



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

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE FACTS CİHAZLARININ OPTİMAL
YERLEŞİM NOKTALARININ BELİRLENMESİ**

HÜSEYİN BAKIR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ALİ ÖZTÜRK**

DÜZCE, 2018

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE FACTS CİHAZLARININ OPTİMAL
YERLEŞİM NOKTALARININ BELİRLENMESİ**

Hüseyin BAKIR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Metin VARAN

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 05/01/2018

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

5 Ocak 2018

Hüseyin BAKIR



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olup beni destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

5 Ocak 2018

Hüseyin Bakır

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
TABLO LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR.....	XI
SİMGELER.....	XII
ÖZET	XIV
ABSTRACT	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. FACTS CİHAZLARI	11
2.1. FACTS DENETLEYİCİLERİNİN ÖNEMİ	11
2.2. FACTS KATEGORİSİ VE ÇEŞİTLERİ	12
2.2.1. Paralel FACTS Denetleyicileri	12
2.2.1.1. Statik Var Kompanzatör (SVC).....	13
2.2.1.2. SVC Uygulamaları ve Kurulumları	16
2.2.1.3. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)	16
2.2.1.4. STATCOM Uygulamaları ve Kurulumları.....	18
2.2.2. Seri FACTS Denetleyicileri.....	19
2.2.2.1. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC)	19
2.2.2.2. TCSC Uygulamaları ve Kurulumları.....	20
2.2.2.3. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC).....	21
2.2.2.4. SSSC Uygulamaları ve Kurulumları.....	21
2.2.2.5. Tristör Anahtarlı Seri Kompanzatör (TSSC)	22
2.2.2.6. Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR).....	22
2.2.3. Seri-Paralel FACTS Denetleyicileri	23
2.2.3.1. Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)	23
2.2.3.2. UPFC Uygulamaları ve Kurulumları	26
2.2.4. Seri-Seri FACTS Denetleyicileri.....	26
2.2.4.1. Hat Arası Güç Akış Kontrolörü (IPFC).....	26
2.2.5. Dağıtılmış FACTS Cihazları.....	27
2.2.5.1. Dağıtılmış Seri Reaktör (DSR)	27

2.2.6. Manyetik Kontrollü Reaktör (MCR).....	28
2.3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SVC VE UPFC KULLANMANIN FAYDALARI	30
2.4. FACTS CİHAZI YATIRIM MALİYETİ.....	31
3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK.....	34
3.1. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIĞININ TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI	35
3.1.1. Rotor Açısı Kararlılığı.....	36
3.1.1.1. Küçük Bozucu Rotor Açısı Kararlılığı	37
3.1.1.2. Büyük Bozucu Rotor Açısı Kararlılığı	37
3.1.2. Frekans Kararlılığı	37
3.1.3. Gerilim Kararlılığı.....	38
3.1.3.1. Gerilim Kararlılığının Tanımı	39
3.1.3.2. Gerilim Çökmesi Olayı	40
3.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIĞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	41
4. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ.....	42
4.1. EMPERYALİST REKABETÇİ ALGORİTMA (ICA).....	42
4.1.1. Başlangıç İmparatorluklarının Oluşturulması	43
4.1.2. Kolonilerin Emperyaliste Hareketi	44
4.1.3. Emperyalist ve Koloni Konumlarının Değişimi.....	45
4.1.4. İmparatorluğun Toplam Gücü	46
4.1.5. Emperyalist Rekabet	46
4.1.6. Zayıf İmparatorlukların Çöküşü	48
4.2. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU (PSO).....	49
4.3. GENETİK ALGORİTMA (GA).....	50
5. OPTİMİZASYON PROBLEMİ.....	52
5.1. IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ	52
5.2. SVC DENETLEYİCİSİ İÇİN AMAÇ FONKSİYONU VE KISITLAR	53
5.2.1. Amaç Fonksiyonu	53
5.2.2. Arama Alanı (Kısıtlar)	53
5.3. UPFC DENETLEYİCİSİ İÇİN AMAÇ FONKSİYONU VE KISITLAR	54
5.3.1. Amaç Fonksiyonu	54
5.3.2. Arama Alanı (Kısıtlar)	55

5.4. OPTİMİZASYON PARAMETRELERİ	55
5.5. ICA YÖNTEMİNİN OPTİMİZASYON PROBLEMİNE UYGULANMASI	56
5.5.1. İmparatorlukların Başlatılması.....	56
5.5.2. Kolonilerin Asimilasyonu.....	59
5.5.3. Emperyalist ve Kolonilerin Konum Değişimi	60
5.5.4. İmparatorluklar Arasında Rekabet.....	60
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	62
6.1. FACTS BAĞLANMADAN ÖNCE IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ	62
6.1.1. P-V Eğrileri	65
6.2. SVC BAĞLI IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ.....	67
6.3. UPFC BAĞLI IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ.....	78
6.4. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	83
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
8. KAYNAKLAR	89
9. EKLER	96
9.1. EK 1: IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN BARA VERİLERİ.....	96
9.2. EK 2: IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN GENERATÖR VERİLERİ	97
9.3. EK 3: IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN HAT VERİLERİ.....	98
ÖZGEÇMİŞ	99

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. SVC güç akışı modeli.	13
Şekil 2.2. TCR tek hat şeması.	14
Şekil 2.3. TSC tek hat şeması.	14
Şekil 2.4. TSR tek hat şeması.	15
Şekil 2.5. SVC tek hat şeması.	15
Şekil 2.6. SVC'ye ait I-V karakteristiği.	15
Şekil 2.7. STATCOM'un şematik gösterimi.	17
Şekil 2.8. STATCOM'un I-V karakteristiği.	17
Şekil 2.9. TCSC'nin temel yapısı.	19
Şekil 2.10. TCSC tarafından enjekte edilen akım.	20
Şekil 2.11. SSSC şematik diyagramı.	21
Şekil 2.12. TSSC şematik diyagramı.	22
Şekil 2.13. TCSR devre konfigürasyonu.	22
Şekil 2.14. UPFC tek hat şeması.	24
Şekil 2.15. UPFC voltaj enjektörü.	24
Şekil 2.16. Vdq değişimine bağlı olarak elde edilen Vx vektörü.	25
Şekil 2.17. $\delta 1$ açısının oluşumu.	25
Şekil 2.18. IPFC şematik gösterimi.	26
Şekil 2.19. DSR modülünün şeması.	27
Şekil 2.20. İletim hatlarında DSR modüllerinin konumu.	28
Şekil 2.21. MCR'nin temel düzeni.	29
Şekil 2.22. MCR'nin bileşenleri.	30
Şekil 2.23. FACTS yatırım maliyet eğrileri.	33
Şekil 3.1. Sistem güvenliğini sağlamak için akış şeması.	34
Şekil 3.2. IEEE/CIGRE güç sistemi kararlılığı sınıflandırması.	36
Şekil 4.1. Emperyalist rekabetçi algoritmanın akış şeması.	42
Şekil 4.2. İlk imparatorlukların oluşturulması.	44
Şekil 4.3. Kolonilerin ilgili emperyaliste doğru hareketi.	44
Şekil 4.4. Kolonilerin ilgili emperyaliste doğru sapma açısı ile hareketi.	45
Şekil 4.5. Koloni ve emperyalist pozisyonlarının değişimi.	46
Şekil 4.6. Pozisyon değişimi sonrası bütün imparatorluk.	46
Şekil 4.7. Emperyalist rekabet.	47
Şekil 4.8. Zayıf imparatorlukların çöküşü.	48
Şekil 4.9. PSO akış şeması.	50
Şekil 4.10. GA akış şeması.	51
Şekil 5.1. IEEE-30 baralı güç sisteminin tek hat şeması.	52
Şekil 6.1. Optimizasyon öncesi bara gerilim seviyesi.	64
Şekil 6.2. Bara 20'nin P-V eğrisi.	66
Şekil 6.3. Bara 24'ün P-V eğrisi.	66
Şekil 6.4. Bara 26'nın P-V eğrisi.	66
Şekil 6.5. Bara 30'un P-V eğrisi.	67
Şekil 6.6. GA ve PSO yöntemleri ile SVC'nin optimal konumlandırılması sonucu	

elde edilen bara gerilim değerleri.	68
Şekil 6.7. ICA yöntemi ile SVC'nin optimal konumlandırılması sonucu elde edilen bara gerilim değerleri.	69
Şekil 6.8. SVC konumuna bağlı olarak aktif güç kayıplarının seviyesi.	83
Şekil 6.9. UPFC sayısına bağlı olarak aktif güç kayıplarının seviyesi.	84
Şekil 6.10. Algoritmaların yakınsama sürelerinin karşılaştırılması.	84
Şekil 6.11. Bir UPFC kullanıldığında ortalama bara voltajı.	85
Şekil 6.12. İki UPFC kullanıldığında ortalama bara voltajı.	85
Şekil 6.13. Üç UPFC kullanıldığında ortalama bara voltajı.	86



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Çeşitli FACTS cihazlarının özellikleri.	31
Tablo 5.1. Optimizasyon için kullanılan ICA parametreleri.	56
Tablo 5.2. Optimizasyon için kullanılan PSO parametreleri.	56
Tablo 5.3. Optimizasyon için kullanılan GA parametreleri.	56
Tablo 6.1. IEEE-30 baralı güç sisteminin hat akışı simülasyonu.	63
Tablo 6.2. IEEE-30 baralı güç sisteminin tanjant vektör değerleri.	65
Tablo 6.3. Optimizasyon sonrası SVC boyut ve konum verileri.	68
Tablo 6.4. Bara 30'a SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.	69
Tablo 6.5. Bara 30'a SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.	70
Tablo 6.6. Bara 26'ya SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.	71
Tablo 6.7. Bara 26'ya SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.	72
Tablo 6.8. Bara 24'e SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.	74
Tablo 6.9. Bara 24'e SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.	75
Tablo 6.10. Bara 20'ye SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.	76
Tablo 6.11. Bara 20'ye SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.	77
Tablo 6.12. IEEE-30 baralı güç sisteminde UPFC için optimal konum verileri.	78
Tablo 6.13. Bir UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.	79
Tablo 6.14. İki UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.	80
Tablo 6.15. Üç UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.	82
Tablo 6.16. SVC'nin farklı algoritmalarla optimal konumlandırılması sonucu kayıpların özeti.	83
Tablo 9.1. IEEE-30 baralı güç sisteminin bara verileri.	96
Tablo 9.2. IEEE-30 baralı güç sisteminin generatör verileri.	97
Tablo 9.3. IEEE-30 baralı güç sisteminin hat verileri.	98

KISALTMALAR

ABC	Yapay arı koloni algoritması
AC	Alternatif akım
ATC	Mevcut transfer kapasitesi
BF	Bara voltaj indeksi
BSA	Geri izleme arama algoritması
CIGRE	Uluslararası büyük elektrik sistemleri konseyi
DC	Doğru akım
D-FACTS	Dağıtılmış esnek alternatif akım iletim sistemleri
DSR	Dağıtılmış seri reaktör
EPRI	Elektrik güç araştırma enstitüsü
FACTS	Esnek alternatif akım iletim sistemleri
GA	Genetik algoritma
GSA	Yer çekimi arama algoritması
GTO	Kapıdan kesmeli tristör
FA	Ateş böceği algoritması
ICA	Emperyalist rekabetçi algoritma
IEEE	Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü
IPFC	Hat arası güç akış kontrolörü
LF	Hat akış indeksi
MATLAB	Matrix laboratory
MCR	Manyetik kontrollü reaktör
MVAR	Megavar
PSAT	Power system analysis toolbox
PSO	Parçacık sürüsü optimizasyonu
SM	Elektromekanik anahtar
SSSC	Statik senkron seri kompanzatör
STATCOM	Statik senkron kompanzatör
STT	Tek dönüşlü transformatör
SVC	Statik var kompanzatör
TCPST	Tristör kontrollü faz kaydırma transformatörü
TCR	Tristör kontrollü reaktör
TCSR	Tristör kontrollü seri reaktör
TSC	Tristör anahtarlı kondansatör
TSR	Tristör anahtarlı reaktör
TSSC	Tristör anahtarlı seri kompanzatör
TSCS	Tristör kontrollü seri kompanzatör
UPFC	Birleşik güç akış kontrolörü

SİMGELER

B	Süseptans
Base_KV	Baz gerilim değeri
Bus_Type	Bara tipi (1=PQ, 2=PV, 3=referans)
B_{svc}	SVC süseptansı
C	Kurulum maliyeti fonksiyonu
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt saat
H	Atalet sabiti
IC	Minimum kurulum maliyeti
I_{svc}	SVC akımı
i_{sh}	Şönt enjekte edilen akım
kW	Kilowatt
K	Kompanzasyon aralığı
kV	Kilovolt
Mbase	Baz güç değeri
MVA	Megavolt amper
MW	Megawatt
N	Generatörün bağlı olduğu bara numarası
P	Güç
PG	Generatörün aktif güç değeri
Pmax	Maksimum güç değeri
Pmin	Minimum güç değeri
p.u	Birim değer
rad	Radyan
R	Direnç
s	FACTS cihazlarının çalışma seviyesi
V_s	Gönderici uçtaki voltaj kaynağı
V_{se}	Seri enjekte edilen gerilim
V_r	Alıcı bölgedeki voltaj kaynağı
V_{dq}	Seri enjekte edilen voltaj
VA	Gerilim açısı (derece)
Vmax	Maksimum gerilim büyüklüğü
VM	Gerilim büyüklüğü
Vmin	Minimum gerilim büyüklüğü
V_k	k barasının gerilimi
V_{ref}	Referans gerilim değeri
V	Gerilim
X	Reaktans
X_L	Endüktif reaktans
X_C	Kapasitif reaktans
X_{TCSC}	TCSC tarafından enjekte edilen reaktans
Q_{svc}	SVC tarafından enjekte edilen reaktif güç
QG	Generatör reaktif güç değeri
Qmax	Maksimum reaktif güç
Qmin	Minimum reaktif güç
ζ	Emperyalist rekabetçi algoritma parametresi

α	Tetikleme açısı
$\emptyset_{se}$	Seri enjekte edilen gerilimin açısı
λ_{max}	Maksimum yüklenme değeri



ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDE FACTS CİHAZLARININ OPTİMAL YERLEŞİM NOKTALARININ BELİRLENMESİ

Hüseyin BAKIR

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Ocak 2018, 98 sayfa

Enerjiye duyulan ihtiyacın artması ve yeni iletim hattı inşa etmedeki zorluklardan dolayı mevcut iletim hatlarının yüksek verim ve güvenilirlikte çalıştırılması gerekir. Yeni iletim hatları veya üretim tesisleri kurmak yerine daha düşük yatırımlarla Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazlarını kullanarak güç sisteminin performansı artırılır. Böylece mevcut iletim hatlarının daha verimli kullanılması sağlanır. FACTS denetleyicileri işletim zorluklarına cevap vermek için teknik çözümler sunar. Bu çözümler; gücün devamlı kontrolü, iletim hatlarının termal limitler dahilinde güvenli bir şekilde yüklenmesi ve tam kapasiteli kullanımı, aşırı yüklü iletim hatlarının rahatlatılması yoluyla sistem kayıplarının en aza indirgenmesi ve sistem kararlılığının artırılmasıdır. FACTS denetleyicilerinin maliyetinin yüksek olması nedeniyle her baraya eklenmesi mümkün değildir. Bu sebepten dolayı sınırlı sayıdaki FACTS kontrolörlerinin güç sistemlerinde en uygun konuma yerleştirilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında, Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSO), Genetik Algoritma (GA) ve Emperyalist Rekabetçi Algoritma (ICA) yöntemlerini kullanarak IEEE-30 baralı güç sisteminde Statik Var Kompanzator (SVC) ve Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) cihazlarının optimal yerleşimi gerçekleştirilmiştir. SVC denetleyicisinin PSO, GA ve ICA yöntemlerini kullanarak optimal konumlandırılması ile aktif güç kayıplarının seviyesi incelenmiştir. PSO ve GA yönteminde SVC için optimal konumun 26 ve 30 numaralı baralar, ICA yönteminde ise 20 ve 24 numaralı baralar olduğu belirlenmiştir. Kayıpların azaltılması bakımından en başarılı yöntem ICA optimizasyon tekniğidir. UPFC'nin PSO, GA ve ICA yöntemleri ile optimal konumlandırılması sonucu kullanılan UPFC sayısına bağlı olarak kayıpların seviyesi ve baraların ortalama gerilim seviyesi incelenmiştir. ICA yöntemi ile belirlenen noktalara UPFC ilave edildiğinde kayıplar en aza indirilmiş ve maksimum gerilim iyileştirmesi sağlanmıştır. Sonuçlar SVC ve UPFC denetleyicilerinin optimal yerleşim noktalarının belirlenmesinde en başarılı yöntemin ICA optimizasyon yöntemi olduğunu göstermiştir. Güç sistemi ve FACTS cihazlarının modellenmesi için MATLAB programı kullanılmıştır.

Anahtar sözcükler: Emperyalist rekabetçi algoritma, FACTS cihazları, Güç akışı, Optimal yerleşim.

ABSTRACT

DETERMINATION OF OPTIMAL SETTLEMENT POINTS OF FACTS DEVICES IN POWER SYSTEMS

Hüseyin BAKIR

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and
Electronics Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

January 2018, 98 pages

Due to the increasing need for energy and the difficulties of building a new transmission line, existing transmission lines must be operated with high efficiency and reliability. Instead of establishing new transmission lines or production facilities, the performance of the power system is enhanced by using Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) devices with lower investments. Thus, more efficient use of existing transmission lines is ensured. FACTS controllers provide technical solutions to meet operational challenges. These solutions are continuous control of power, reliable loading and full utilization of transmission lines within thermal limits, minimization of system losses by minimizing overloaded transmission lines, and increased system stability. Because of the high cost of the FACTS controllers it is not possible to add them to each bus. For this reason, a limited number of FACTS controllers should be placed in the most appropriate position in the power systems. In this thesis, optimal placement of Static Var Compensator (SVC) and Unified Power Flow Controller (UPFC) devices in IEEE-30 bus power system has been realized by using Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA) and Imperialist Competitive Algorithm (ICA) methods. The level of active power losses was investigated by the optimal placement of the SVC controller with PSO, GA and ICA methods. Optimal location for SVC in PSO and GA method is determined as 26 and 30 buses, and ICA method is 20 and 24 buses. It has been determined that ICA optimization technique is the most successful method for reducing losses. Optimal placement of UPFC with PSO, GA and ICA methods the level of losses and the mean voltage level of the buses were investigated based on the number of UPFC used. When UPFC is added to the points determined by ICA method, the losses are reduced to the minimum and maximum voltage recovery is provided. The results show that the most successful method of determining the optimal placement of SVC and UPFC controllers is the ICA optimization method. The MATLAB program was used to model the power system and FACTS devices.

Keywords: FACTS devices, Imperialist competitive algorithm, Optimal placement, Power flow.

1. GİRİŞ

FACTS cihazları, güç sistemleri kontrol edilebilirliğini artırmak, iletim hatlarının yapısındaki tüm sınırlı koşulları iyileştirmek ve bölgeler arasındaki güç aktarımını sağlamak için kullanılır. FACTS denetleyicileri güç sistemi çalışmasında iyileşme ve güç aktarım yeteneğinde artış sağlar. Artan enerji talebi gerekli gücü sağlamak için ekstra iletim hatlarının kurulumunu gerektirir. Bu durumda birçok araştırma, gerekli olan gücü sağlayabilmek için yeni teknoloji ve yöntemlerin kullanılma zorunluluğunu ortaya koymuştur [1].

Elektrik güç sistemi; generatörler, iletim hatları, çeşitli yükler ve transformatörleri içeren ve karmaşık bir şekilde birbirine bağlı yapıdır. FACTS cihazları, Alternatif Akım (AC) iletim sisteminin kontrol edilebilirliğini, kararlılığını ve güç aktarım kapasitesini artırmak için kullanılan yüksek voltajlı, büyük güçlü elektronik dönüştürücülerdir. Artan güç talebi ve modern güç sistemlerinin gelişmesi, güç sistemlerinin incelemesinde gittikçe artan bir karmaşıklığa yol açmıştır. Bu durum güç sistemi kararlılığına yeni zorluklar getirmiştir. Güç sistemindeki dengesizlikler değişen sistem yükleri ve sistemdeki diğer öngörülemeyen bozukluklardan kaynaklanmaktadır. Bu istikrarsızlıklar iletim hattında güç akışının azalmasına veya sistem çöküşüne neden olmaktadır. FACTS cihazları, kontrollü güç aktarım kabiliyeti ile iletim sistemlerini dengelemektedir. FACTS cihazlarının sağladığı en önemli avantaj, mevcut hattın iletim kapasitesini artırarak yüksek gerilim iletim hatlarının veya yeni enerji üretim tesislerinin kurulumunu geciktirmesidir [2].

