.692	2.11
3	4	54.58	10.61	-54.21	-10.01	0.371	1.06
2	5	62.98	12.5	-61.3	-7.75	1.686	7.08
2	6	45.28	9.08	-44.21	-7.91	1.076	3.26
4	6	44.41	-13.5	-44.17	13.84	0.237	0.82
5	7	-11.09	6.79	11.17	-7.68	0.076	0.19
6	7	34.26	3.21	-33.97	-3.22	0.293	0.9
6	8	10.6	-4.22	-10.59	3.78	0.014	0.05
6	9	15.53	-34.72	-15.53	38.08	0	3.37
6	10	13.31	27.98	-13.31	-23.98	0	4
9	11	-12.22	-38.12	12.22	41.31	0	3.19
9	10	27.76	0.04	-27.76	0.77	0	0.81
4	12	36.58	34.3	-36.58	-29.07	0	5.23
12	13	-12	2.42	12	-2.22	0	0.2
12	14	9.5	3.38	-9.38	-3.14	0.117	0.24
12	15	23.5	11.6	-23.07	-10.77	0.425	0.84
12	16	4.39	4.17	-4.35	-4.1	0.032	0.07
14	15	3.18	1.54	-3.15	-1.51	0.027	0.02
16	17	0.85	2.3	-0.85	-2.29	0.003	0.01
15	18	15.29	5.39	-15.01	-5.21	0.279	0.17
18	19	11.81	4.31	-11.7	-4.1	0.104	0.21
19	20	2.2	0.7	-2.2	-0.7	0.002	0
10	20	0	0	0	0	0	0
10	17	8.17	3.57	-8.15	-3.51	0.025	0.06
10	21	18.01	11.98	-17.85	-11.64	0.156	0.34
10	22	9.08	5.86	-9	-5.69	0.081	0.17
21	22	0.35	0.44	-0.35	-0.44	0	0
15	23	2.74	4.39	-2.72	-4.34	0.027	0.05
22	24	9.35	6.13	-9.21	-5.91	0.142	0.22
23	24	-0.48	2.74	0.49	-2.72	0.01	0.02
24	25	0.02	1.97	-0.01	-1.96	0.008	0.01
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-3.54	-0.41	3.55	0.44	0.013	0.03
28	27	16.84	4.91	-16.84	-3.78	0	1.13
27	29	6.19	1.67	-6.1	-1.51	0.087	0.16
27	30	7.09	1.67	-6.93	-1.36	0.164	0.31
29	30	3.7	0.61	-3.67	-0.54	0.034	0.06
8	28	2.2	0.22	-2.19	-2.52	0.004	0.01
6	28	14.68	1.81	-14.64	-2.39	0.034	0.12
Toplam						9.8898	48.9998

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tablo C.10.a (27-30) hattı devre dışı kaldığında bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0877	0	175.4411	-9.9274	-	-
2	1.0784	-3.4957	47.1042	55.9748	21.7	12.7
3	1.0491	-5.0701	-	-	2.4	1.2
4	1.0404	-6.0926	-	-	7.6	1.6
5	1.0565	-9.8584	21.6442	43.412	94.2	19
6	1.0416	-7.1766	-	-	-	-
7	1.0398	-8.7572	-	-	22.8	10.9
8	1.0499	-7.4926	24.9678	56.1078	30	30
9	1.0232	-9.2161	-	-	-	-
10	1.0197	-11.0284	-	-	5.8	2
11	1.0366	-7.8491	12.1652	6.788	-	-
12	1.0404	-10.3431	-	-	11.2	7.5
13	1.0374	-9.4513	12	-2.1298	-	-
14	1.0235	-11.2655	-	-	6.2	1.6
15	1.0171	-11.32	-	-	8.2	2.5
16	1.0238	-10.8881	-	-	3.5	1.8
17	1.0159	-11.2164	-	-	9	5.8
18	1.0056	-11.9428	-	-	3.2	0.9
19	1.002	-12.1137	-	-	9.5	3.4
20	1.0056	-11.9018	-	-	2.2	0.7
21	1.0057	-11.4893	-	-	17.5	11.2
22	1.0058	-11.4721	-	-	-	-
23	1.0011	-11.6779	-	-	3.2	1.6
24	0.9884	-11.7971	-	-	8.7	6.7
25	0.9806	-11.6244	-	-	-	-
26	0.9623	-12.0767	-	-	3.5	2.3
27	1.0199	-11.2679	-	-	-	-
28	1.0394	-7.6308	-	-	-	-
29	0.9742	-14.0274	-	-	2.4	0.9
30	0.9367	-16.759	-	-	10.6	1.9
Toplam			293.32	150.23	283.4	126.2