Günümüzde modern güç sistemleri işletme ve yapısındaki karmaşıklıktan dolayı birçok problem ile karşı karşıya kalmaktadır. Son dönemlerde dikkat çeken en önemli problem güç sistemi kararsızlığıdır. Güç sistemindeki kararsızlık, FACTS denetleyicileri olarak adlandırılan güç elektroniği tabanlı cihazların yardımı ile önlenabilir [3],[4]. Güç sisteminde FACTS cihazlarının kullanılması sadece güç sistemi kararlılığını iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda güç sistemine işletme esnekliği de sağlar. Buna ek olarak FACTS teknolojisi güç sistemi performansını artırarak mevcut iletim ve üretim rezervlerinin daha iyi kullanılmasını sağlar [5].

Güç sistemindeki en büyük sorun, normal işletim esnasında ve beklenmeyen koşullar altında, bara voltajı, reaktif güç ve aktif güç gibi sistem parametrelerini kabul edilebilir seviyede tutmaktır. Bu sistem düzenleme problemidir ve sistemde meydana gelen bir arıza sonrasında senkronizasyonu sağlamak oldukça önemlidir. Çünkü hatalar senkronizma durumunun bozulmasına sebep olabilir. İstikrarsızlık etkileri olarak, yalıtkanlardaki kirlilik, sistemin aşırı yüklenmesi, alıcı uçta kontrolsüz yüklere sahip hatlar, yerel reaktif güç eksikliği, iç faktörler ve zorlu hava koşulları gösterilebilir [6],[7].

Mevcut güç sisteminin kullanımı, gelişmiş güç elektroniği teknolojilerinin uygulanmasıyla iyileştirilebilir. FACTS cihazları işletim zorluklarına cevap vermek için teknik çözümler sunmaktadır. FACTS denetleyicileri, voltaj regülasyonu, güç akışı kontrolü ve sistem sönümlemesi gibi çok sayıda kontrol fonksiyonuna sahiptir [8]. FACTS cihazlarını kullanarak iletim hatları için seri ve şönt kompanzasyon yapılabilir. Seri kompanzasyonda hat empedansı değiştirilir ki bu net empedansın azalması anlamına gelir ve böylece iletilebilir etkin güç artar. Şönt kompanzasyonda ise bağlantı noktasındaki gerilimi ayarlamak amacıyla hatta reaktif güç enjekte edilir. FACTS cihazları seri kompanzasyon, şönt kompanzasyon, seri-seri kompanzasyon ve seri-şönt kompanzasyon özelliklerine sahiptir [9].

FACTS denetleyicileri bağlı olduğu güç sistemlerinde, hem sistem kararlılığını daha iyi hale getirir hem de kısa ve uzun vadede iletim hatlarının yüklenme kapasitesinin artmasını sağlayan reaktif güç kontrolü ve gerilim kontrolü ile güç sistemlerini optimize eder. FACTS cihazlarının kullanımı ile gerilim, açı ve empedans değeri kontrol edilmiş, gerilim desteği artırılmış ve geçici kararlılık önemli ölçüde geliştirilmiş olur [8].

Yüksek hızlı güç elektroniği tabanlı FACTS'lerin kullanılması ile geçmişte gerçekleştirilemeyen çok sayıda önemli işlemsel fonksiyonlar artık kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan bazıları; [10]

- Önceden tanımlı rotalarda gücün geniş aralıkta devamlı kontrolü
- İletim hatlarının termal limitler dahilinde güvenli bir şekilde yüklenmesi ve tam kapasiteli kullanımı
- Aşırı yüklü iletim hatlarının rahatlatılması yoluyla sistem kayıplarının en aza indirgenmesi
- Sistem güvenilirliği ve kararlılığının artırılması
- Güç sisteminde meydana gelen osilasyonların sönümlemesi.

Güç sistemlerinde FACTS cihazlarının kullanımı ve reaktif güç kontrolü alanında literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda ilk olarak reaktif güç kontrolü yöntemleri araştırılmıştır ve buradan yola çıkarak FACTS cihazlarının fonksiyonlarının prensipleri açığa çıkarılmıştır. Daha sonra ise modelleme, analiz ve kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

FACTS cihazlarının kurulum maliyetinin yüksek olması nedeniyle her baraya FACTS cihazı eklemek mümkün değildir. Bu sebepten dolayı güç sistemlerinde FACTS cihazlarının en uygun bölgeye yerleştirilmesi gerekir. FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi ve sistem kararlılığına etkisi konulu literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Aşağıda FACTS denetleyicilerinin optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi ile ilgili özellikle son 10 yılda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Idris ve arkadaşları 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada iletim hattının mevcut kapasitesini artırmak için FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesinde Diferansiyel Evrim (DE) algoritmasını kullanmıştır. Bu çalışmada DE yöntemi FACTS cihazlarının konum ve tipini tespit etmektedir. Optimizasyonda üç tip FACTS cihazı kullanılmıştır. Bunlar; Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC), Statik Var Kompanzatör (SVC) ve Tristör Kontrollü Faz Kaydırma Transformatörü (TCPST)'dür. Simülasyonlar IEEE-30 baralı güç sisteminde gerçekleştirilmiştir. Güç sistemi her birinde iki generatör bulunan üç bölgeye ayrılmıştır. Güç sistemine dahil edilen SVC'nin çalışma aralığı -100 MVAR ile 100 MVAR arasındadır. Ayrıca, hat reaktansını değiştiren bir TCSC, iletim hattına seri bağlanmıştır. TCSC'nin çalışma aralığı $-0.7 X_{Line}$ ve $0.2 X_{Line}$ arasındadır. Bu çalışmanın temel amacı; gerilim sınırı, termal limit ve FACTS limitlerine tabi olan güç aktarım yeteneğini en üst düzeye çıkarmak için FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesidir. Simülasyon sonuçlarından DE algoritması kullanıldığında Mevcut Transfer Kapasitesi (ATC)'nin 211.98 MW'dan 233.98 MW'a yükseldiği, GA yöntemi kullanıldığında ise 231.96 MW'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, DE algoritması GA algoritmasından daha hızlı ve daha iyi bir çözüm bulmuştur [11].

Shaheen ve arkadaşları 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada evrimsel optimizasyon tekniklerini kullanarak Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) için en uygun konumu araştırmışlardır. Bu çalışmada, IEEE-14 baralı güç sistemi analiz edilmiştir. Güç sistemine GA ve PSO yöntemleri uygulanmıştır. UPFC, sistemdeki güç akışını kontrol

etmek için en önemli ve kullanışlı FACTS aygıtlarından biridir. Bu çalışmada, güç sistemindeki aktif güç kayıplarını en aza indirmek için sisteme UPFC eklenmiştir. UPFC için en uygun yeri bulmak amacıyla iki evrimsel optimizasyon tekniği seçilmiş ve daha sonra her iki sonuç da karşılaştırılmıştır. Burada güç sisteminin aktif güç kaybını en aza indirgeyen tek bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bu analizde, bara gerilim büyüklüğü, gerilimin açısı ve reaktif güç, minimum ve maksimum değer tanımlarıyla kısıtlar olarak kabul edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre GA yönteminin PSO'dan daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Sayısal sonuçlarla ilgili olarak, GA kullanıldığında minimum kayıp değeri 0.1198 p.u, ortalama kayıp değeri 0.1235 p.u ve hesaplama süresi 76.9 saniyedir. Fakat PSO tekniği kullanıldığında minimum kayıp değeri 0.1198 p.u, ortalama kayıp değeri 0.1257 p.u ve hesaplama süresi 39.4 saniyedir. Bu çalışmada, bu teknikler IEEE-3 baralı ve IEEE-5 baralı güç sistemlerine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, GA'nın kayıpların azaltılması bakımından PSO tekniğinin ise yakınsama karakteristiği açısından daha avantajlı olduğunu göstermiştir [12].

Sheeba ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada yapay zeka tekniklerini kullanarak SVC'nin optimal konumunu belirlemişlerdir. Bu çalışmada daha düşük maliyet ve yüksek sistem geliştirme özelliği nedeniyle SVC kullanılmıştır. IEEE-14 baralı güç sisteminde SVC cihazının optimal yerleşim noktalarını belirlemek için GA ve PSO algoritmaları kullanılmıştır. SVC'nin optimal yerleşim noktalarını tespit etmek için gerilim saptırma amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Gerilim büyüklüğü ve reaktif güç, maksimum ve minimum sınırlarıyla birlikte optimizasyon kısıtları olarak değerlendirilmiştir. Hem GA hem de PSO algoritmaları aynı noktaları belirlemiştir. Her iki yöntemle göre SVC'ler için optimal konumun 7 ve 13 numaralı baralar olduğu tespit edilmiştir. SVC olmadığında gerilim saptırma 0.56 p.u değerinde iken, SVC'nin optimal yerleşimi ile bu değer 0.28 p.u değerine düşmüştür [13].

Mondal ve arkadaşları tarafından 2011 yılında gerçekleştirilen çalışmada SVC'nin konum ve parametre ayarı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada IEEE-14 baralı güç sistemi yalnızca bir amaç fonksiyonu ile analiz edilmiştir. Optimizasyon problemi PSO ve GA algoritmalarını kullanarak optimal konum ve en iyi FACTS parametrelerini bulmayı amaçlamaktadır. FACTS cihazlarının yeteneği ve performansı, güç sistemi bozukluklarıyla ilişkili olarak karşılaştırılmıştır. Kritik özdeş ve zaman yanıt analizinin karakteristikleri PSO tabanlı FACTS cihazlarının, kritik yüklenme esnasında bile GA tabanlı FACTS cihazlarından daha hızlı olduğunu ortaya koymuştur [14].

Bhowmik ve arkadaşları tarafından 2012 yılında gerçekleştirilen çalışmada aktif güç kayıplarının minimize edilmesi için PSO algoritması tabanlı UPFC'nin optimal konumunu tespit eden yöntem geliştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları için IEEE-14 baralı güç sistemi kullanılmıştır. Bu çalışmada kompanzasyon için UPFC denetleyicisi kullanılmıştır. Güç sistemlerinde FACTS cihazlarının optimal yerleşimi ile aktif güç kayıplarını en aza indirmek için PSO ve GA teknikleri kullanılmıştır. Optimizasyonda iki adet amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Optimizasyon kısıtları FACTS cihazının voltaj büyüklüğü, açısı ve boyutudur. Elde edilen sonuçlara göre GA ile toplam kayıplar 0.85 p.u azaltılmıştır. PSO tekniği ile toplam kayıplar 0.56 p.u azalmıştır. UPFC için algoritma tarafından belirlenen optimal yerleşim noktaları 4-9, 13-6 ve 4-3 numaralı hatlardır [15].

Rekha ve Kannan 2013 yılında yaptıkları çalışmada düzensiz güç sisteminde çeşitli teknikler kullanarak reaktif güç optimizasyonu üzerine karşılaştırmalı bir analiz sunmuşlardır. Bu çalışmada IEEE-30 baralı güç sisteminin bara voltajlarını nominal değerler içinde tutmak ve gerilim profilini geliştirmek için FACTS cihazları kullanılmıştır. Bu bağlamda PSO ve GA algoritmaları kullanılmıştır. Reaktif güç ve gerilim sapmasını en aza indirmek için iki amaç fonksiyonu kullanılmıştır. GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirildiğinde reaktif gücün % 4.9 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. PSO ile optimizasyon gerçekleştirildiğinde ise reaktif gücün % 7.1 oranında azaldığı tespit edilmiştir [16].

Rashed ve arkadaşları tarafından 2007 yılında gerçekleştirilen çalışmada GA ve PSO teknikleri kullanılarak güç sisteminin yüklenebilirliğini arttırmak için birden fazla TCSC'nin optimal konumu ve parametre ayarı sunulmuştur. Bu çalışmada IEEE-6 ve IEEE-14 baralı güç sistemleri kullanılmıştır. Güç sisteminde maksimum sistem yüklenebilirliği elde etmek için TCSC kullanmıştır. Amaç fonksiyonunda iki parametre vardır. Birinci parametre FACTS cihazının maliyetiyle, ikinci parametre ise bara gerilimi ile ilgilidir. Simülasyon sonuçlarından GA ve PSO teknikleri kullanılarak TCSC denetleyicisinin optimal konumlandırılması ile yüklenebilirliğin % 15 oranında arttığı gözlemlenmiştir [17].

Lu ve arkadaşları 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada Geri İzleme Arama Algoritmasını (BSA) kullanarak FACTS cihazları için en uygun konumun tespitini gerçekleştirmişlerdir. IEEE-30 ve IEEE-118 baralı güç sistemleri analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, FACTS cihazlarının kullanımı ile sistem performansının ve güç kalitesinin arttığını göstermiştir. Bu çalışmada BSA, GA ve PSO teknikleri kullanılarak

optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonun amacı, aktif güç kayıplarını en aza indirmek ve gerilim profilini geliştirmektir. IEEE-118 baralı güç sisteminde GA yönteminde güç kaybının 320.18 MW, PSO'da 359.64 MW ve BSA'da 297.62 MW olduğu gözlemlenmiştir. IEEE-30 baralı güç sistemi örneğinde, GA'daki güç kaybı için nihai çözüm 12.07 MW, PSO'da 8.21 MW, BSA'da 6.49 MW'dır. Elde edilen sonuçlara göre, BSA'nın PSO ve GA yöntemlerinden daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir [18].

Mohammadi ve Jazaeri'nin 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada güç sistemi planlamasında SVC cihazının optimal konumu için hibrit PSO algoritması önerilmiştir. Simülasyon için IEEE-68 baralı güç sistemi dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, iki parametre içeren bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Birinci parametre, baralardaki gerilim profili ile ilgilidir. İkinci parametre ise işletme ve kurulum maliyeti ile ilgilidir. Optimizasyonun amacı, güç sistemlerinde FACTS cihazlarının konumu için en uygun yeri bulmaktır. Elde edilen sonuçlara göre, GA yöntemi SVC için en uygun konumun 34 numaralı bara olduğunu belirlemiştir. FACTS cihazının sisteme dahil edilmesinden sonra toplam güç kaybı 0.35 p.u azalmıştır. PSO algoritması FACTS cihazı için en uygun konumun 31 numaralı bara olduğunu belirlemiştir. Bu yöntem ile toplam güç kaybında 0.46 p.u azalma olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma PSO-GA algoritması olarak adlandırılmıştır. Hibrit algoritma FACTS için en uygun konumun 50 numaralı bara olduğunu belirlemiştir. Hibrit algoritma ile toplam güç kaybı 0.88 p.u azaltılmıştır. Hibrit algoritmanın kayıpların azaltılmasında PSO ve GA yöntemine göre daha avantajlı olduğu gösterilmiştir [19].

Valle ve arkadaşları 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi için geliştirilmiş PSO yöntemini önermişlerdir. Bu çalışmada kullanılan güç sistemi 45 Baralı Brezilya şebekesidir. Güç sistemi PSO tekniği ile optimize edilmiş ve ilgili sonuçlar Yapay Arı Koloni (ABC) algoritması ve GA yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyonda iki amaç fonksiyonu vardır. Birincisi gerilim sapmasını en aza indirmeyi, ikincisi ise FACTS boyutunu en aza indirmeyi amaçlamaktadır [20].

Kheirizad ve arkadaşları 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada güç sistemi planlamasında FACTS cihazlarının optimal konumlandırılmasını araştırmışlardır. Bu çalışmada simülasyon için IEEE-68 baralı güç sistemi kullanılmıştır. FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının tespiti için PSO ve GA yöntemleri kullanılmıştır. GA yöntemi 34 numaralı baranın SVC için en uygun konum olduğunu belirlemiştir. Toplam

güç kaybı azalması 0.35 p.u değerindedir. PSO tekniği 31 numaralı baranın SVC için en uygun konum olduğunu belirlemiştir. Toplam güç kaybı azalması 0.46 p.u değerindedir. GA yönteminin kayıpların azaltılmasında daha etkili olduğu gözlemlenmiştir [21].

Kowsalya ve arkadaşları tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmada UPFC'nin optimal konumlandırılması yoluyla gerilim kararlılığını artırma yöntemi sunulmuştur. UPFC'nin en iyi konumunu tahsis ederek sistemin genel kararlılık marjını artırmak için yeni gerilim kararlılığı endeksi önerilmiştir. Kullanılan L-index değeri 0 ve 1 arasında değişir. Yük akışı analizine göre, model en zayıf barayı çıkarır ve L-index değerine göre UPFC konumlandırılır. IEEE-9 baralı güç sistemindeki analizler, UPFC'nin optimal konumunun 9 ve 6 numaralı baralar arası olduğunu göstermiştir. IEEE-30 baralı güç sistemindeki analizlerden ve sonuçlardan, UPFC için optimal konumun 25 ve 26 numaralı baralar arası olduğu belirlenmiştir [22].

Jahani 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada ICA yönetimini kullanarak güç sistemlerinde UPFC için optimal yerleşimi gerçekleştirmiştir. Analiz, IEEE-14 baralı sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu Hat Akış İndeksi (LF) ve Bara Voltaj İndeksini (BF) kullanmaktadır. Gerilim seviyesi 0.95 ile 1.05 p.u arasında sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada iki senaryo düşünülmüştür. İlk senaryoda tek UPFC, ikinci senaryoda ise iki UPFC kullanılmıştır. Birinci senaryoda UPFC için en iyi konumun 9-4 numaralı baralar arası olduğu belirlenmiştir. Sistemde iki UPFC kullanıldığında en iyi sonuç, 3-4 numaralı baralar ile 5-6 numaralı baralar arasındadır [23].

Jayanti ve Goswami tarafından 2014 yılında gerçekleştirilen çalışmada Yerçekimi Arama Algoritması (GSA) kullanarak birden fazla UPFC yerleşimi için çözüm önerilmiştir. Sonuçları göstermek için IEEE-14, IEEE-30 ve IEEE-57 baralı güç sistemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada maliyet ve kayıpları en aza indirmek için tek ve üç UPFC kullanılmıştır. IEEE-14, IEEE-30 ve IEEE-57 baralı güç sistemleri için optimal konumlar sırasıyla 10-11, 21-22, 27-28 numaralı baralar arasındadır [24].

Bhattacharyya ve arkadaşları 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada güç sisteminin ekonomik işletimi için seri ve şönt FACTS denetleyicisi olan UPFC'yi önermişlerdir. Bu çalışmada, iletim kayıplarını en aza indirmek için GA yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntem FACTS cihazlarının optimal konumunu belirlemek için IEEE-30 baralı güç sistemine uygulanmıştır. Algoritma TCSC'yi 28 ve 20 numaralı baralar arasına SVC'yi

17 ve 21 numaralı baralara, UPFC'yi 3-4 numaralı baralar arasına yerleştirmiştir. FACTS cihazlarının optimal konumunun tespiti için iki senaryo düşünülmüştür. İlk senaryoda TCSC seri kontrolör ve SVC şönt kontrol cihazı, güç sisteminin ekonomik çalışmasını sağlamak için güç sistemi değişkenleri ile birlikte kullanılmıştır. İkinci senaryoda UPFC aktif güç kayıplarını ve sistem işletim maliyetini en aza indirmek için seri ve şönt FACTS bileşenleri ile birlikte kullanılmıştır. UPFC'nin kullanılması ile işletme maliyeti ve aktif güç kayıpları keskin bir şekilde azaltılmıştır [25].

Ramesh ve Reddy 2013 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada Ateş Böceği (FA) algoritmasını kullanarak UPFC denetleyicisinin optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi yoluyla kayıpların azaltılmasını sağlamışlardır. Bu çalışmanın amacı, güç kayıplarını azaltmak ve güç şebekelerindeki gerilim profilini geliştirmektir. Önerilen tekniğin etkisini göstermek için IEEE-14 ve IEEE-30 baralı güç sistemlerinde analizler yapılmıştır. Ayrıca, yükleme koşullarının normal ve % 150 olduğu durumlarda simülasyon gerçekleştirilmiştir. Program IEEE-30 baralı güç sisteminde UPFC'yi 27-30 numaralı baralar arasında konumlandırmıştır. Sistem kayıpları açısından, her iki algorithmada normal yüklenme durumunda aynı çözüme ulaşmıştır. Fakat % 150 yüklenme durumunda FA algoritmasının GA yönteminden daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [26].

Nwohu 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada Nijerya güç sistemi için UPFC'nin optimal yerleşim noktalarını belirlemiştir. Bu çalışmada toplam aktif güç kaybının duyarlılığına dayalı olarak UPFC için en uygun konum tespit edilmiştir. UPFC'nin optimal yerleşim noktalarını belirlemek için aktif güç kaybı duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu indeks her hat için hesaplanmış en yüksek kayıp duyarlılığı endeksine sahip olan hatta UPFC dahil edilmesi önerilmiştir [27].

Laifa ve Boudour 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada PSO yöntemini kullanarak UPFC cihazı için optimal yerleşim ve parametre ayarını gerçekleştirmiştir. Amaç fonksiyonu, minimum aşırı yüklenme ve voltaj güvenlik seviyesi ile aktif ve reaktif güç akışı kontrol ayarını gerçekleştirmeyi hedeflemektedir [28].

Izadpanah Tous ve arkadaşları tarafından 2012 yılında gerçekleştirilen çalışmada gerilim kararlılığı için UPFC'nin optimal yerleşimi sunulmuştur. Bu çalışmada UPFC, şebeke yüklerinde meydana gelen artışa bağlı olarak voltaj düşme duyarlılığına göre tahsis edilmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliğini göstermek için simülasyon çalışmalarında

IEEE-14 baralı güç sistemi kullanılmıştır. Algoritma UPFC'yi 9 ve 10 numaralı baralar arasında konumlandırmıştır. UPFC'nin güç sistemine dahil edilmesi ile gerilim profili seviyesinin tüm baralarda geliştirildiği gözlemlenmiştir [29].

Reddy ve Verma 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada sistemde beklenmedik bir gelişme olduğunda gerilim kararlılık marjını artırmak amacıyla UPFC'nin optimal yerleşimi için bir yöntem önerdiler. Önerilen yöntemin geçerliliğini göstermek için 75 Baralı Hindistan güç sistemi kullanılmıştır. UPFC için optimal konumun 29 ve 38 numaralı baralar arası olduğu gözlemlenmiştir. UPFC'nin optimal konumlandırılması ile gerilim istikrar marjı en büyük değerine ulaşmıştır [30].

Literatürde güç sistemlerinde FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar referans alınarak yapılan olan bu tez çalışmasında PSO, GA ve ICA yöntemlerini kullanarak IEEE-30 baralı güç sisteminde SVC ve UPFC cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma ağırlıklı olarak güç şebekelerinin optimizasyonu üzerine odaklanmıştır. Gerçekleştirilen tez çalışmasının amacı FACTS cihazlarının optimal konumlandırılması ile gerilim profili seviyesini ayarlamak, kayıpları azaltmak, verimliliği ve güç kalitesini artırmaktır. Önerilen yöntemin geçerliliğini kanıtlamak için simülasyon çalışmalarında SVC ve UPFC cihazları kullanılmıştır. Optimizasyonda bu cihazların optimal boyutlandırılması ve konumlandırılması amaçlanmıştır. Çünkü FACTS cihazlarının optimal konumunu ve boyutunu tahmin etmek, güç şebekesinin en önemli alanlarından biridir. Nitekim yeni üretim tesislerinin kurulumuna gerek duyulmaksızın bazı teknikleri kullanarak güç şebekelerinden maksimum verim elde edilebilir. Mali sebeplerden dolayı FACTS cihazlarının en uygun yerlere yerleştirilmesi esastır. Bu amaçla başlangıçta FACTS cihazlarının matematiksel modeli düşünülüp daha sonra bir optimizasyon tekniği kullanarak optimal yerleşim gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında çözümü elde etmek için çeşitli kısıtlara sahip farklı amaç fonksiyonları kullanılmıştır. IEEE-30 baralı güç sistemi ICA tekniği ile analiz edilmiş ve sonuçlar PSO ve GA yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 1, enerji talebi ve güç şebekelerinde FACTS cihazlarının önemi hakkında genel bilgi vermektedir. Bu bölümde tezin amacı, katkısı, araştırma metodu kısaca özetlenmiştir. Ayrıca optimizasyonun amacı da tartışılmıştır. Bölüm 2'de FACTS

cihazlarının temel özellikleri, FACTS cihazlarının yapı ve işleyişlerine göre nasıl sınıflandırıldığı açıklanmaktadır. Çeşitli FACTS cihazlarının konfigürasyonu, çalışma prensibi ve uygulamaları bu bölümde sunulmuştur. Bölüm 3'te güç sistemi kararlılığının tanımı ve sınıflandırılması yapılmıştır. Bölüm 4'te problemler için en uygun çözümleri bulmayı hedefleyen PSO, GA ve ICA optimizasyon yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 5'te IEEE-30 baralı güç sisteminin yapısı gösterilmiştir. Ayrıca optimizasyonda kullanılan amaç fonksiyonları ve kısıtlar belirtilmiştir. Bölüm 6'da SVC ve UPFC'nin IEEE-30 baralı test sisteminde optimal yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca simülasyon sonuçları, kayıplar ve gerilim profil seviyesi de gösterilmiştir. Bölüm 7'de, bu tezde sunulan araştırma çalışmalarının başlıca sonuçları, katkıları ve gelecekteki gelişme potansiyeli değerlendirilmiştir.



2. FACTS CİHAZLARI

Güç elektroniği tabanlı FACTS cihazları, sistem esnekliği, güvenliği ve kontrol edilebilirliğini artırmanın yanı sıra iletim hattı kapasitesini artırma imkânı da sunar. Bu bölümde, esnek alternatif akım iletim sistemlerinin temel özellikleri, FACTS cihazlarının yapı ve işleyişlerine göre nasıl sınıflandırıldığı açıklanmaktadır. Çeşitli FACTS cihazlarının konfigürasyonu, çalışma prensibi ve uygulamaları da bu bölümde anlatılmıştır.

2.1. FACTS DENETLEYİCİLERİNİN ÖNEMİ

Güç aktarım yeteneği, şebeke kısıtlamalarına göre baralar ve bölgeler arasındaki iletim potansiyeldir. Güç aktarım kapasitesini değerlendirmek için yük miktarı devamlı artırılarak güç sisteminin çöküşe geçebileceği limitler belirlenir. Güç sisteminde termal limit, voltaj sınırı ve sistem kararlılığı kısıtları önemli rol oynamaktadır.

Günümüzde, FACTS cihazlarının bir parçası olan reaktif güç kompanzatörleri güç sistemleri için oldukça önemlidir. Bu cihazlar, güç şebekelerinde dinamik kararlılığı ve voltaj regülasyonunu artırmada önemli role sahiptir. Reaktif güç kompanzatörleri aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayrılır.

- Pasif reaktif kompanzatörler: İndüktör ve kapasitör içeren, seri ve paralel bağlanabilen kompanzatörlerdir
- Aktif reaktif kompanzatörler: Senkron kompanzatörler ve statik kompanzatörlerdir. Bu kompanzatörler hızlı ve sürekli kontrol edilebilirdir.

Temel olarak FACTS cihazları sistemdeki kararsızlıkları tamamen engelleyemez fakat sistemdeki arızalar nedeniyle oluşan etkileri azaltabilir. Örneğin, bir yükü sistemden kesmek hat voltajında bir artışa neden olur. Bu durumda FACTS'ler hatlardan gelen fazla gerilimi ortadan kaldırır ve onları kararlı hale getirir. Uzun iletim hatları, birbirine bağlı birkaç ağ, çeşitli yüklerin etkisi ve iletim hattı hataları, şebekeyi kararsızlığa sürükleyebilir. Bu durum iletim hatlarının verimliliğinde bir azalmaya ve hattın devre dışı kalmasına yol açabilir. Ancak, iletim hatlarında FACTS aygıtlarını kullanmak güç sistemindeki riskleri azaltır.

Modern endüstri, istikrarlı voltaj, sabit frekans ve sürekli enjekte edilen yüksek kaliteli güce ihtiyaç duyar. Farklı voltaj ve frekans değerinde enerjinin aktarılması üretim sürecinin bazı bölümlerinde gecikmelere sebep olur. Bu sebepten dolayı güç sisteminde büyük kayıplar meydana gelir. FACTS cihazlarını kullanarak kayıpları azaltmak, iletim hatlarının verimliliğini artırmak ve ekstra iletim hatlarının kurulumuna olan ihtiyacı azaltmak mümkündür [31],[32].

2.2. FACTS KATEGORİSİ VE ÇEŞİTLERİ

FACTS, yüksek voltajlı AC hatların gerilim, empedans ve faz açısının dinamik kontrol gereksinimlerine yanıt veren teknolojidir. FACTS denetleyicileri kullanılan güç elektroniği teknolojisine göre iki sınıfta incelenebilir [33].

- Tristör kontrollü FACTS denetleyicileri
- Dönüştürücü tabanlı FACTS denetleyicileri.

İletim hattındaki konumlandırmalarına dayanarak, FACTS cihazları genel olarak dört gruba ayrılır.

- Paralel FACTS denetleyicileri
- Seri FACTS denetleyicileri
- Seri-Paralel FACTS denetleyicileri
- Seri-Seri FACTS denetleyicileri.

2.2.1. Paralel FACTS Denetleyicileri

Paralel FACTS denetleyicileri genel olarak bağlantı noktasında hatta bir akım enjekte eden ve reaktif gücü kontrol etmek için kullanılan cihazlardır. Temel olarak reaktif güç eksikliği güç sisteminde bazı sorunlara neden olur. Bu sorunlar; kW başına artan güç transfer fiyatı, iletim hattı boyunca akan akımı artırma, artan kayıplar ve maliyetler, sistemlerin güç aktarım kapasitesinin azalması ve generatörlerin yüklenebilirliğinin azalmasıdır. Bu sorunlar sistemi farklı şekillerde etkilemekte ve güç kalitesini düşürmektedir. Paralel FACTS denetleyicileri ile sorunlar ortadan kaldırılabilir ve aşağıdaki hedeflere ulaşılabilir [34].

- Geçici kararlılık sınırının artırılması
- Güç salınımının yakınsaması
- Gerilimi sınırlı aralıkta tutma

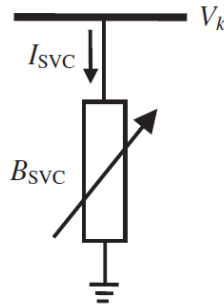
- Güç faktörünün iyileştirilmesi
- Dengesiz üç fazlı yükün dengelenmesi.

2.2.1.1. Statik Var Kompanzatör (SVC)

SVC, güç sistemlerinde kondansatör ve değişken indüktör olarak kullanılabilen paralel kompanzatördür. İletim hattında gerilim düşüşü meydana geldiğinde, SVC kapasitif değişkenler vasıtasıyla voltajı artırabilir veya gerilimde artış meydana geldiği zaman indüktif değişkenler vasıtasıyla gerilimi azaltabilir. SVC statik bir cihazdır. Yani dönen ve mobil bileşenler içermez ve bu özellik SVC'lerin sisteme hızlı bir yanıt vermesini sağlar.

SVC temel olarak reaktif güç kompanzasyonu, gerilim regülasyonu ve güç faktörü düzeltmeleri için kullanılır. İletim hattında SVC denetleyicisi kullanmanın avantajları; hızlı cevap, faz dengeleme, ekstra gerilimin ortadan kaldırılması, düşük bakım maliyeti, basit kontrol, geçici kararlılığın artırılması, gerilim çöküşünün önlenmesi, güç faktörünün geliştirilmesi, güç kalitesinin artırılması ve harmoniklerin ortadan kaldırılmasıdır.

SVC voltajı kontrol edebilen bir cihazdır. Bu nedenle SVC bağlı olduğu baradaki voltajı dengeleyen, sıfır etkin güce sahip bir çeşit generatördür. SVC denetleyicisinin şebeke genelindeki uygulamalarında etkisini değerlendirmek için kullanılan güç akışı modeli Şekil 2.1'de gösterilmiştir [35].



Şekil 2.1. SVC güç akışı modeli.

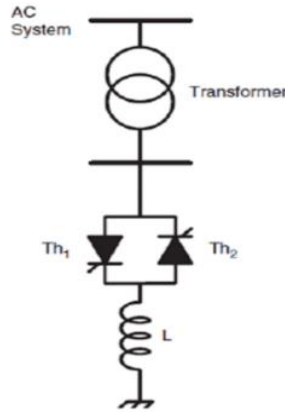
Şekil 2.1'de gösterilen güç akışı modelinde SVC'nin akım ifadesi Denklem (2.1)'e göre hesaplanmaktadır. k barasına enjekte edilen reaktif güç değeri ise Denklem (2.2) ile hesaplanmaktadır [35].

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_k \quad (2.1)$$

$$Q_{SVC} = V_k^2 * B_{SVC} \quad (2.2)$$

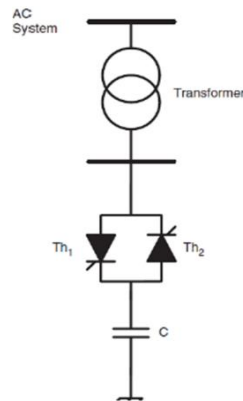
SVC, Tristör Anahtarlı Kondansatörlerden (TSC) ve Tristör Anahtarlı veya Kontrollü Reaktörlerden (TSR / TCR) oluşur.

Tristör Kontrollü Reaktör (TCR); faz açısı kontrolünü kullanarak eşdeğer sürekli değişken endüktif reaktans üreten şönt kompanzatördür. Akımın büyüklüğü tetikleme açısı α ile kontrol edilir. Tetikleme açısı α 'nın değeri 90° ile 180° arasında değişebilir. $\alpha=90^\circ$ olduğunda reaktör tamamen devreye girer. $\alpha = 180^\circ$ olduğunda ise reaktör tamamen devreden çıkar. Şekil 2.2'de TCR'nin tek hat şeması gösterilmiştir[36].



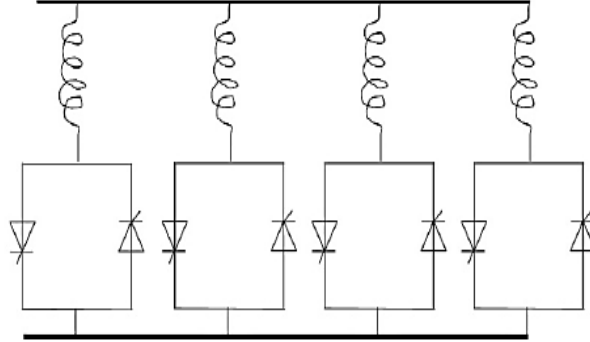
Şekil 2.2. TCR tek hat şeması.

Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör (TSC); sürekli değişken endüktif kapasitans üreten şönt kompanzatördür. Tristör sıfır voltaj anahtarlamaı sağlandığında açılır. Bu, açma anında tristör terminalleri arasındaki voltajın sıfır olması gerektiği anlamına gelir. TSC'de sadece kademeli kontrol vardır ve bu nedenle sürekli bir kontrol mümkün değildir. Kondansatör, kapasitif reaktansı artırarak sistemdeki güç aktarımını iyileştirmek için tristör anahtarlama eylemiyle güç sistemine eklenir. Şekil 2.3'te TSC'nin tek hat şeması gösterilmiştir [36].



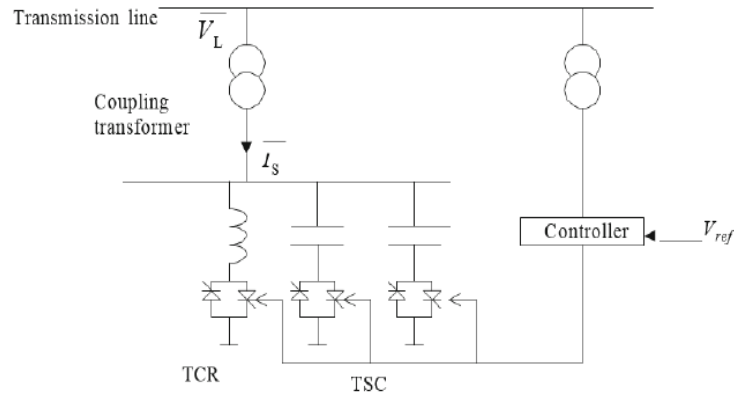
Şekil 2.3. TSC tek hat şeması.

Tristör Anahtarlama Reaktör (TSR); tristör kontrollü reaktöre benzerdir. Temel fark ise TSR’de sürekli kontrolün olmamasıdır. Bu, tristörlerin tamamen bağlı veya bağlantısız olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 2.4’te TSR’nin yapısı gösterilmiştir [37].

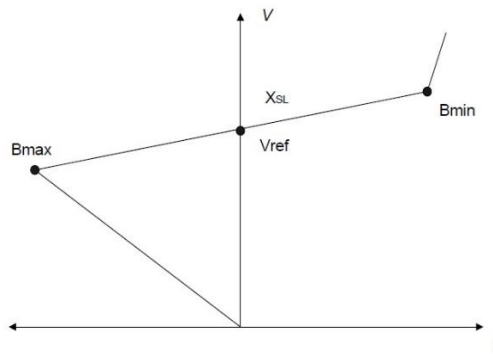


Şekil 2.4. TSR tek hat şeması.

Şekil 2.5’te şönt kapasitör ve reaktörlerden oluşan SVC’nin tek hat şeması verilmiştir. SVC’nin kontrol ettiği değişken, bara gerilimidir. SVC’ye ait terminal karakteristiği Şekil 2.6’da gösterilmiştir [38].



Şekil 2.5. SVC tek hat şeması.



Şekil 2.6. SVC’ye ait I-V karakteristiği.

SVC'ye ait eşitlikler sırasıyla Denklem (2.3), Denklem (2.4) ve Denklem (2.5)' te belirtilmiştir [39].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_c \\ \alpha \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, V, V_{ref}) \quad (2.3)$$

$$0 = \begin{bmatrix} B_e - (2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L/X_C))/(\pi X_L) \\ I - V_i B_e \\ \underbrace{Q - V_i^2 B_e}_{g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_e)} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL} I \\ g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_e) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2.1.2. SVC Uygulamaları ve Kurulumları

SVC çeşitli sistem koşullarında dinamik voltaj salınımlarını kontrol eder ve böylece güç sistemi aktarımını ve dağıtım performansını artırmak için gereken reaktif gücü sürekli olarak sağlayabilir. SVC ayrıca şebeke kararlılığını geliştirebilme, güç aktarım kabiliyetini artırma, kayıpları azaltma, ve farklı şebeke koşullarında aktif güç salınımlarını azaltma özelliklerine sahiptir [40].

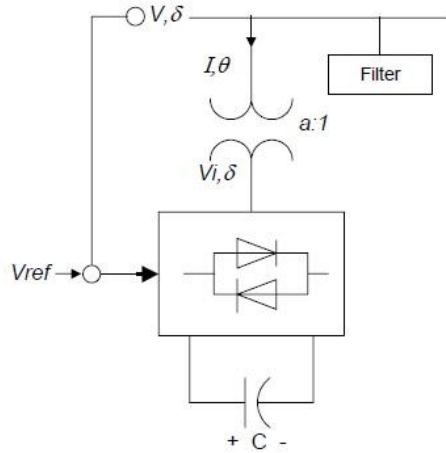
SVC'ler FACTS kavramı formüle edilmeden önce ilk olarak 1970'lerde Birleşik Devletler'de uygulanmaya başlandı. İlk uygulama, 1978'de devreye sokulan EPRI-Minnesota Power & Light and Westinghouse projesidir ve burada SVC'ler iletim hattında % 25'lik bir güç artışı sağlamıştır. Dünya çapında SCV kurulumunda artış vardır. Son olarak SVC'ler Şili, Kanada, ABD, Meksika, Güney Afrika ve Finlandiya'da sipariş edilmiş veya kurulmuştur [41],[42]. Avrupa'da en fazla sayıda SVC İngiltere'de bulunmakla birlikte, en sonuncusu 2009 yılında Finlandiya'nın Kangasala trafo merkezinde kurulmuştur. Bu kurulum -200 / + 240 MVAR aralığında reaktif güç desteği sağlamıştır [43].

2.2.1.3. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

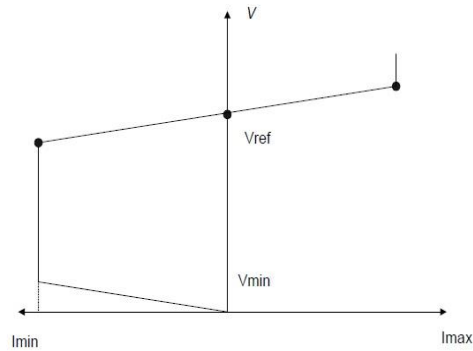
STATCOM güç sistemi tarafından talep edilen aktif ve reaktif gücü sağlamak amacıyla doğru akım giriş gerilimini alternatif akım çıkış gerilimine dönüştüren gerilim kaynaklı bir dönüştürücüdür. Tipik bir STATCOM kuplaj transformatörü, invertör, pil veya DC kondansatör gibi enerji depolama elemanlarından oluşmaktadır. STATCOM'un avantajı, reaktif güç kompanzasyonunun bağlantı noktasındaki gerçek voltajdan bağımsız olmasıdır. STATCOM, güç sistemlerinde gerilim dengesizliği olduğunda bu durumu

telafl etmek için SVC'den daha iyi performans gsterir. STATCOM, güç sistemine paralel bağlı en yaygın FACTS cihazlarından birisidir. Bu cihazın en önemli özelliklerinden biri de g kalitesini artırmasıdır [44],[45].