Tablo C.10.b (27-30) hattı devre dışı kaldığında hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	118.28	-19.84	-115.96	23.7	2.325	6.96
1	3	57.16	9.91	-55.87	-6.93	1.296	5.31
2	4	33.62	12.2	-32.98	-12.32	0.64	1.95
3	4	53.47	5.73	-53.12	-5.19	0.347	1
2	5	63.75	-0.91	-62.1	5.46	1.649	6.93
2	6	43.99	8.28	-42.98	-7.31	1.011	3.07
4	6	45.05	-15.79	-44.8	16.17	0.25	0.87
5	7	-10.46	18.96	10.66	-19.57	0.202	0.51
6	7	33.76	-8.68	-33.46	8.67	0.297	0.91
6	8	7.87	-22.97	-7.81	22.7	0.064	0.22
6	9	17.83	-1.99	-17.83	2.63	0	0.65
6	10	14.06	25.39	-14.06	-21.8	0	3.6
9	11	-12.17	-6.41	12.17	6.79	0	0.38
9	10	30	3.78	-30	-2.82	0	0.96
4	12	33.45	31.7	-33.45	-27.29	0	4.41
12	13	-12	2.32	12	-2.13	0	0.19
12	14	8.15	3.01	-8.06	-2.84	0.086	0.18
12	15	18.57	9.33	-18.3	-8.81	0.264	0.52
12	16	7.54	5.12	-7.46	-4.97	0.073	0.15
14	15	1.86	1.24	-1.85	-1.23	0.011	0.01
16	17	3.96	3.17	-3.95	-3.13	0.013	0.05
15	18	6.23	2.32	-6.18	-2.23	0.046	0.09
18	19	2.98	1.33	-2.98	-1.32	0.007	0.01
19	20	-6.52	-2.08	6.54	2.12	0.016	0.03
10	20	8.82	2.99	-8.74	-2.82	0.078	0.17
10	17	5.06	2.7	-5.05	-2.67	0.01	0.03
10	21	16.37	11.53	-16.24	-11.24	0.134	0.29
10	22	8.01	5.59	-7.94	-5.45	0.067	0.14
21	22	-1.26	0.04	1.26	-0.04	0	0
15	23	5.73	5.21	-5.67	-5.09	0.058	0.12
22	24	6.68	5.49	-6.59	-5.36	0.085	0.13
23	24	2.47	3.49	-2.45	-3.44	0.024	0.05
24	25	0.34	2.14	-0.33	-2.13	0.009	0.02
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-3.22	-0.24	3.23	0.27	0.011	0.02
28	27	16.98	5.67	-16.98	-4.49	0	1.17
27	29	13.75	4.23	-13.32	-3.4	0.437	0.83
27	30	0	0	0	0	0	0
29	30	10.92	2.5	-10.6	-1.9	0.317	0.6
8	28	2.77	3.4	-2.76	-5.69	0.017	0.05
6	28	14.26	-0.61	-14.23	0.02	0.032	0.11
					Toplam	9.924	42.76

Tablo C.11.a (27-30) hattı devre dışı kaldığında, SVC'li sistemin bara sonuçları

Bara no	Gerilim		Üretim		Yük	
	Mag(pu)	Açı(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.0975	0	180.8174	15.859	-	-
2	1.077	-3.3841	46.5161	51.914	21.7	12.7
3	1.0493	-5.0499	-	-	2.4	1.2
4	1.0385	-6.0691	-	-	7.6	1.6
5	1.0313	-9.6323	20.928	22.2793	94.2	19
6	1.0334	-7.1696	-	-	-	-
7	1.0245	-8.6787	-	-	22.8	10.9
8	1.0319	-7.4119	21.3393	28.1434	30	30
9	1.04	-9.3481	-	-	-	-
10	1.025	-11.1848	-	-	5.8	2
11	1.1	-8.113	11.8553	31.8555	-	-
12	1.0252	-10.2415	-	-	11.2	7.5
13	1.0218	-9.3225	12	-2.3842	-	-
14	1.0108	-11.189	-	-	6.2	1.6
15	1.0069	-11.3063	-	-	8.2	2.5
16	1.0172	-10.9449	-	-	3.5	1.8
17	1.0175	-11.3272	-	-	9	5.8
18	1.0008	-11.9965	-	-	3.2	0.9
19	1.0004	-12.2036	-	-	9.5	3.4
20	1.0057	-12.0102	-	-	2.2	0.7
21	1.0104	-11.6341	-	-	17.5	11.2
22	1.0104	-11.6146	-	-	-	-
23	0.9962	-11.7121	-	-	3.2	1.6
24	0.9906	-11.8872	-	-	8.7	6.7
25	0.9873	-11.7416	-	-	-	-
26	0.9691	-12.1877	-	-	3.5	2.3
27	1.0231	-11.3957	-	-	-	-
28	1.0303	-7.6501	-	-	-	-
29	0.9954	-14.5991	-	-	2.4	0.9
30	0.9782	-17.7427	-	-	10.6	-2.23
		Toplam	293.46	147.67	283.4	122.07