STATCOM senkron gerilim kaynağı olarak kullanılır ve bu zellik SVC'den daha iyi bir çalışma ve esneklik sağlar. STATCOM'un alışması, DC voltajını AC'ye eviren invertör ile benzerdir. Ekstra talebe bağlı olarak sistemin voltajı düştüğünde, STATCOM aktif güç generatörü olarak çalışır ve gerekli aktif güç sisteme enjekte eder [33]. STATCOM'un tek hat şeması ve I-V eğrisi şekil 2.7 ve şekil 2.8'de gösterilmiştir. [39].



şekil 2.7. STATCOM'un şematik gösterimi.



şekil 2.8. STATCOM'un I-V karakteristiği.

Güç sistemlerinde STATCOM kullanmanın bazı avantajları vardır [34]. Bu avantajlar;

- Gerilimin dinamik kontrolü
- Geçici kararlılığın iyileştirilmesi
- G şebekelerinde g dalgalanmasının giderilmesi
- Aktif ve reaktif güç kontrolü.

STATCOM'daki reaktif gücün kontrolü, terminal gerilimini kontrol ederek yapılır [33].

- Eğer kaynak gerilimi STATCOM voltajından daha büyük ise STATCOM endüktif bölgede çalışır
- Eğer kaynak gerilimi STATCOM voltajından daha küçük ise STATCOM kapasitif bölgede çalışır.

STATCOM'daki reaktif güç kontrolünde iki teknik kullanılır [39].

- Çoklu darbe dönüştürücülerde çıkış voltajı büyüklüğü DC kondansatör voltajı ile kontrol edilir
- PWM kontrolü durumunda DC kondansatör, voltajı sabit tutar ve voltaj PWM kontrolcüsü tarafından kontrol edilir.

STATCOM'a ait diferansiyel-cebirsal işlemler sırasıyla Denklem (2.6), Denklem (2.7) ve Denklem (2.8)'de verilmiştir. Denklem (2.6) STATCOM için kullanılan kontrol sisteminin modeline karşılık gelirken, Denklem (2.8) ise STATCOM'un bağlı olduğu baranın güç akışı eşitliğini gösterir [38].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}) \quad (2.6)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{V \cdot I}{C \cdot V_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{R_c \cdot C} V_{dc} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (2.7)$$

$$0 = \begin{bmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} VG \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \alpha) \\ Q + V^2 B - kV_{dc} VB \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VG \sin(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q)$

2.2.1.4. STATCOM Uygulamaları ve Kurulumları

1980'lerde dönüştürücü tabanlı VAR kompanzatörlerin iki deneysel kurulumundan sonra Japonya'da ± 80 MVAR gücünde kurulum gerçekleştirilmiştir. ABD'de 1995 yılında, Tennessee güç sisteminin Sullivan trafo bölgesinde ± 100 MVAR gücünde bir STATCOM devreye alınmıştır. Dünya çapında kurulu STATCOM'ların sayısı yaklaşık olarak yirmidir. ABD, Japonya, Çin ve Birleşik Krallık'ta STATCOM kurulu gücü 1200 MVA'nın üzerindedir [41]-[43],[46],[47].

2.2.2. Seri FACTS Denetleyicileri

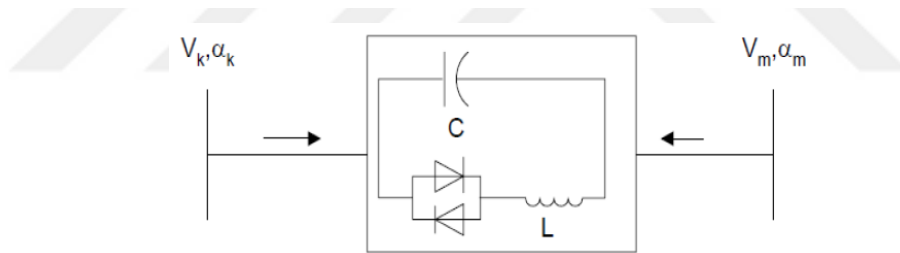
Seri FACTS denetleyiciler, iletim hattına seri voltaj enjekte eden cihazlardır. Hat boyunca akan akımın, değişken empedans ile çarpımı, iletim hattına enjekte edilen seri voltajı temsil eder.

Güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan seri FACTS denetleyicileri şunlardır:

- Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC)
- Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)
- Tristör Anahtarlı Seri Kompanzatör (TSSC)
- Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR).

2.2.2.1. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC)

TCSC, seri kapasitör ve buna paralel bağlı tristör kontrollü reaktörden oluşur. Şekil 2.9’da TCSC’nin temel yapısı verilmiştir [38]. TCSC’nin endüktif veya kapasitif olarak çalıştırılmasıyla hat empedansını geniş aralıkta kontrol etmek mümkündür. Bu cihaz, güç sisteminin dinamik kararlılığını artırır ve iletim hatları arasındaki yük paylaşımını geliştirir [48].

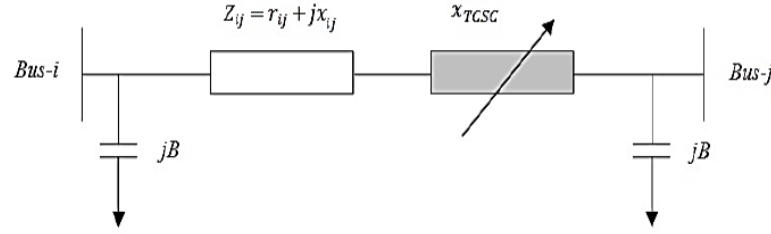


Şekil 2.9. TCSC’nin temel yapısı.

Kompanzatör miktarı iletim hattının reaktans yüzdesi ile hesaplanır ve bu bağlantıya dayanarak şebekenin admittans matrisi iyileştirilir. TCSC tarafından enjekte edilen reaktans Denklem (2.9) ile hesaplanır [34].

$$x_{TCSC} = K x_{Line} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9’da K kompanzasyon aralığını temsil etmektedir. x_{Line} hat empedansı, x_{TCSC} ise kompanzatör empedansıdır. Şekil 2.10 TCSC tarafından enjekte edilen akımı göstermektedir [34].



Şekil 2.10. TCSC tarafından enjekte edilen akım.

TCSC tarafından enjekte edilen aktif ve reaktif güç eşitlikleri sırasıyla Denklem (2.10), Denklem (2.11), Denklem (2.12) ve Denklem (2.13)'te verilmiştir [34].

$$P_{ic} = V_i^2 \Delta G_{ij} - V_i V_j [\Delta G_{ij} \cos \delta_{ij} + \Delta B_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (2.10)$$

$$P_{jc} = V_j^2 \Delta G_{ij} - V_i V_j [\Delta G_{ij} \cos \delta_{ij} - \Delta B_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (2.11)$$

$$Q_{ic} = -V_i^2 \Delta B_{ij} - V_i V_j [\Delta G_{ij} \sin \delta_{ij} - \Delta B_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (2.12)$$

$$Q_{jc} = -V_j^2 \Delta B_{ij} + V_i V_j [\Delta G_{ij} \sin \delta_{ij} + \Delta B_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (2.13)$$

Denklem (2.10), Denklem (2.11), Denklem (2.12) ve Denklem (2.13)'te geçen ΔB_{ij} ve ΔG_{ij} ifadeleri Denklem (2.14) ve Denklem (2.15)'te tanımlanmıştır [34].

$$\Delta B_{ij} = \frac{x_{ij}(-k^2 x_{ij}^2 - k x_{ij}^2 + k r_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(r_{ij}^2 + (x_{ij} + k x_{ij})^2)} \quad (2.14)$$

$$\Delta G_{ij} = \frac{k r_{ij} x_{ij}^2 (2 + k)}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(r_{ij}^2 + (x_{ij} + k x_{ij})^2)} \quad (2.15)$$

2.2.2.2. TCSC Uygulamaları ve Kurulumları

TCSC'nin iletim hattına dahil edilmesi, seri kompanzasyon ile birlikte aşağıdaki avantajlara sahiptir.

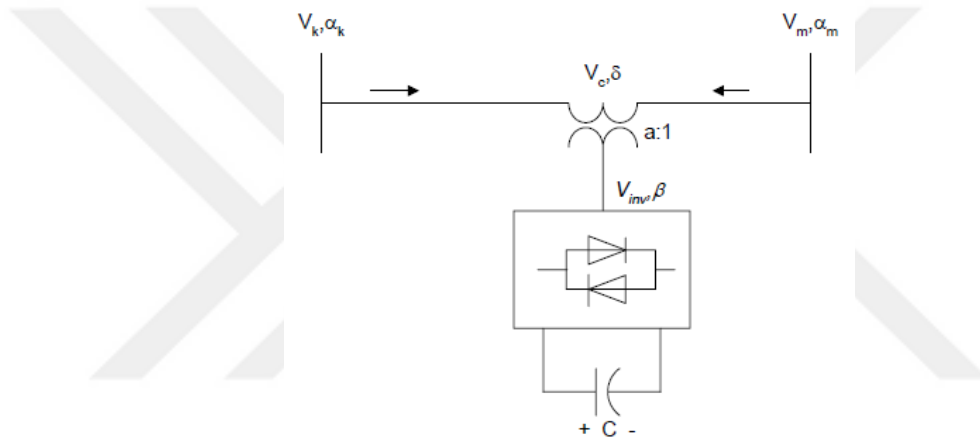
- Senkron rezonans risklerinin ortadan kaldırılması
- Aktif güç salınımlarının sönümlenmesi
- Acil durum sonrası istikrarı iyileştirme
- Dinamik güç akış kontrolü
- Aktarım kapasitesinde artış.

TCSC'leri içeren bir proje 1.017 km uzunluğundaki 500 kV iletim sisteminde Brezilyada gerçekleştirilmiştir. Bu projede TCSC'ler beş adet geleneksel seri kapasitör ile kombine

halde çalıştırılmaktadır. 1999 yılından beri faaliyet gösteren bu uygulamada TCSC sistemi, sönümleme ve geçici kararlılık iyileştirmeleri için kullanılmaktadır. En yeni TCSC projeleri Hindistan ve Çin’de yürütülmektedir [44],[46].

2.2.2.3. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)

SSSC, büyüklüğü ve faz açısı güç elektroniği tabanlı aygıtlar tarafından ayarlanabilen, hat akımına dik, dengeli üç fazlı bir gerilim üretir. Devre özellikleri STATCOM ile benzerdir fakat SSSC iletim hattına seri olarak bağlanmaktadır. SSSC bir hat üzerinden aktif ve /veya reaktif güç akışının kontrolünde kullanılır [49]. SSSC seri trafo, voltaj kaynağı dönüştürücü ve bir DC bağlantı kondansatöründen oluşur. SSSC’nin şematik diyagramı Şekil 2.11’de gösterilmiştir [38].



Şekil 2.11. SSSC şematik diyagramı.

SSSC hat akımından bağımsız olarak iletim hattına gerilim enjekte edebilme özelliğine sahiptir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi tetikleme açısı değiştirilerek kontrol edilir. Eğer dönüştürücü çıkış gerilimi hat akımından 90° geri fazda ise SSSC hat reaktansını azaltmak için kapasitif bölgede çalışır. Eğer dönüştürücü çıkış gerilimi hat akımına göre 90° ileri fazda ise SSSC hat reaktansını artırmak için endüktif bölgede çalışır [50].

2.2.2.4. SSSC Uygulamaları ve Kurulumları

SSSC denetleyicisi aşağıdaki avantajlara sahiptir.

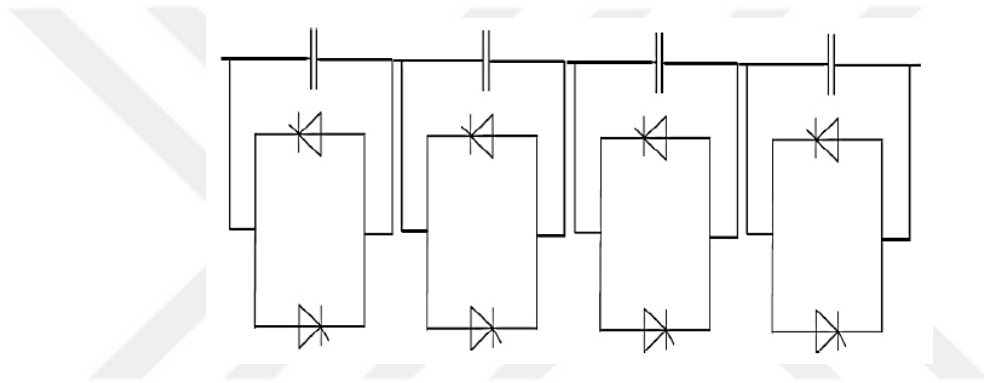
- Gerilim sarkmalarının giderilmesi
- Hem indüktif hem de kapasitif modda çalışma yeteneği
- Osilasyonların sönümlenmesi
- Dinamik güç akışı kontrolü ve artan güç aktarım kapasitesi

- Sürekli voltaj enjeksiyonu ile güç faktörü iyileştirmesi
- Aktif filtreleme ile harmonik bozulmayı azaltma.

SSSC'ler ile ilgili son gelişmeler İspanya güç sisteminde bir prototip cihazın kurulumu ve test edilmesidir [36],[41] [46],[51].

2.2.2.5. Tristör Anahtarlı Seri Kompanzatör (TSSC)

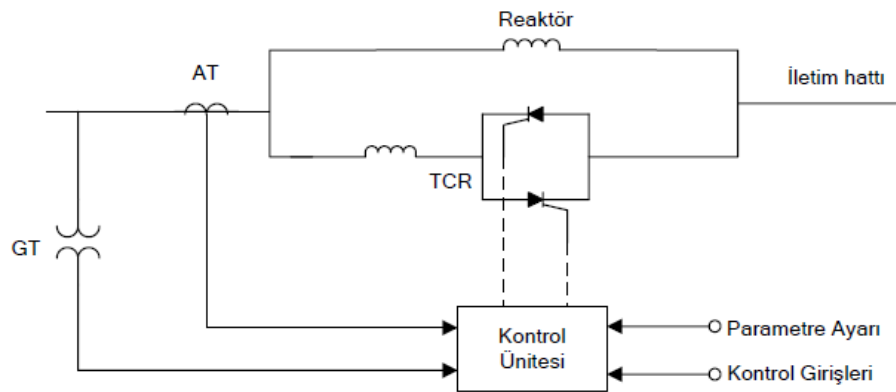
TSSC denetleyicisinin temel parçası by-pass anahtarlı bir kapasitördür. TSSC cihazı kapasitörlerden oluşan denetleyicidir ve kapasitörlerin herbiri bir by-pass anahtarlayıcı ile paraleldir. TSSC ile yapılan kompanzasyonda açının kontrolü yoktur. Hat reaktansı sürekli olarak değişmez ve bu durum denetleyicinin temel dezavantajıdır. Şekil 2.12 TSSC'nin şematik diyagramını göstermektedir [34].



Şekil 2.12. TSSC şematik diyagramı.

2.2.2.6. Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR)

TCSR iletim hattına seri olarak bağlanan endüktif reaktans kompanzatörüdür. Seri FACTS grubuna ait olan TCSR denetleyicisi hattın endüktif empedansını kontrol etmek için kullanılır. Şekil 2.13'te gösterildiği gibi TCSR cihazı TCR ve buna paralel bir reaktörden oluşur [49].



Şekil 2.13. TCSR devre konfigürasyonu.

2.2.3. Seri-Paralel FACTS Denetleyicileri

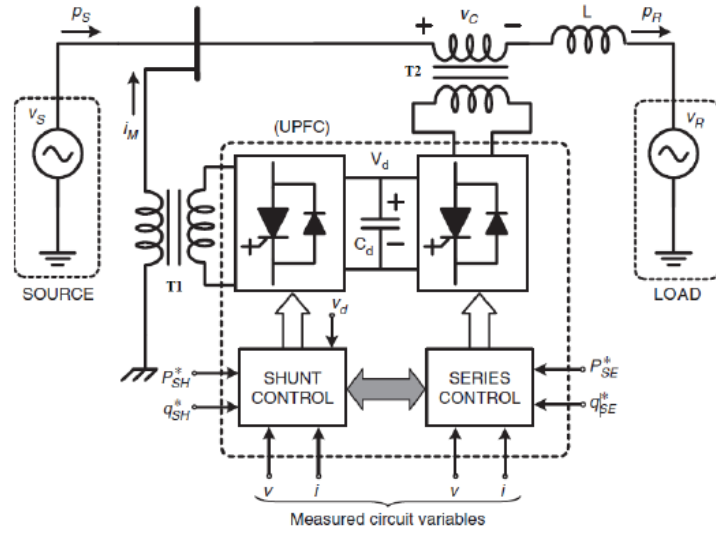
2.2.3.1. Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)

UPFC en kullanışlı FACTS cihazlarından biridir ve güç akışını kontrol etmek için kullanılır. Genel olarak bir UPFC voltaj, empedans ve açığı aynı anda kontrol edebilir. Bu denetleyicinin önemli özelliklerinden biri, iletim hatlarındaki aktif ve reaktif gücün aynı anda kontrol edilebilmesidir. Temel olarak, birbirine paralel iki iletim hattı arasındaki güç aktarımını ayarlamak için UPFC kullanılır. Güç sisteminde UPFC denetleyicisini kullanmak maksimum güç transfer kapasitesine ulaşmayı sağlar.

UPFC, güç sistemlerinde en sık kullanılan FACTS cihazlarından biridir ve iletim hatlarının statik ve dinamik çalışması için çeşitli avantajlara sahiptir. UPFC kontrolörü, STATCOM ve SSSC özelliklerini içerir. UPFC, iletim hatlarındaki aktif gücün kontrolü ve talep edilen reaktif gücün temini açısından kusursuz bir kabiliyete sahiptir. İki iletim hattı farklı özelliklere sahipse, farklı termal limitlere sahip olacaklardır. Hatlar boyunca aynı güç aktarımını elde etmek için hatların aynı empedansa sahip olmaları gerekir. Bu durumda, UPFC sisteme ilave edilir ve her iki iletim hattının kendi nominal termal sınırları dahilinde çalıştırılması sağlanır.

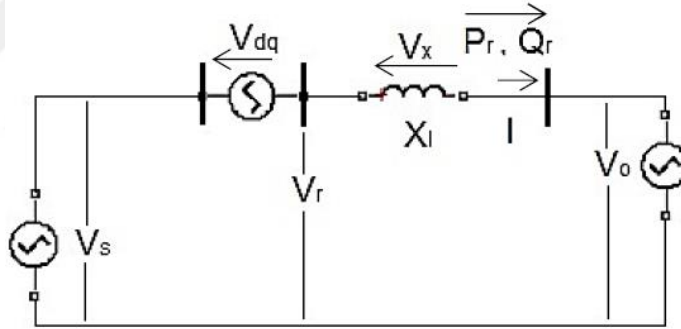
UPFC seri ve paralel kompanzasyon özelliklerine sahiptir. Ayrıca gerilimi ve iletim hattının empedansını ayarlayabilir ve açığı kaydırabilir. Aynı zamanda maksimum yüklenebilirlik elde etmek için aktif ve reaktif gücü kontrol eder [52].

UPFC kontrolörü DC kondansatör vasıtasıyla sırt sırta bağlanan iki dönüştürücü içerir. Dönüştürücülerden her biri ayrı olarak bir transformatöre bağlanır. STATCOM olarak adlandırılan ilk dönüştürücü, iletim hattına değişken büyüklüğe sahip bir sinüzoidal akım enjekte eder. SSSC olarak adlandırılan ikinci dönüştürücü ise iletim hattına değişken büyüklükte seri sinüzoidal gerilim enjekte eder. Şekil 2.14'te UPFC'nin tek hat şeması gösterilmiştir [36].



Şekil 2.14. UPFC tek hat şeması.

İletim hattındaki güç akışı, hat empedansının, kaynak ve yük geriliminin ve bu gerilimlerin açısının bir fonksiyonudur. Şekil 2.15'te basit bir iletim hattına UPFC'nin voltaj enjektesi gösterilmiştir [34].

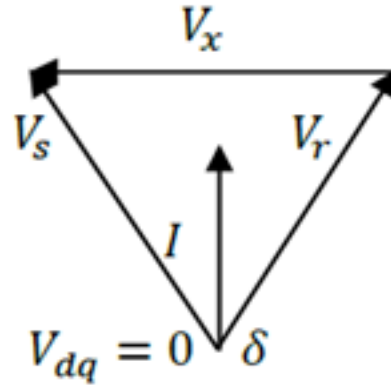


Şekil 2.15. UPFC voltaj enjektesi.

Şekil 2.15'te X_l , hattın endüktif reaktansı, V_{dq} seri enjekte edilen voltaj, V_s gönderici uçtaki voltaj kaynağı, V_r ise alıcı bölgedeki voltaj kaynağıdır. Hattın reaktansı üzerinden geçen voltaj ifadesi Denklem (2.16)'da gösterilmiştir. [34]

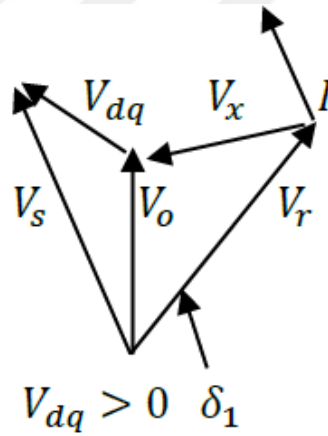
$$V_x = V_s - V_r - V_{dq} = I * X_l \quad (2.16)$$

Denklem (2.16)'da I iletim hattının akımıdır. V_{dq} değiştiğinde V_x 'de değişir ve buna bağlı olarak akım da değişir. Başlangıçta $V_{dq} = 0$ olduğu varsayılabilir, bu durumda Şekil (2.16)'daki vektör elde edilir [34].



Şekil 2.16. V_{dq} değişimine bağlı olarak elde edilen V_x vektörü.

δ , V_s ve V_r arasındaki açıdır. I iletim hattı akımıdır. P_r ve Q_r alıcı uçtaki aktif ve reaktif güç ifadeleridir. İletim hattına V_{dq} seri voltajın eklenmesi ile V_0 ve V_r arasındaki açı δ_1 olur. δ_1 açısının oluşumu Şekil 2.17’de gösterilmiştir [34].



Şekil 2.17. δ_1 açısının oluşumu.

Güç sistemlerinde UPFC kullanılmasının amacı, sistemin termal limitine bağlı olarak yüklenebilirliğini artırmaktır. Güç sistemlerinde UPFC kullanılması durumunda dikkate alınması gereken kısıtlamalar vardır. Bu kısıtlamalardan bazıları;

- Enjekte edilen seri voltaj büyüklüğü
- Seri dönüştürücü akımı
- Seri ve paralel konvertörler arasındaki aktif güç işlemleri
- Bağlı olduğu bölgedeki maksimum ve minimum UPFC gerilimi
- Paralel konvertör akımı.

2.2.3.2. UPFC Uygulamaları ve Kurulumları

UPFC'nin iletim hattında kullanılması seri ve şönt kompanzasyon ile aşağıdaki avantajlara sahiptir.

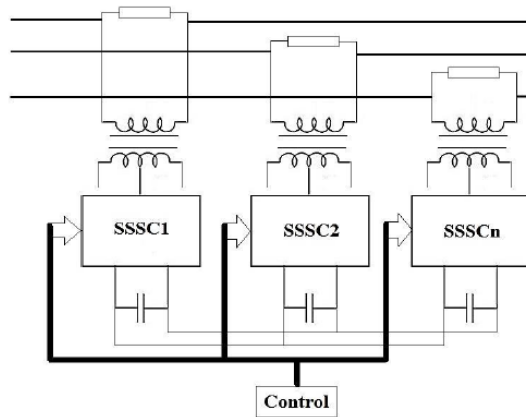
- Aktif ve reaktif gücün hassas kontrolü
- İletim kapasitesinin geliştirilmesi
- Faz kayma düzenlemesi
- Sistem salınımlarının sönümlenmesi.

Dünya genelinde ABD ve Güney Kore'de UPFC denetleyicisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazın ilk kurulumu 1998 yılında American Electric Power (AEP) tarafından Inez istasyonunda Electric Power Research Institute (EPRI) ve Westinghouse ortaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu kurulumda UPFC her biri ± 160 MVA gücünde GTO tabanlı iki dönüştürücüden oluşmaktadır. Diğer bir UPFC kurulumu 2001 yılında EPRI'nin desteğiyle New York Power Authority (NYPA) tarafından işletilen Marcy istasyonunda gerçekleştirilmiştir. 80 MVA gücündeki bir başka UPFC denetleyicisi 2002 yılında Korea Electric Power Corporation (KEPCO) tarafından 154 kV'luk Kangjin trafo bölgesinde kurulmuştur [46],[53],[54].

2.2.4. Seri-Seri FACTS Denetleyicileri

2.2.4.1. Hat Arası Güç Akış Kontrolörü (IPFC)

IPFC, DC terminalleri birbirine bağlanmış iki veya daha fazla SSSC'den oluşmaktadır. IPFC'nin yapısındaki DC kapasitörlerin paralel bağlanması aktif gücün çift yönlü aktarımına imkân sağlar. Şekil 2.18'de IPFC'nin şematik diyagramı gösterilmiştir [55].



Şekil 2.18. IPFC şematik gösterimi.

IPFC kontrolörünü kullanarak iletim hatlarında gerilim büyüklüğü ve açı kontrol edilebilir. IPFC aşırı yüklenmiş iletim hatlarından gelen yükü azaltma, dinamik bozukluklar açısından kararlılığı artırma ve reaktif güç aktarımını artırma özelliklerine sahiptir [55].

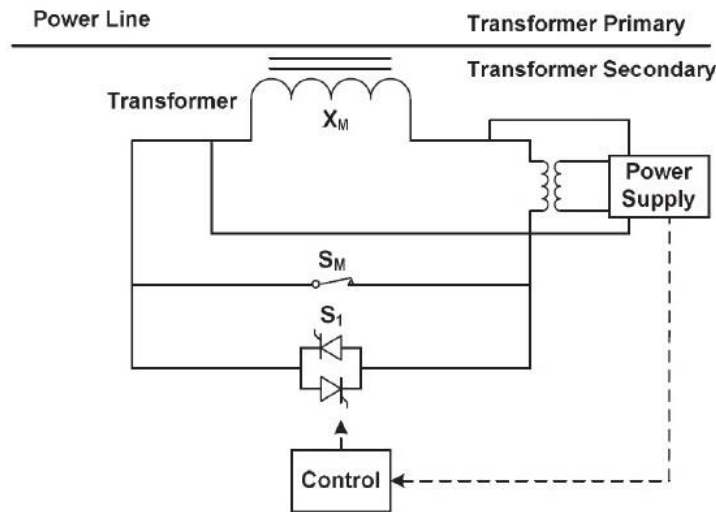
2.2.5. Dağıtılmış FACTS Cihazları

2.2.5.1. Dağıtılmış Seri Reaktör (DSR)

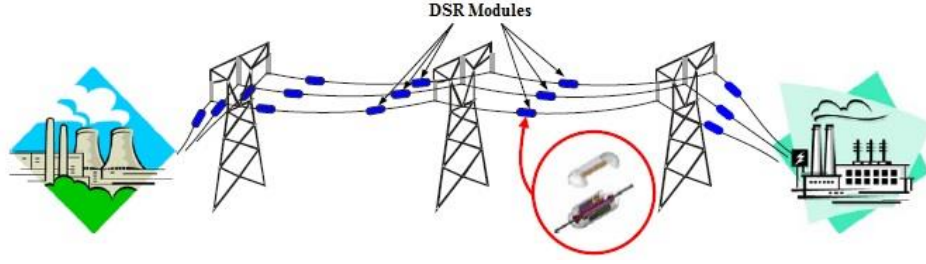
FACTS cihazları vasıtasıyla reaktif güç enjekte ederek iletim hatlarındaki güç akışını kontrol etmek mümkündür. STATCOM, SVC, TCSC ve UPFC güç akışı kontrolü için kullanılan güç elektroniği tabanlı FACT cihazlarından bazılarıdır. Bu cihazların başlıca dezavantajları yüksek maliyet ve bakım karmaşıklığıdır [56]-[58]. Dağıtılmış FACTS cihazları (D-FACTS) sınıfından olan Dağıtılmış Seri Reaktör (DSR)'ler son yıllarda güç akışı kontrolü için yaygın olarak kullanılmaktadır [59], [60].

DSR modülleri iletim hatlarına monte edilir ve hatların kendi empedansını değiştirebilir. DSR'de kullanılan yöntem iletim hatlarının empedansını değiştirerek güç akışının dağıtılan kontrolüdür [56]. DSR'ler önceden tanımlanmış bir eşik akımı ayarlanarak veya daha karmaşık uygulamalar için otomatik olarak kontrol edilebilir. Birinci durumda, hat akımı önceden tanımlanmış eşik akımı değerine ulaştığında DSR'ler açılır ve böylece güç akışının paralel yollara kayması sağlanır [60], [61].

Şekil 2.19'da DSR modülünün şeması gösterilmiştir [60]. Şekil 2.20 DSR modüllerinin iletim hattına nasıl yerleştirildiğini göstermektedir [62].



Şekil 2.19. DSR modülünün şeması.



Şekil 2.20. İletim hatlarında DSR modüllerinin konumu.

Şekil 2.19, birbirine bağlı güç şebekelerinde konumlandırılabilen DSR'nin yapısını göstermektedir. Burada by-pass elemanı olarak normalde kapalı olan elektromekanik anahtar (SM) kullanılır. SM açıkken, S1 anahtarı seri reaktansı kontrol eder. S1 kapatıldığında, Tek Dönüslü Transformatör (STT) sızıntı reaktansına karşılık gelen minimum bir reaktans seviyesi hattın içine eklenir. S1 açıkken, hava boşluğunu ayarlayarak istenen değere ayarlanan STT mıknatıslanma endüktansı hattın içine eklenir. Hattaki akım önceden belirlenmiş değeri aştığında çok sayıda DSR modülü devreye girer. Genel kontrol amacı, hatları aşırı yükten korumak olduğundan, kontrol stratejisinin çok basit olduğu görülmektedir. DSR modülü çalışması için kontrol eşitliği Denklem (2.17)'de tanımlanmıştır [63].

$$L_{inj} = L_f * \frac{I - I_0}{I_{thermal} - I_0} \quad (2.17)$$

Denklem (2.17)'de L_{inj} enjekte edilen hat endüktansı, L_f hattaki tüm DSR modülleri aktif olduğunda endüktansın son değeri, I_0 bir modül için akımın tetikleyici değeri, $I_{thermal}$ ise termal sınırdır [63].

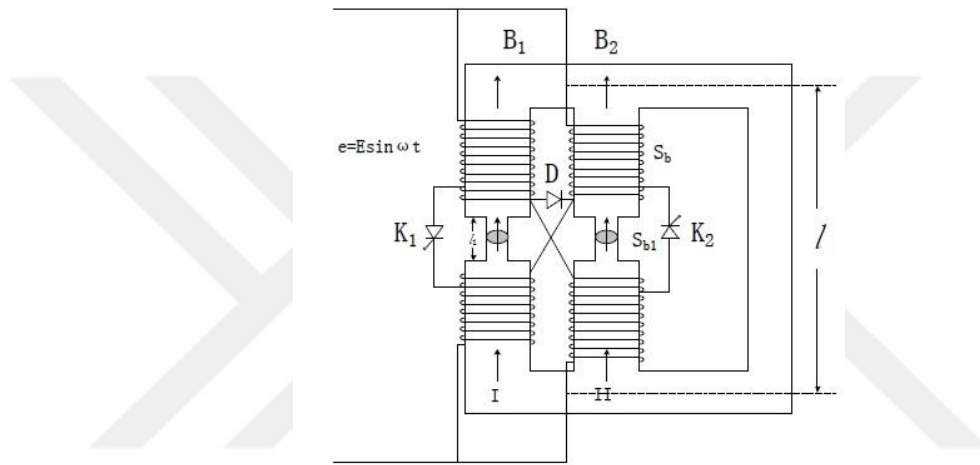
2.2.6. Manyetik Kontrollü Reaktör (MCR)

Gerilimin giderek artması ve güç sisteminin karmaşık hale gelmesiyle geleneksel reaktör kompanzasyon cihazları, aşırı voltaj ve voltaj dalgalanmalarını başarılı bir şekilde ele alamaz. Manyetik Kontrollü Reaktör (MCR), esnek ayarlama ve yüksek güvenilirlik özelliği sebebiyle daha fazla ilgi görmektedir. MCR'nin reaktansı, kontrol bobini vasıtasıyla DC akımını kontrol ederek değiştirilir [64].

MCR'nin avantajı ultra yüksek voltajlı güç sistemlerine uygulanabilmesi, ekonomik olması ve işletiminin basit olmasıdır. MCR, reaktif güç kompanzasyonu, aşırı gerilim sınırlaması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte MCR cihazı için düşük tepki hızı halen önemli bir sorundur. Özellikle gerilim dalgalanması ve güç sisteminde

oluşacak arkin bastırılması için kullanıldığında MCR'nin yavaş yanıtı kontrol sisteminin kararlılığını azaltmaktadır. Bu nedenle, tepki hızını artırmak için bazı önlemler alınmalıdır [65].

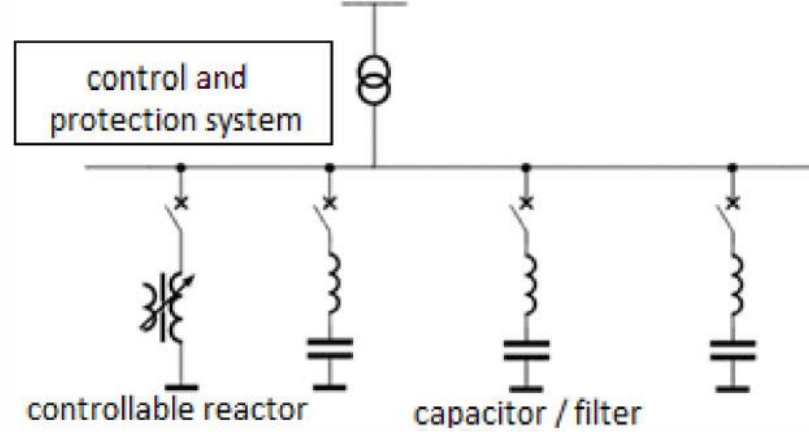
Şekil 2.21 manyetik olarak kontrol edilen reaktörün yapısını göstermektedir. Yapı ve şekil sıradan güç transformatörleri ile benzerlik göstermektedir. MCR'nin güç transformatörlerinden farkı; manyetik valf olarak adlandırılan daha küçük kesitsel alanların yapısına odaklanması ve sargı yapısındaki benzersiz DC uyarılma akım döngüsüdür. MCR, AC sisteme bağlandığında endüktansı etkili şekilde değiştirmek için reaktör çekirdek geçirgenliği DC uyarım akımı ile kontrol edilir [65].



Şekil 2.21. MCR'nin temel düzeni.

Şekil 2.21'de gösterildiği gibi kontrol edilebilir reaktör çekirdeği iki kısma ayrılmıştır ve her bir yarısında küçük bir kesitin olduğu görülmektedir. Reaktör sargısı güç sistemine bağlandığında, tristör K1 ve K2 tam dalga doğrultucu olarak çalışmak için pozitif ve negatif yarım devrelerde peş peşe açılır ve kapatılır. DC uyarım akımı K1 ve K2 iletim açılarını ayarlayarak kontrol edilir [66].

MCR'nin dinamik reaktif güç kompanzasyon sistemi üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; kontrol edilebilir reaktör, kondansatör ve kontrol sistemidir. MCR'nin bileşenleri Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Kapasitör negatif iken MCR'nin reaktif gücü pozitif olduğundan kontrol edilebilir reaktör ve kondansatör toplamı olan MCR'nin çıktısı sistemin ihtiyaçlarına göre hesaplanır [66].



Şekil 2.22. MCR'nin bileşenleri.

2.3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SVC VE UPFC KULLANMANIN FAYDALARI

SVC güç sistemlerinde hızlı ve etkili reaktif güç kompanzasyonu sağlamak için kullanılan statik bir bileşendir. Bu cihaz, güç sistemine otomatik empedans dengelemesi ve ayarlanabilir reaktif güç sağlar. Temel olarak, bu cihazın diğer şönt kapasitörlere göre avantajları vardır. Örneğin SVC iletim hattının alıcı ucunda gerilim kompanzasyonunu daha sıkı kontrol eder ve yük değiştiğinde bile hat stabilitesini artırabilir. SVC denetleyicisi yüksek miktarda reaktif güç talebi ile dinamik reaktif güç kompanzasyonu için kullanılır. Aynı zamanda santral işletme maliyetini de düşürür.

SVC, güç ağlarının spesifik parametrelerini kontrol edebilen şönt cihazdır. SVC, statik bir bileşen olup bu cihazın dönen bir kısmının olmadığı anlamına gelir. Bu özellik, sistem değişikliklerine ve bozukluklarına hızlı tepki vermesini sağlar.

SVC hızlı yanıt verme, yüksek kesinlik, fazları dengeleme ve fazla voltajları ortadan kaldırma gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca bakım ve kurulum maliyetini düşürür, kontrol edilmesi daha az karmaşıktır, sistem arızalarını düzenler ve geçici kararlılığı artırır. Hem iletim hem de dağıtım bölgelerinde SVC kullanılabilir. SVC'lerin dağıtım sistemlerindeki avantajları da oldukça önemlidir. Bu avantajlar gerilim çöküşünün ayarlanması ve önlenmesi, güç faktörünün iyileştirilmesi, yük dengeleme ve harmoniklerin ortadan kaldırılmasıdır.

UPFC'ler en güçlü FACTS aygıtlarından biridir. Bir UPFC'nin yapısı, GTO anahtar bağlantısı olan iki voltaj konvertörünü içerir. Bu iki dönüştürücü birbirine bir DC kondansatör ile bağlanır. Bileşenin paralel ve seri parçaları bağımsız bir şekilde reaktif

gücü absorbe edebilir veya üretebilir. Bu özellik her iki yönde güç akışını sağlar. Kontrol açısından bakıldığında, bu cihazın iki farklı parçaya sahip olduğu varsayılabilir. Paralel kısım, STATCOM olarak görev yapan paralel transformatör, voltaj konvertörü ve DC kondansatörden oluşur. Seri kısım ise SSSC görevi yapan seri transformatör, voltaj konvertörü ve DC kondansatörü içerir. Temel olarak bu bileşen STATCOM ve SSSC'nin kombinasyonudur.

Bu çalışmada, IEEE-30 baralı test sistemi analizinde SVC ve UPFC denetleyicileri kullanılmıştır. SVC, güç kayıplarının azaltılması ve voltaj regülasyonu bakımından iyi özelliklere sahip olduğu için güç şebekelerinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca düşük kurulum ve bakım maliyetleri nedeniyle, güç şebekelerinde kullanılması önerilir.

UPFC seri ve paralel kompanzasyon özelliğine sahiptir ve diğer kompanzatörlere kıyasla birçok avantaja sahiptir. Bu cihaz sistem yüklenebilirliğini artırma açısından diğer FACTS'lere göre daha başarılıdır. Bu cihazın ana dezavantajı diğer kompanzatörlerden daha yüksek kurulum maliyetine sahip olmasıdır. UPFC kayıpları azaltma ve kararlılığı sağlama bakımından daha avantajlıdır. Tablo 2.1'de güç sisteminde yaygın olarak kullanılan FACTS cihazlarının özellikleri gösterilmiştir [34].

Tablo 2.1. Çeşitli FACTS cihazlarının özellikleri.

FACTS Tipi	Güç Akış Kontrolü	Voltaj Kontrolü	Dinamik Kararlılık	Geçici Kararlılık
UPFC	+++	+++	++	++
STATCOM	+	++	++	++
SVC	+	+++	+++	++
TCSC	++	+++	++	++

2.4. FACTS CİHAZI YATIRIM MALİYETİ

FACTS cihazlarının yatırım maliyeti iki kısma ayrılabilir:

- FACTS cihazının maliyeti
- Altyapı maliyeti.

FACTS cihazlarının maliyeti nominal çalışma değeri, sistem kontrolü ve trafo ile sistem kontrolü iletişimi gibi parametrelere bağlıdır. Altyapı maliyeti ise FACTS cihazlarının kurulacağı coğrafi konuma bağlıdır.

İletim hatlarında çeşitli FACTS cihazları kullanılmaktadır. Bu çalışmada SVC ve UPFC denetleyicileri iletim hatlarında kompanzasyon amacıyla kullanılmıştır. UPFC'ler seri ve şönt kompanzasyon yapabilen cihazlardır. SVC'ler ise iletim hatlarına paralel eklenen reaktif kaynaklardır.

FACTS cihazlarının en uygun kurulum maliyeti, Denklem (2.18) ile tanımlanabilir [67].

$$IC = C \times s \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'de IC minimum kurulum maliyeti, C kurulum maliyetinin fonksiyonu, s ise FACTS cihazlarının çalışma seviyesidir. SVC, UPFC ve TCSC'nin kurulum maliyeti Denklem (2.19), Denklem (2.20) ve Denklem (2.21)'de verilmiştir [67].

$$C_{SVC} = 0.0003 s^2 - 0.3051 s + 127.38 \text{ (US$/kVar)} \quad (2.19)$$

$$C_{UPFC} = 0.0003 s^2 - 0.2691 s + 188.22 \text{ (US$/kVar)} \quad (2.20)$$

$$C_{TCSC} = 0.0015 s^2 - 0.71305 s + 153.75 \text{ (US$/kVar)} \quad (2.21)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan s FACTS cihazlarının çalışma seviyesidir ve Denklem (2.22) ile tanımlanır.