Tablo C.11.b (27-30) hattı devre dışı kaldığında, SVC'li sistemin hat sonuçları

		Baradan güç akışı		Baraya güç akışı		Kayıplar	
Baradan	Baraya	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	Aktif (MW)	Reaktif (MVAr)
1	2	122.02	0.43	-119.65	3.55	2.374	7.11
1	3	58.8	15.42	-57.4	-12.03	1.401	5.74
2	4	34.51	12.17	-33.84	-12.18	0.671	2.05
3	4	55	10.83	-54.62	-10.21	0.377	1.08
2	5	64.03	11.69	-62.29	-6.72	1.736	7.29
2	6	45.92	11.8	-44.79	-10.43	1.14	3.46
4	6	49.55	-1.08	-49.28	1.54	0.271	0.94
5	7	-10.98	10	11.08	-10.82	0.1	0.25
6	7	34.17	0.07	-33.88	-0.08	0.292	0.9
6	8	10.91	0.37	-10.9	-0.8	0.013	0.05
6	9	19.2	-14.02	-19.2	15.17	0	1.15
6	10	14.58	21.79	-14.58	-18.8	0	3
9	11	-11.86	-29.87	11.86	31.86	0	1.99
9	10	31.06	14.7	-31.06	-13.5	0	1.2
4	12	31.31	21.87	-31.31	-18.64	0	3.23
12	13	-12	2.58	12	-2.38	0	0.2
12	14	7.71	2.11	-7.64	-1.96	0.075	0.16
12	15	17.54	5.57	-17.33	-5.15	0.213	0.42
12	16	6.86	0.87	-6.81	-0.78	0.043	0.09
14	15	1.44	0.36	-1.43	-0.35	0.005	0
16	17	3.31	-1.02	-3.31	1.04	0.006	0.02
15	18	5.61	0.1	-5.57	-0.04	0.033	0.07
18	19	2.37	-0.86	-2.37	0.87	0.004	0.01
19	20	-7.13	-4.27	7.15	4.32	0.023	0.05
10	20	9.46	5.25	-9.35	-5.02	0.104	0.23
10	17	5.72	6.91	-5.69	-6.84	0.025	0.06
10	21	16.54	12.27	-16.4	-11.97	0.141	0.3
10	22	8.12	6.07	-8.05	-5.92	0.071	0.15
21	22	-1.1	0.77	1.1	-0.77	0	0
15	23	4.95	2.9	-4.92	-2.83	0.032	0.07
22	24	6.96	6.69	-6.85	-6.52	0.105	0.16
23	24	1.72	1.23	-1.71	-1.22	0.006	0.01
24	25	-0.14	1.08	0.14	-1.08	0.002	0
25	26	3.55	2.37	-3.5	-2.3	0.048	0.07
25	27	-3.69	-1.29	3.7	1.33	0.016	0.03
28	27	17.39	2.45	-17.39	-1.3	0	1.15
27	29	13.69	-0.03	-13.29	0.77	0.393	0.74
27	30	0	0	0	0	0	0
29	30	10.89	-1.67	-10.6	2.23	0.294	0.56
8	28	2.24	-1.05	-2.23	-1.21	0.003	0.01
6	28	15.19	0.67	-15.16	-1.24	0.037	0.13
Toplam:						10.056	44.1376

ÖZGEÇMİŞ

Z. Elif AYGEN, 1969 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini İstanbul Özel Işık Lisesinde, orta ve lise öğrenimini İstanbul Özel Amerikan Robert Lisesi'nde tamamladı.1992 yılında İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü mühendis ve 1995 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nı Yüksek Mühendis olarak bitirmiştir.

Z. Elif AYGEN, 1993 yılından beri İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