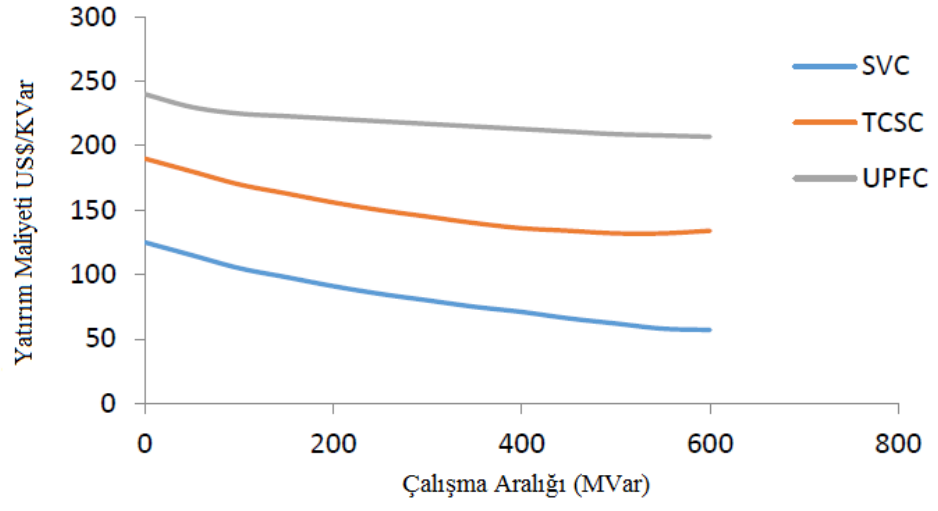
$$s = |Q_2| - |Q_1| \quad (2.22)$$

Denklem (2.22)'de Q_2 FACTS cihazını kurduktan sonra $MVar$ cinsinden iletim hattındaki reaktif güçtür. Q_1 ise FACTS cihazlarını yerleştirmeden önce $MVar$ cinsinden iletim hattındaki reaktif güçtür. Bununla birlikte, iletim hatlarında TCSC tarafından iletim reaktansının bir başka kısıtlaması olması gerekmektedir. İletim hattı reaktansının sınırları Denklem (2.23)'te belirtilmiştir [67].

$$-0.8 X_L \leq X_{TCSC} \leq 0.2 X_L \quad (2.23)$$

En uygun yatırımın elde edilmesi için ekonomik ve teknik faydaların ölçülmesi gereklidir. Dolayısıyla, doğru yere FACTS cihazı bağlandığında, tüm yatırım on yıl sonra geri kazanılabilir.

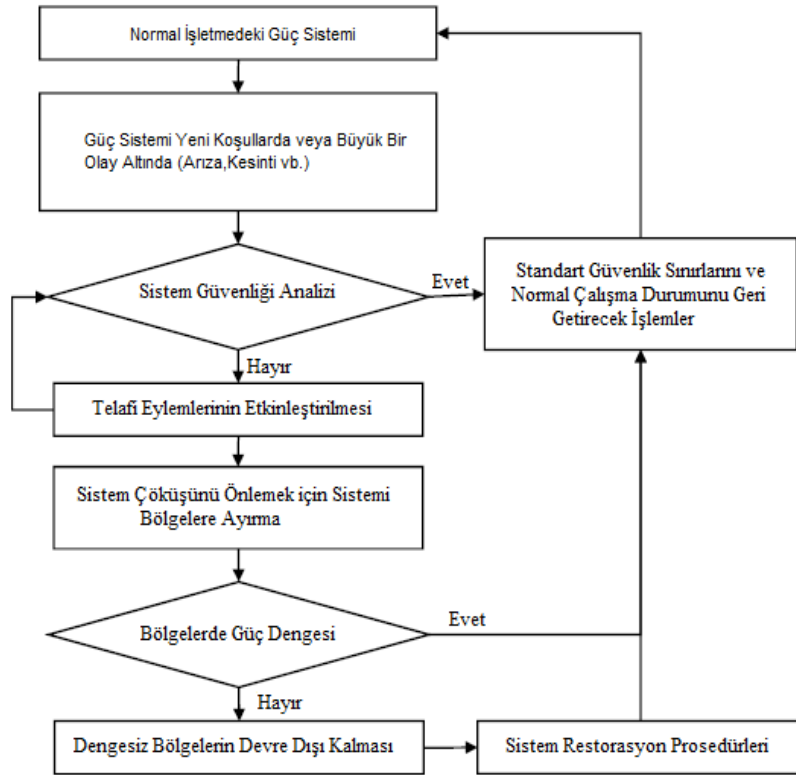
Şekil 2.23 SVC, TCSC ve UPFC cihazları için maliyet fonksiyon grafiğini göstermektedir. Şekil 2.23 analiz edildiğinde UPFC'nin daha fazla yüklenebilirlik özelliğine sahip olduğu ve SVC'nin kurulum maliyetinin daha düşük olduğu gözlemlenebilir [67].



Şekil 2.23. FACTS yatırım maliyet eğrileri.

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

Birbirine bağlı güç sistemlerinin güvenilir ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için güç sistemi kararlılığı önemli bir konu olarak kabul edilmiştir. Güç sistemi işletimi ile ilgili istikrar sorununun önemi birbirine bağlı şebekedeki güç alışverişinin artmasından kaynaklanmaktadır. Son yıllarda meydana gelen sistem çöküşleri güç sistemlerinin istikrarını değerlendirmek ve arıza ve kesintilerden kaynaklanan devre dışı kalma riskini en aza indirmek için yeterli düzeyde sistem güvenliğini sağlamanın gerekliliğini göstermektedir. Sistem istikrarının temel şartı, elektrik talebindeki dalgalanmaları ve sistemde meydana gelen değişiklikleri yeterli kapasite ve hızlı tepki ile karşılayarak güç sisteminin senkron çalışmasını sağlamaktır. Güç sisteminin başarılı bir şekilde işletilmesi tüm yüklere güvenilir ve kesintisiz hizmet sunma ve mevcut tesisler tarafından gerekli yük miktarını sağlama yeteneğine bağlıdır [68]. Şekil 3.1. güvenli ve güvenilir bir güç sistemi çalışmasını sağlamak için çalışma durumlarını göstermektedir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, sistem durumu sürekli olarak değerlendirilmektedir [69].



Şekil 3.1. Sistem güvenliğini sağlamak için akış şeması.

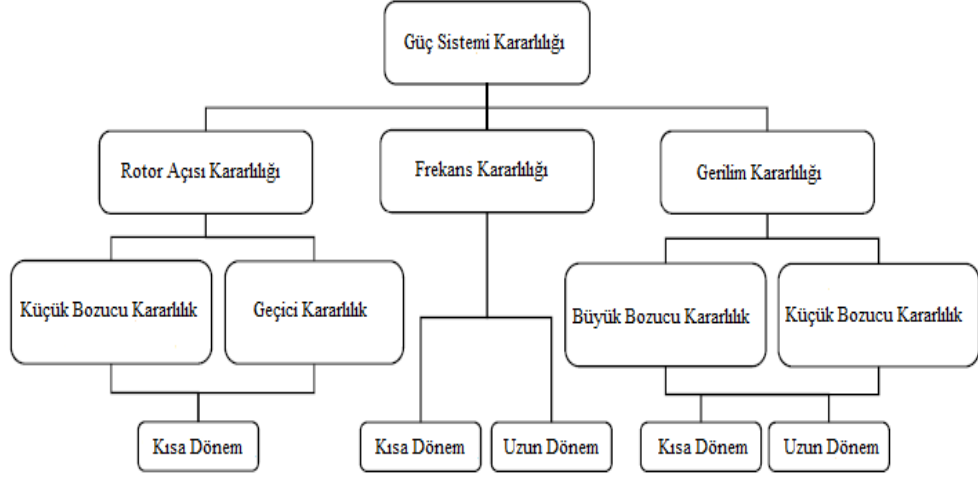
Güç akışı sonucunda mevcut veriler ile teorik hesaplama sonucu elde edilen veriler karşılaştırılır. İki durum arasındaki fark tolerans değerinin üzerinde ise güç sistemi birimlerinin senkronizasyonu kaybedebileceği düşünülür. Geçici sistem bozulmalarına maruz kalana güç sisteminin davranışı endişe vericidir. Bir güç sisteminin, bozunumu takiben geçici periyot süresince salınım tepkisi kabul edilebilir bir süre içerisinde azaltılır ve sistem yeni bir kararlı duruma yerleşebilirse kararlı olduğu kabul edilir [70].

Güç sisteminin istikrarsızlığı, sistem konfigürasyonuna, olayların doğasına ve sistem modlarına bağlı olarak farklı yollarla karakterize edilebilir. Bu bölümde güç sisteminin kararlılığının tanımlanması ve sınıflandırılması, güç sisteminin kararlılığına etki eden faktörler ve güç sistemi güvenlik analizi anlatılmıştır.

3.1. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIĞININ TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

Güç sistemi kararlılığı, belirli bir başlangıç çalışma şartı için elektrik güç sisteminin fiziki bir bozukluğa maruz kaldıktan sonra çalışma dengesi durumunu geri kazanma yeteneğidir. Kararlılığın doğru bir şekilde anlaşılması için güç sistemi kararlılık analizinin sınıflandırılması gerekir [68].

Güç sistemlerinde kararlılık, ortaya çıkan sistem kararsızlığının niteliğine (gerilim kararsızlığı, frekans kararsızlığı), bozulmanın boyutuna (küçük bozulma, büyük bozulma) ve istikrarın zamanına (kısa dönem, uzun dönem) göre sınıflandırılabilir. Öte yandan, kararlılık genel olarak kalıcı durum kararlılığı ve dinamik kararlılık olarak sınıflandırılır. Kalıcı durum kararlılığı, küçük yük değişiklikleri altında sistemin bir çalışma noktasından diğerine geçebilme yeteneğidir [70]. Güç sistemi dinamik kararlılığı, literatürde rotor açısı kararlılığı olarak görülür ve çeşitli bozulmalardan sonra sistemin kararlı çalışmasını sürdürüp sürdüremeyeceğini anlamak için analiz edilir. Şekil 3.2 IEEE ve CIGRE ortaklığında gerçekleştirilen güç sistemi kararlılığı sınıflandırmasını göstermektedir [68].



Şekil 3.2. IEEE/CIGRE güç sistemi kararlılığı sınıflandırması.

3.1.1. Rotor Açısı Kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, bir güç sisteminin birbirine bağlı senkron makinelerinin normal çalışma koşullarında ve bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra senkronizasyonda kalma yeteneği ile ilgilidir [68]. Senkron makinelerin kararlılığı elektromanyetik çıkış torkları ile mekanik giriş torkları arasındaki dengeyi yeniden sağlayabilme ve kısa devre gibi büyük bozukluklardan sonra diğer makinelerle senkron kalabilme yeteneğine bağlıdır. Kararlı durum koşulları altında, her bir generatörün giriş mekanik torku ve çıkış elektromanyetik torku arasında denge vardır ve hız sabit kalır. Sistem istikrarı kaybolduğunda bu denge bozulur ve bazı generatörlerin açısal salınımlarının artması veya azalması şeklinde istikrarsızlık ortaya çıkabilir. Bir bozulma sonrasında senkron makinenin elektriksel torkundaki değişim ΔT_e Denklem (3.1)'de gösterildiği gibi iki bileşene ayrılır [71].

$$T_e = T_s \Delta\delta + T_d \Delta\omega \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de $T_s \Delta\delta$ senkronize tork bileşeni, $T_d \Delta\omega$ ise sönümlleme tork bileşenidir. T_s senkronizasyon torku katsayısı, T_d sönümlleme torku katsayısıdır. Güç sistemindeki her bir makinenin kararlılığı iki bileşenin de varlığına bağlıdır. Yeterli senkronizasyon torkunun olmaması, rotor açısındaki a-periyodik veya titreşimsiz sürüklenme ile kararsızlık oluşturur. Ayrıca sönüm torkunun olmaması kararsızlığa neden olabilir. Rotor açısı kararlılığı, başlangıç çalışma durumuna ve senkron makinelerde bozulma şiddetine bağlıdır. Rotor açısı kararlılığı, küçük bozucu kararlılık ve büyük bozucu kararlılık olarak iki sınıfa ayrılır [72].

3.1.1.1. Küçük Bozucu Rotor Açısı Kararlılığı

Küçük bozucu rotor açısı kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalar karşısında senkronizmada kalabilme yeteneği olarak tanımlanabilir [71]. Küçük bozucu rotor açısı kararlılığı sistemin başlangıç çalışma koşullarına bağlıdır. Küçük bozucu rotor açısı kararlılık çalışmaları 10–20 saniye süreli salınımlardır.

Kararsızlık iki şekilde meydana gelebilir; [73]

- Senkronizma momentinin yetersizliğinden meydana gelen düzensiz salınımlar sebebiyle
- Rotor açısının artışı veya yetersiz moment nedeniyle rotor salınımlarının artması sebebiyle.

Küçük bozucu rotor açısı kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalara maruz kaldığında sistemi kararlı çalışma koşullarında tutabilme yeteneği olarak ifade edilebilir. Salınımlar, daha yüksek güç kapasitesi ve daha yüksek güvenilirlik sağlamak için bağlanan alternatif akım üreticilerinin paralel çalışmasının bir sonucu olarak meydana gelir. Bir güç sisteminde herhangi bir ani değişimden dolayı salınımlar ortaya çıkabilir. Yine hızlı ve güçlü gerilim regülatörleri veya diğer kontrol türleri, şebekede salınımlara neden olabilir. Eğer bozucu etki küçük ise senkronizasyon torku gerekli açı sönümlmeleri ile sistemin kararlı durumda çalışmasını sağlar. Eğer küçük sinyal salınımları sönümlenmez ise güç sisteminde küçük sinyal kararsızlığı meydana gelir [72].

3.1.1.2. Büyük Bozucu Rotor Açısı Kararlılığı

Büyük bozucu rotor açısı kararlılığı veya geçici kararlılık iletim hatlarında meydana gelen üç fazlı kısa devre arızası gibi kritik bozulmalarda güç sisteminin senkron makineler arasındaki senkronizasyonu sürdürebilme yeteneğidir [71]. Geçici kararlılık, sistemin mevcut çalışma koşullarına ve bağlı generatörler üzerindeki acil durum şiddetine bağlıdır. Generatör çiftleri arasındaki rotor açıları, güç dağılımı değiştikçe küçük miktarlarda sürekli olarak değişecektir. Sistemin cevabı, generatör açısının büyük değişimleri ve bunun sonucunda meydana gelen güç-açı ilişkisindeki non-lineerliktir. Küçük bozulma rotor açısı kararlılığı ve geçici kararlılık kısa vadeli olgular olarak sınıflandırılır [74].

3.1.2. Frekans Kararlılığı

Frekans kararlılığı, üretim ve yük arasındaki dengesizlikten kaynaklanan sistem bozulmasından sonra güç sisteminin sabit frekansta kalma yeteneğini ifade eder [71].

Frekans kararsızlığına sebep olan temel neden, üretim kayıplarıdır ve bu da üretim ve yük arasında ani dengesizlik ile sonuçlanır. Frekans sapmasının kontrol şemaları, yük atmaya gerek kalmaksızın diğer birimlerdeki rezervleri harekete geçirir ve yük tarafından talep edilen enerjiyi sağlar. Bu sayede sistem frekansında iyileştirme sağlanır.

Büyük bir frekans sapması olduğunda, birinci kontrol (ilk 30 dakikada), rezerv birimlerini otomatik olarak hızlı bir şekilde başlatmak için etkinleştirilir. Aktive edilmiş tüm generatörlerin denetleyicileri güç çıkışı ve tüketim arasında denge kurulana kadar generatörlerin verdiği gücü değiştirir [75].

İkincil kontrol, sistem güç dengesizliği içeriyorsa, başlangıç frekansına geri dönmek ve güç dengesini sağlamak için frekansı ve güç sapmasını 15 ile 30 saniye arasındaki bir sürede kontrol altına alır. Üçüncül kontrol birincil ve ikincil frekans kontrolüne göre daha yavaştır. Sistem frekansı kontrol altına alınamazsa sistem çöküşü ve üretim kaybı riskini en aza indirmek için yük atma işlemi son seçenek olarak kullanılır. Genellikle frekans kararlılık problemi, kontrol ve koruma cihazlarının zayıf olması, tepki verememesi veya yetersiz üretim rezervlerinden kaynaklanmaktadır [75].

3.1.3. Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararlılığı güç sisteminde meydana gelen bozucu etki sonrasında sistemdeki tüm baraların başlangıçtaki çalışma koşullarına dönebilme yeteneği olarak tanımlanır [71]. Voltaj sapsmalarının önceden belirlenmiş limitlerde olması gerekir. Voltaj kararlılığı, güç sisteminin tamamında yük ile generatörler arasındaki aktif ve reaktif güç dengesine ve bu dengeyi normal ve anormal çalışma koşullarında koruyabilme yeteneğine bağlıdır. Gerilim istikrarsızlığının temel nedeni mevcut reaktif güç kaynaklarının sistemin reaktif güç gereksinimlerini karşılayamamasıdır. Diğer neden ise aktif ve reaktif güç akışı iletim hattının endüktif reaktansı üzerinden gerçekleştiğinde meydana gelen aşırı gerilim düşümüdür [72].

Gerilim kararlılığı son yıllarda güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biri haline gelmiştir. Güç sistemine ilave edilen yük ve üretim birimlerinin karakteristiklerinin farklı olması güç sistemlerinin işletimini zorlaştırmaktadır. Gerilim kararsızlığının temel nedenlerinden biri mevcut iletim hattının limitlerinin üzerinde çalıştırılmaya zorlanmasıdır. Bunun sebebi ise yeni iletim hatları inşa etmenin ekonomik ve coğrafi zorluklarıdır. Bu durumda mevcut hatlardan en üst seviyede faydalanmak gerekmektedir [73]. Bozucu etki sonrası sistem baralarında gerilim

kabul edilebilir değerler arasında ise g sistemi kararlıdır. Bozucu etki ile beraber gerilim düşümü belirlenen limitlerin dışında bir değer alırsa güç sistemi kararsız olur. Gerilim istikrarsızlığı reaktif gücün yetersizliğine ve aşırı yük artışına bağlı olarak gerçekleşir.

Güç sistemlerinde yk tarafından talep edilen güç sürekli olarak değişmektedir. Yükün artması bara gerilimlerinde düşüşe neden olmaktadır. Gerilim değerinin sistemi kararsızlığa götürecek olan kritik gerilim değerinin altına düşmemesi gerekmektedir. Kritik değerlerin aşılması ile bölgesel kesintiler veya sistem kş gerçekleşebilir.

Gerilim kararsızlığına neden olan önemli faktörler aşığıdaki gibi ifade edilir [76].

- Üretim merkezleri ile yk birimleri arasındaki mesafenin uzak olması
- Düşük gerilim durumunda transformatörlerde kademe değiştirme
- Yük karakteristiklerinin uygun olmaması
- Kontrol ve koruma sistemleri arasındaki koordinasyonun bozuk olması.

Gerilim kararlılığı, zaman açısından kısa süreli gerilim kararlılığı ve uzun süreli gerilim kararlılığı olmak üzere iki kısıma ayrılabilir. Kısa süreli gerilim kararlılığı, hızlı yk bileşeninin dinamiklerini içerir. Uzun süreli gerilim kararlılığı, generatörler ve transformatörler gibi daha yavaş çalışan ekipmanları içerir. Gerilim kararsızlığı problemini ortadan kaldırmak için acil durumlarda gerilim desteği sağlamak, reaktif gök kontrol ve kompanzasyon cihazlarını kullanmak gibi birçok yöntem vardır [69].

3.1.3.1. Gerilim Kararlılığının Tanımı

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı konusunda birçok tanım yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşığıda belirtilmiştir.

- Genel olarak gerilim kararlılığı; gök sistemlerinde meydana gelen bozucu etki sonrasında bara gerilimlerinin başılangı konumuna dönebilme yeteneğidir. Güç sisteminin bu yeteneğini sürdürebilmesi yk ile üretilen gök arasındaki dengeye bağlıdır. Kararsızlık durumunda bara gerilimlerinde sürekli bir düşüş veya yükselme meydana gelebilir. Gerilim kararsızlığının sonucunda meydana gelen kesintiler bazı generatörlerin senkronizmayı kaybetmesine neden olur [77]
- Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, bozucu etkisi sonrası sistemin tekrar denge konumuna dönebilme kabiliyeti olarak ifade edilir. Diğer bir tanımda ise; gök sisteminin bozucu etkiye (kısa devreler, açma kapama olayları) maruz kaldıktan

sonra başlangıç koşullarına dönebilme yeteneği olarak tanımlanabilir [78]

- Bir başka tanımda ise gerilim kararlılığı, sistemin sadece kararlı bir şekilde çalışma kabiliyeti değil aynı zamanda oluşabilecek çeşitli arıza ya da işletme durumları karşısında kararlı kalabilme yeteneğidir [79].

3.1.3.2. Gerilim Çökmesi Olayı

Gerilim çöküşünün temel nedeni yükün artması sonucu iletim hatlarında veya generatörlerde meydana gelen kayıplardır. Kayıpların artmasıyla iletim hatları kapasitesinin üzerinde çalıştırılmaya zorlanır ve reaktif güç kaynakları azalır. İletim hattının limitlerinin üzerinde çalıştırılması diğer hatlardaki reaktif güç kaybını artırır. Böylece güç sisteminde reaktif güç talebi artmış olur. Yükün artışına bağlı olarak yük baralarında önemli derecede gerilim düşmesi meydana gelir. Enerji iletim hattında meydana gelen gerilim düşmesi dağıtım hattına da etki eder. Dağıtım sistemindeki ekipmanlar vasıtasıyla gerilim ve yükler eski haline döndürülmeye çalışılır. Bu işlemler sonucunda ise hattaki aktif ve reaktif güç kayıpları artacaktır. Bunun sonucunda iletim hattındaki gerilim düşümleri daha büyük olacaktır. Generatörlerin uyarma akımları tarafından belirlenen reaktif güçler sınır değerlere ulaştığında uç gerilimleri düşmeye başlar. Böylece gerilim kararsızlığı güç sisteminde senkronizasyon kaybı ve gerilim çökmesine neden olur [76]. Gerilim kararsızlığı ve beraberindeki olaylar dinamik bir süreçtir. Fakat gerilim ve sistem kararlılığı statik analiz yöntemleriyle analiz edilir [80].

Dünyadaki önemli gerilim çökmesi olayları aşağıda belirtilmiştir.

- 1978 Fransa Çöküntüsü: Öğleden önce saat 7–8 arasında bir önceki gün talep edilen yükten 1600 MW daha fazla güç talebi olmuştur. 400 kV’luk şebeke 342 kV’a düştü bu durum yirmi dakika sürdü. Gerilim normal haline saat 12.30’da getirilebildi. Bu arada 29 GW ve 100 GWh enerji kesintiye uğramıştır [73]
- 1987 Batı Fransa Çöküntüsü: Uyarım koruma sistemindeki hatadan dolayı gerilimde 0.5–0.8 p.u seviyelerine kadar düşüş gerçekleşmiştir. Gerilim çökmesi olayı meydana gelmiştir [73]
- 13 Mart 1989 Kanada Çöküntüsü: Kısa bir sürede La Granda şebekesinde bulunan 7 adet statik kompanzatörlerin peş peşe devreden çıkmasıyla, 0.2 p.u değerinde bir gerilim düşümü meydana gelmiş sistem senkronizasyonunu kaybederek devreden çıkmıştır. Gerilimdeki düşüşle beraber yük atma işlemi düzgün yapılmadığından 25 saniye içinde sistem çöküşü meydana gelmiştir. Toplamda 21.000 MW’lık

elektrik santralının devreden çıkması sonucu 9 saat süren bir kesinti meydana gelmiştir. Kesintiden yaklaşık 6 milyon insan etkilenmiştir [81],[82]

- 1992 Güney Finlandiya Çöküntüsü: Sınır değerlerine yakın bir seviyede çalıştırılan iletim hattının 400 kV değerindeki gerilim seviyesi 344 kV'a kadar düşmüştür. Gerilim seviyesi reaktif güç üretiminin artırılması ile normal seviyesine getirilebilmiştir [73]
- 1996 Amerika Çöküntüsü: 345 kV'luk hatta kısa devre meydana geldi ve Kuzeybatı Amerika sistemi kesintiye uğramıştır. Kesintinin nedeni gerilim ve açı kararsızlığıdır [83]
- 2003 İsveç Çöküntüsü: Faz-faz arası arıza ile başlayan kesinti gerilim çökmesi ile sonuçlanmıştır. Sistemin tekrar devreye alınması 6,5 saat sürmüştür [73]
- 14-15 Ağustos 2003 Kuzeydoğu A.B.D. ve Kanada Çöküntüsü: 29 saat süren bu kesintinin ana sebebinin yetersiz reaktif güç ve buna bağlı olarak meydana gelen gerilim kararsızlığı olduğu belirtilmiştir [84],[85].

3.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIĞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Doğrusal olmayan bir sistemin kararlılığı girdilerin türüne, büyüklüğüne ve başlangıç durumuna bağlıdır. Güç sistemi kararlılığı, sistem ekipmanının davranışı ve özellikleri, sistem kontrolü ve koruma şemaları gibi birçok faktörden etkilenir. En önemli faktörler;

- Arıza öncesi generatörlerin yüklenmesi ve arıza sırasında generatör çıktıları gibi bozucu sistem durumu. Arızadan önce yüklenme ne kadar yüksek olursa arızalar esnasında daha az istikrarlı olma ihtimali o kadar yüksek olur
- Arızanın süresi, yeri ve tipi kinetik enerji kazancının miktarını belirleyecektir. Arıza süresi daha uzun olursa generatör rotorları arıza sırasında daha fazla kinetik enerji kazanabilir. Kazanılmış enerji arıza giderme sonrasında atılabılır. Kazanılmış enerji istikrarsızlığa neden olabilir
- Atalet sabiti H ve generatör terminal gerilimi gibi senkron makine parametreleri. Generatör atalet sabitinin artması rotor açısının salınımlarını azaltma eğilimindedir ve dolayısıyla sistem kararlılığını artırır
- Senkron makinelerin uyarma sistemi güç salınımlarının sönümlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Otomatik voltaj regülatörü terminal gerilimini algılar ve terminal gerilimini kontrol etmeye yardımcı olur [72].

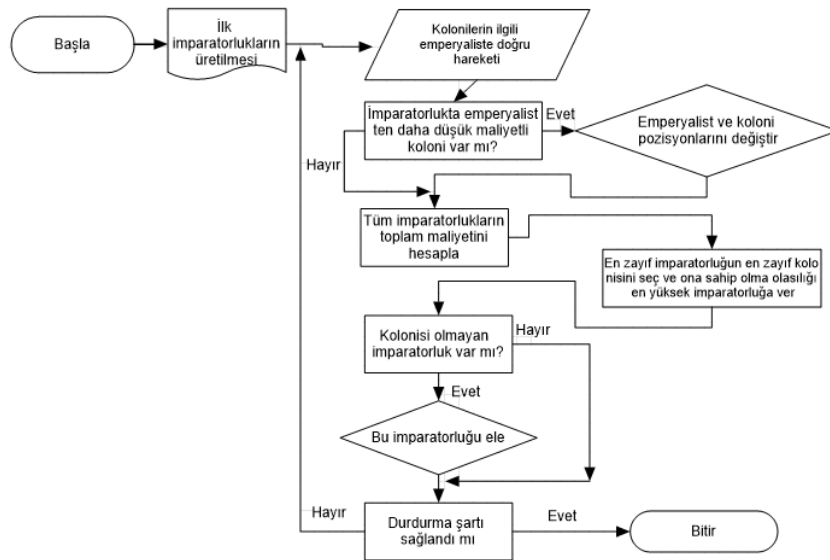
4. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

4.1. EMPERYALİST REKABETÇİ ALGORİTMA (ICA)

Emperyalist rekabetçi algoritma diğer evrimsel algoritma örneklerinde olduğu gibi başlangıç popülasyonu ile başlar. Ülke olarak adlandırılan bireyler iki türdür. Bu bireyler koloniler ve emperyalistlerdir. Koloniler ve emperyalistler imparatorlukları oluşturur. Bu imparatorluklar arasındaki emperyalist rekabet, önerilen evrimsel algoritmasının temelini oluşturmaktadır. Bu rekabet sırasında zayıf imparatorluklar çöker ve güçlü olanlar kolonilerini ellerinde tutarlar [86].

Tüm kolonileri emperyalistler arasında bölüştürdükten sonra, koloniler emperyaliste doğru hareket eder. Bir imparatorluğun toplam gücü, hem emperyalist ülkenin gücüne hem de sömürgelerinin gücüne bağlıdır.

Daha sonra imparatorluklar arasında emperyalist rekabet başlar. Bu rekabette başarılı olamayan ve gücünü artıramayan imparatorluk yarışma dışı bırakılır. Zayıf imparatorluklar güçlerini yitirir ve sonunda çökerler. Kolonilerin ilgili emperyalistlere doğru ilerlemesi ve imparatorluklar arasındaki rekabet ve çöküş mekanizması yalnızca bir imparatorluğun kalmasına neden olur. Şekil 4.1 ICA algoritmasının akış şemasını göstermektedir [34].



Şekil 4.1. Emperyalist rekabetçi algoritmanın akış şeması.

4.1.1. Başlangıç İmparatorluklarının Oluşturulması

Optimizasyonun amacı, problemin değişkenleri açısından optimal bir çözüm bulmaktır. Optimize edilmek için değişken değerler dizisi oluşturulur. GA yönteminde bu diziye kromozom denir, ancak burada bu dizi için ülke terimi kullanılır. Bir N_{var} boyutlu optimizasyon probleminde ülke; $1 \times N_{var}$ dizisi ile ifade edilir. Bu dizi Denklem (4.1)'de gösterilmiştir.

$$country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}] \quad (4.1)$$

Optimizasyon problemi sırasında, algoritma en iyi özelliklere sahip ülkeyi arar. Ülkeyi bulmak için, algoritmanın en düşük maliyet fonksiyonuna sahip ülkeyi bulması gerekir. Bir ülkenin maliyeti, $(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}})$ değişkenlerini içeren f maliyet fonksiyonu kullanılarak bulunur. Maliyet fonksiyonu Denklem (4.2)'de gösterilmiştir [86].

$$cost = f(country) = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}) \quad (4.2)$$

Optimizasyon algoritmasına başlamak için ilk olarak popülasyonun boyutu (N_{pop}) üretilir. İmparatorlukları kurmak için en güçlü ülkelerin değeri (N_{imp}) seçilir. Popülasyonun geri kalanı her biri bir imparatorluğa ait olan sömürgelerden (N_{col}) oluşur. İlk imparatorlukları elde etmek için kolonileri emperyalistler arasında kendi güçlerine göre bölmek gerekir. Bu, bir imparatorluğun başlangıç kolonilerinin doğrudan gücü ile orantılı olduğu anlamına gelir. Kolonileri emperyalistler arasında orantılı olarak dağıtmak için kullanılan standartlaştırılmış maliyet fonksiyonu Denklem (4.3)'te verilmiştir [86].

$$C_n = c_n - \max(c_i) \quad (4.3)$$

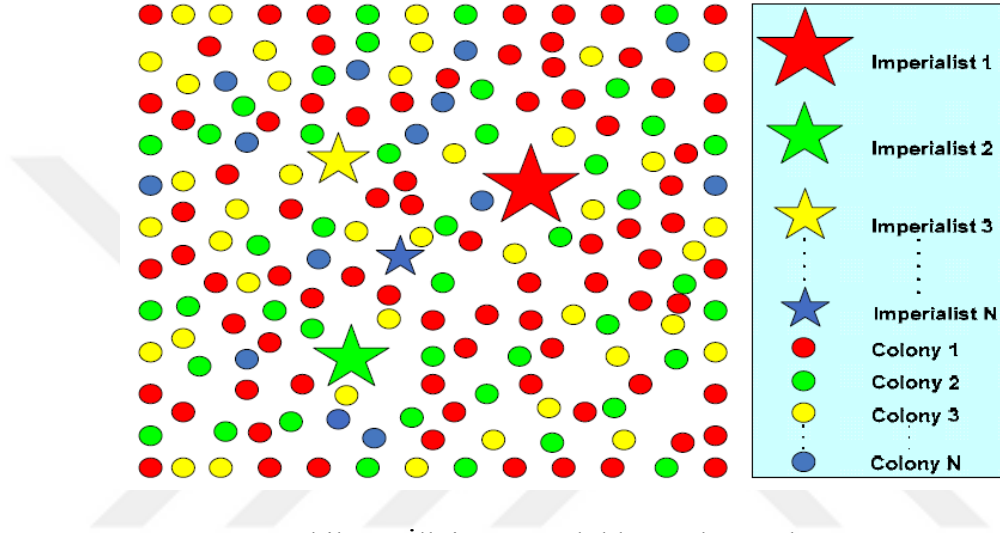
Denklem (4.3)'te c_n , n. emperyalistin maliyet fonksiyonu, $\max(c_i)$ emperyalistler arasındaki maksimum maliyet ve C_n emperyalist için normalleştirilmiş maliyettir. Tüm emperyalistlerin normal maliyeti olan, her emperyalistin normalize edilmiş gücü Denklem (4.4) ile hesaplanır.

$$p_n = \left| \frac{c_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} c_i} \right| \quad (4.4)$$

Bir imparatorluğun gücü kendi yetki alanındaki kolonilere bağlıdır. Böylece imparatorluğun kolonilerinin başlangıç sayısı Denklem (4.5) ile ifade edilir.

$$N.C_n = \text{round} \{p_n * N_{col}\} \quad (4.5)$$

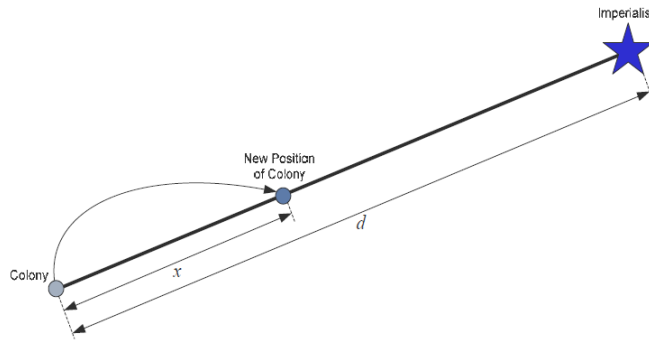
Denklem (4.5)'te $N.C_n$ n. imparatorluğun kolonilerinin başlangıç sayısı, N_{col} ise bütün kolonilerin sayısıdır. Koloniler emperyalistlerle birlikte n. imparatorluğu kurarlar. Şekil 4.2, imparatorlukların başlangıç popülasyonunu göstermektedir. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, büyük imparatorluklar daha fazla koloniye sahip iken zayıf olanlar daha az koloniye sahiptir. Şekil 4.2'de Imperialist 1 en güçlü imparatorluktur ve en fazla koloniye sahiptir [86].



Şekil 4.2. İlk imparatorlukların oluşturulması.

4.1.2. Kolonilerin Emperyaliste Hareketi

Algoritmanın bu aşamasında imparatorluklar farklı bölgelerdeki kolonilerini toplamayı dener. Şekil 4.3 kolonilerin emperyaliste doğru hareketini göstermektedir [86].



Şekil 4.3. Kolonilerin ilgili emperyaliste doğru hareketi.

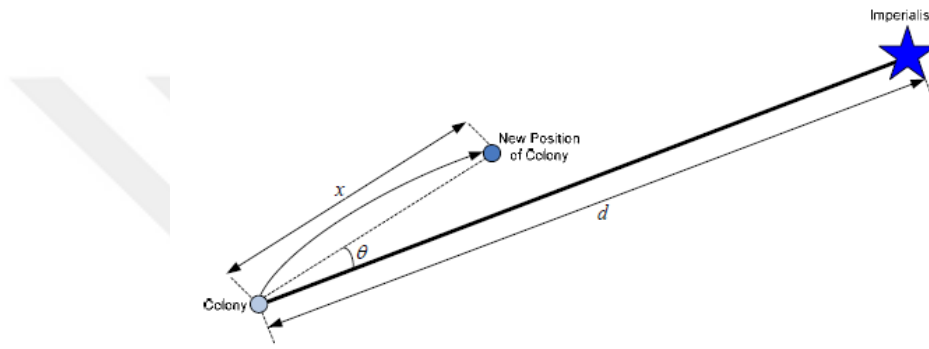
Şekil 4.3'te gösterildiği gibi koloni x birim yer değiştirerek yeni konumunu alır ve emperyaliste doğru hareket eder. İmparatorluk ve koloni arasındaki toplam mesafe d ile

gösterilir. x rastgele bir değerdir ve Denklem (4.6)'daki ilişkiyi takip eder.

$$X \sim U(0, \beta \times d) \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'da β , 1'den büyük bir sayıdır. d koloni ile emperyalist arasındaki uzaklıktır. $\beta > 1$ durumu kolonilerin her iki taraftan emperyaliste daha yakın olmasını sağlar [87].

Emperyalist etrafındaki farklı noktaları aramak için hareket yönünde rastgele bir sapma miktarı eklenir. Şekil 4.4'te kolonilerin ilgili emperyaliste doğru sapma açısı ile hareketi gösterilmiştir [86].



Şekil 4.4. Kolonilerin ilgili emperyaliste doğru sapma açısı ile hareketi.

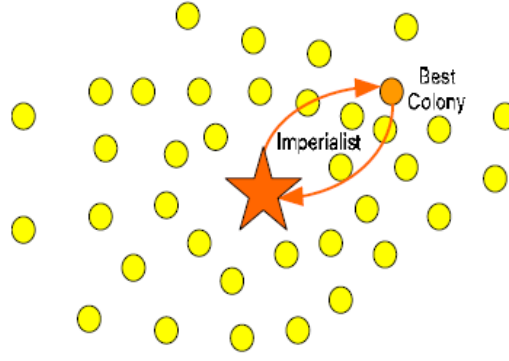
Şekil 4.4'te θ , düzgün bir dağılıma sahip rastgele bir sayıdır ve Denklem (4.7)'deki ifadeyi takip eder. Burada γ sapmayı ayarlayan bir parametredir. $\beta = 2$ ve $\gamma = \frac{\pi}{4} (rad)$ değerleri uygulamalarda en doğru sonucu verir [86].

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (4.7)$$

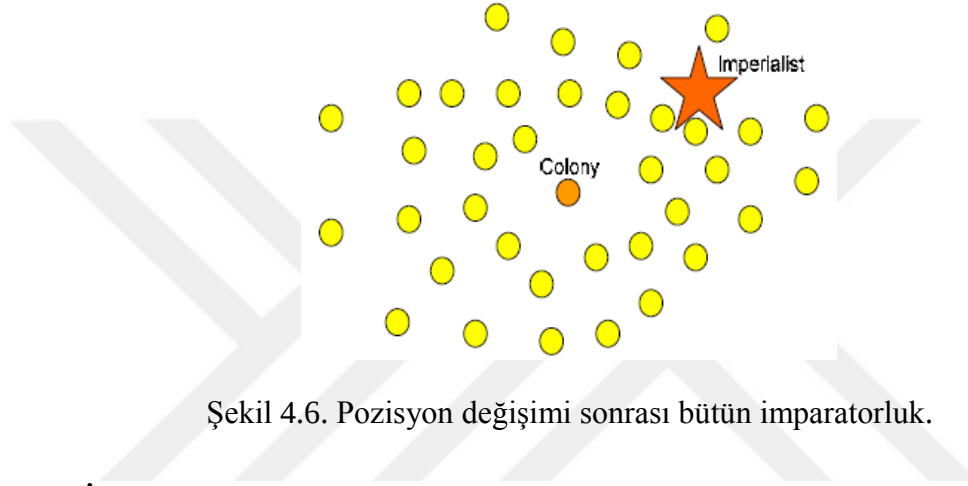
4.1.3. Emperyalist ve Koloni Konumlarının Değişimi

Kolonilerin imparatorluklara doğru ilerlemesi esnasında bazı koloniler imparatorluklardan daha iyi yerler elde etmektedir. Bu durumda koloni ve imparatorluk yer değiştirir ve algoritma yeni bir imparatorluk ile devam eder ve yeni imparatorluk asimilasyon yapmaya ve kolonileri kapmaya başlar.

Şekil 4.5 koloni ile emperyalist arasındaki konum değişimini göstermektedir. Şekil 4.5'te imparatorluğun sahip olduğu en iyi koloni koyu renkte gösterilmiştir. Şekil 4.6 emperyalist ve koloninin konumlarını değiştirmesi sonucu oluşan imparatorluğu göstermektedir [86].



Şekil 4.5. Koloni ve emperyalist pozisyonlarının değişimi.



Şekil 4.6. Pozisyon değişimi sonrası bütün imparatorluk.

4.1.4. İmparatorluğun Toplam Gücü

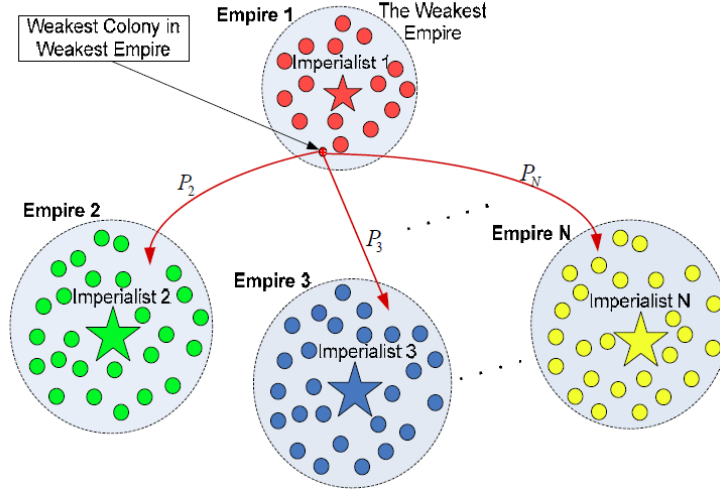
Emperyalistin toplam gücü, imparatorluğun gücüne ve koloni gücünün bir kısmına eşittir. Emperyalistin toplam gücü Denklem (5.8) ile hesaplanır.

$$T.C_n = cost(imperialist_n) + \xi \cdot mean\{cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'de $T.C_n$, n. imparatorluğun toplam maliyeti ξ ise 0 ve 1 arasında bir değerdir. ξ 'nın küçük bir değer olduğunu varsayarsak, hem emperyalist hem de imparatorluğun toplam maliyeti eşit olur [34].

4.1.5. Emperyalist Rekabet

Herhangi bir imparatorluk gücünü artıramaz ise emperyalist rekabet sırasında ortadan kaldırılır. Emperyalist rekabet, zayıf imparatorlukların gücünü yavaş yavaş azaltır ve daha güçlü imparatorlukların gücünü artırır. Bu yarış, en zayıf imparatorlukların en zayıf sömürgelerinden sadece bir kısmını seçip bu kolonilere sahip olmak için tüm imparatorluklar arasında rekabet oluşturarak modellenir. Şekil 4.7 emperyalist rekabeti göstermektedir [86].



Şekil 4.7. Emperyalist rekabet.

İmparatorluklar arasındaki rekabetin modellenmesi, koloniyi kapmak için imparatorlukların toplam maliyetini göz önüne alarak Denklem (4.9)'da verilen eşitliği esas alır. Algoritma öncelikli olarak imparatorlukların toplam maliyetine bağlı olarak, toplam maliyeti hesaplar. Normalleştirilmiş maliyet hesabı Denklem (4.9) kullanılarak hesaplanır.

$$N.T.C_n = T.C_n - \max \{T.C_i\} \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'da $T.C_n$ ve $N.T.C_n$ sırasıyla toplam maliyet ve n. imparatorluğun normalleştirilmiş toplam maliyetidir. Toplam normalize edilmiş maliyetle, her imparatorluğun koloni elde etme ihtimali Denklem (4.10) ile hesaplanır [34].

$$p_{p_n} = \left| \frac{N.T.C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C_i} \right| \quad (4.10)$$

Kolonileri, imparatorlukların sahip olma ihtimaline dayanarak bölmek için P vektörü oluşturulur. Denklem (4.11)'de gösterilen P vektörü $1 \times N_{imp}$ boyutuna sahiptir. Bu sebepten dolayı R vektörü de aynı boyutta oluşturulmalıdır. Denklem (4.12)'de gösterilen R vektörünün dizileri 0 ile 1 arasında rastgele bir değere sahiptir [86].

$$P = [p_{p_1}, p_{p_2}, p_{p_3}, \dots, p_{p_{N_{imp}}}] \quad (4.11)$$

$$R = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}], r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}} \sim U(0,1) \quad (4.12)$$

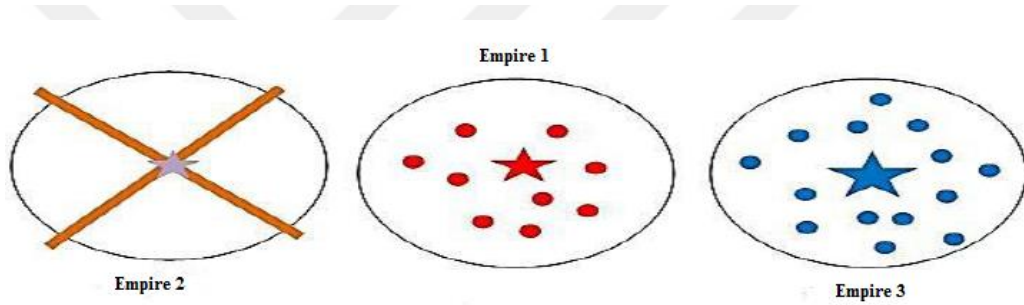
P vektöründen R vektörü çıkarılarak D vektörü oluşturulur. Algoritma en zayıf koloniyi en yüksek D indeksli imparatorluğa atamaya karar verir. D vektörünün elde edilmesi Denklem (4.13) ve (4.14)'te gösterilmiştir.

$$D = P - R = [D_1, D_2, D_3, \dots, D_{N_{imp}}] \quad (4.13)$$

$$D = P - R = [p_{p_1} - r_1, p_{p_2} - r_2, p_{p_3} - r_3, \dots, p_{p_{N_{imp}}} - r_{N_{imp}}] \quad (4.14)$$

4.1.6. Zayıf İmparatorlukların Çöküşü

Emperyalist rekabet sırasında zayıf imparatorluklar yavaş yavaş çöker ve koloniler diğer güçlü imparatorluklar arasında paylaşılır. İmparatorlukların çöküşü için farklı senaryolar tanımlanabilir. Bu durumda, imparatorluklar kolonilerini kaybettiklerinde elenirler. Şekil 4.8 zayıf imparatorluğun çöküşünü göstermektedir [34].



Şekil 4.8. Zayıf imparatorlukların çöküşü.

Şekil 4.8'de gösterildiği gibi Empire 2 tüm kolonilerini kaybetmesi nedeniyle elenir ve rekabet diğer iki imparatorluk arasında devam eder. Algoritma, yakınsama koşuluna bağlı olarak ve tüm iterasyonlar bitene kadar devam eder. Bir süre sonra bütün imparatorluklar çöker ve tüm kolonileri kendi yetki alanına alan bir imparatorluk kalır. Bu durumda bütün sömürgeler bir emperyalistin kontrolü altına girer. Böylece emperyalist rekabet biter ve algoritma sonlandırılır.

Emperyalist rekabetçi algoritmanın adımları aşağıda kısaca özetlenmiştir [88].

- Rastgele noktaların seçilmesi ve ilk imparatorlukların oluşturulması
- Kolonilerin ilgili emperyaliste doğru hareket ettirilmesi (Asimilasyon)
- Bir imparatorlukta emperyalistten daha düşük maliyete sahip bir koloni varsa, bu koloni ile emperyalist pozisyonlarının değiştirilmesi
- Emperyalistler ve koloniler dahil tüm maliyetin hesaplanması
- Emperyal rekabet (En zayıf imparatorluğun en zayıf kolonisinin seçilmesi ve

kendisine en çok sahip olabilecek imparatorluğa verilmesi)

- Zayıf imparatorlukların elenmesi

4.2. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU (PSO)

PSO kuş sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenilerek Dr Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından 1995 yılında geliştirilen popülasyona dayalı stokastik optimizasyon tekniğidir. PSO etkin bir küresel optimizasyon algoritmasıdır ve en iyi çözüm, gruptaki bireyler arasındaki işbirliği ve bilgi paylaşımı ile bulunur [89],[90]. PSO doğrudan arama tekniğidir. PSO'nun avantajı herhangi bir karmaşık matematiksel işlem olmaksızın doğal olarak tanımlanmış fonksiyonu en aza indirmek için kullanılabilmesidir. Çok az ayarlanabilir parametre içermesi nedeniyle uygulamada kolaydır.

Parçacık olarak adlandırılan her aday çözüm, yerel ve küresel optimum noktaları izleyerek kendini günceller. Algoritma üç adımdan oluşur. Üçüncü adım, algoritmanın optimizasyon yeteneğini belirler.

PSO yönteminin adımları [91];

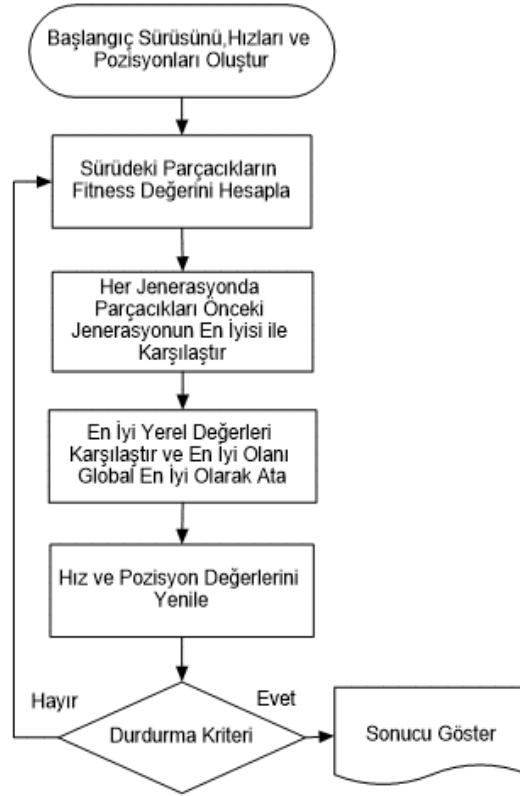
- Parçacıkların uygunluğunun değerlendirilmesi
- Yerel ve global en iyi pozisyonların güncellenmesi
- Her parçacığın hızını ve konumunu güncelleme.

Temel olarak PSO Denklem (4.15)'te ifade edilen hız güncelleme ve Denklem (4.16)'da ifade edilen konum güncelleme denklemlerini kullanarak çalışır.

$$v_{i,d}^{t+1} = w_i^t * v_{i,d}^t + c_1 r_1 (p_{i,d} - x_{i,d}^k) + c_2 r_2 (g_d - x_{i,d}^k) \quad (4.15)$$

$$x_{i,d}^{t+1} = x_{i,d}^t + v_{i,d}^{t+1} \quad (4.16)$$

Denklem (4.15) ve (4.16)'da ifade edilen i parçacık endeksi, t iterasyon sayısı, x parçacığın pozisyonu, v parçacık hızı, d arama alanının boyutu, c_1 bilişsel bileşen için ivme sabiti, c_2 sosyal bileşen için ivme sabiti, r_1 ve r_2 0 ve 1 aralığında rastgele örnekleme değeri p en iyi bireysel konum ve g şimdiye kadar elde edilen en iyi küresel konumdur. w_i parametresi atalet ağırlığı olarak bilinir ve yerel ve küresel arama yeteneğini dengeleyerek parçacık hızını güncellemek için kullanılır [92]. Şekil 4.9'da PSO'nun akış şeması gösterilmiştir [93].

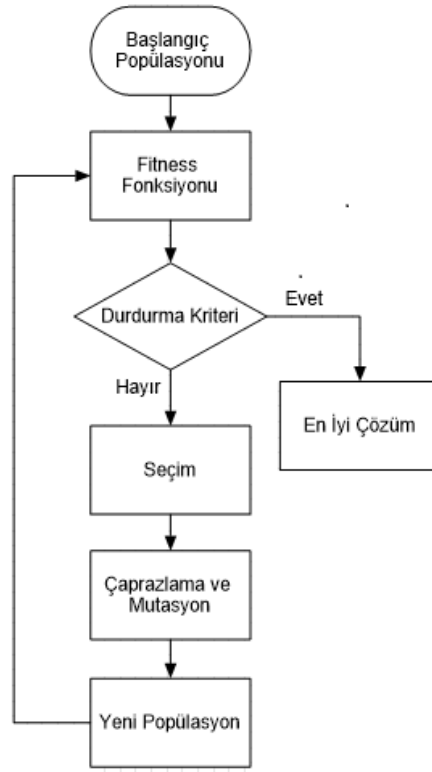


Şekil 4.9. PSO akış şeması.

4.3. GENETİK ALGORİTMA (GA)

GA evrimsel ilerleyişi tasvir eden doğal seleksiyon sürecine tabi tutulan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan sezgisel optimizasyon tekniğidir [94]. Geleneksel optimizasyon veya arama yöntemlerinden farklı olarak, GA olası bir çözüm havuzunu aynı anda inceler.

GA’da çözüm adayları kromozom olarak adlandırılır ve popülasyon olarak bilinen arama alanını oluşturur. Kromozomlar hayatta kalmak için rekabet eder ve daha iyi uyum sağlamak için işbirliği yaparlar. Genetik algoritmanın temel etkinliği, doğrusal olmayan fonksiyonların problemlerini çözmeye yöneliktir. GA, popülasyonun oluşturulması, mutasyon, çaprazlama ve karşılaştırma evrelerinden oluşur [95]. GA’nın akış şeması Şekil 4.10’da gösterilmiştir [96].



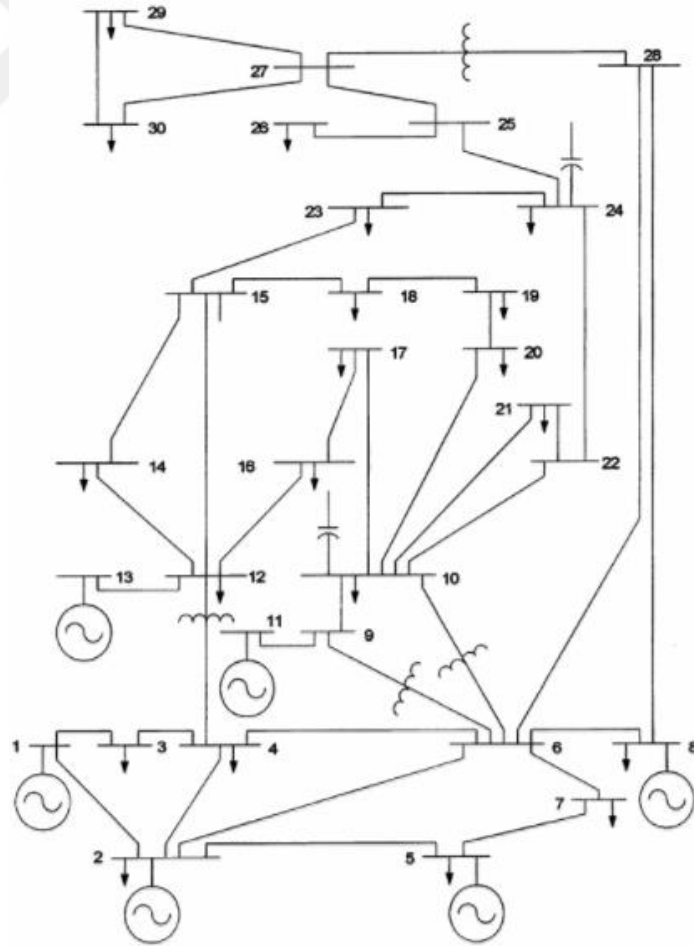
Şekil 4.10. GA akış şeması.

5. OPTİMİZASYON PROBLEMİ

Bu bölümde IEEE-30 baralı güç sisteminde SVC ve UPFC cihazlarının optimum yerleşim noktalarının belirlenmesi için kullanılan amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar anlatılmıştır. Ayrıca optimizasyon parametreleri ve emperyalist rekabetçi algoritmanın optimizasyon problemine uygulanışı bir örnekle anlatılmıştır.

5.1. IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ

IEEE-30 baralı güç sisteminde 6 generatör, 41 hat ve 30 bara bulunur. Güç sisteminin tek hat şeması Şekil 5.1’de gösterilmiştir [97]. Güç sisteminin, bara, generatör ve hat verileri sırasıyla Ek-1, Ek-2 ve Ek-3’te belirtilmiştir.



Şekil 5.1. IEEE-30 baralı güç sisteminin tek hat şeması.

5.2. SVC DENETLEYİCİSİ İÇİN AMAÇ FONKSİYONU VE KISITLAR

Bu bölümde IEEE-30 baralı güç sisteminde SVC cihazlarının optimum konumu ve boyutlandırılması için kullanılan amaç fonksiyonu ve kısıtlar anlatılmıştır.

5.2.1. Amaç Fonksiyonu

Güç sisteminde SVC'nin optimal yerleşimini gerçekleştirmek için iki amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Birinci amaç fonksiyonu gerilim sapmasını en aza indirmeyi, ikinci amaç fonksiyonu ise SVC boyutunu minimize etmeyi amaçlamaktadır. J_1 ve J_2 amaç fonksiyonları Denklem (5.1) ve Denklem (5.2)'de gösterilmiştir [97].

$$J_1 = V_d = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{bus}} (V_i - 1)^2} - 1 \quad (5.1)$$

$$J_2 = \sum_{j=1}^{N_{units}} \eta_j \quad (5.2)$$

Denklem (5.1)'de J_1 voltaj sapması, V_i i. baranın voltaj değeri ve N_{bus} sistemdeki toplam bara sayısıdır. Denklem (5.2)'de J_2 SCV boyutunu, η_j SVC'nin MVA cinsinden büyüklüğünü, N_{units} ise tahsis edilecek SVC'lerin sayısını ifade eder.

J_1 ve J_2 toplamı birleştirilerek J amaç fonksiyonu elde edilir. Burada J genel amaç fonksiyonudur. Denklem (5.3)'te $w_1 = 1$ ve $w_2 = 0.004$ kabul edilmiştir. En iyi çözüm durumunda J minimum olmalıdır.

$$J = w_1 \cdot J_1 + w_2 \cdot J_2 \quad (5.3)$$

5.2.2. Arama Alanı (Kısıtlar)

Bu problemde, güç sisteminin karakteristikleri ve arzulanan gerilim profili ile ilgili kısıtlamalar vardır. Bu kısıtlamaların her biri, arama alanındaki bir sınırı temsil eder.

Güç sisteminin topolojisi dikkate alındığında, bara numaraları 1'den 30'a kadar olan aralıkta sınırlı olduğundan, Denklem (5.4)'te gösterilen sınırlama dikkate alınmalıdır. Denklem (5.4)'te λ_j SVC konumunu ifade eder.

$$1 \leq \lambda_j \leq N_{bus} \quad , \quad j \in \{1, 2, \dots, N_{units}\} \quad (5.4)$$

Aynı baraya bağlı birden fazla SVC konumlandırılması olayı uygulanamaz olarak kabul edilir ve Denklem (5.5) ile ifade edilir. İstenilen voltaj profili, Denklem (5.6)'da gösterilen kısıtlamayı gerektirir.

$$\lambda_i \neq \lambda_j \quad (5.5)$$

$$0.95 \leq V_{bus} \leq 1.05 \quad (5.6)$$

Kısıtlamaları karşılamayan her çözüm uygulanamaz kabul edilir. Son olarak, SVC cihazlarının boyutlarını sınırlamak için Denklem (5.7)'deki kısıtlamalar uygulanır.

$$0 \leq \eta_j \leq 100 \quad , \quad j \in \{1, 2, \dots, N_{units}\} \quad (5.7)$$

5.3. UPFC DENETLEYİCİSİ İÇİN AMAÇ FONKSİYONU VE KISITLAR

5.3.1. Amaç Fonksiyonu

Güç sisteminde UPFC'nin optimal yerleşimini gerçekleştirmek için iki amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Birinci amaç fonksiyonu gerilim sapmasını en aza indirmeyi, ikinci amaç fonksiyonu ise sistem kayıplarını azaltmayı amaçlamaktadır. J_1 ve J_2 amaç fonksiyonları Denklem (5.8) ve Denklem (5.12)'de gösterilmiştir [98].

$$J_1 = V_d = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{bus}} (V_i - 1)^2} - 1 \quad (5.8)$$

Denklem (5.9)'da ifade edilen δ_i i.baranın voltaj açısı, Y_{ij} iletim hattının admittansı, φ_{ij} admittansın açısıdır. Kayıplar Denklem (5.10) ile hesaplanır.

$$P_L = \sum [V_i^2 + V_j^2 - 2 V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] Y_{ij} \cos(\varphi_{ij}) \quad (5.9)$$

$$P_{Lk} = P_{sending} - P_{receiving} \quad (5.10)$$

İletim hatlarıyla ilgili toplam güç kayıpları Denklem (5.11) ile hesaplanır.

$$P_{L total} = F_{loss} = \sum_{k=1}^{Line-number} P_{Lk} \quad (5.11)$$

$$J_2 = \sum_{k=1}^{Line-number} P_{Lk} \quad (5.12)$$

Optimizasyon probleminin çok amaçlı fonksiyonu J_1 ve J_2 'nin toplamı olarak ifade edilir. Genel amaç fonksiyonu Denklem (5.13)'te gösterilmiştir.

$$minimize J = J_1 + J_2 \quad (5.13)$$

5.3.2. Arama Alanı (Kısıtlar)

Amaç fonksiyonları çeşitli güç sistemi değişkenleri üzerindeki çalışma limitlerini içerir. Bu bölümde amaç fonksiyonu voltaj sapması ve güç kayıpları toplamı olarak tanımlanmıştır. Kullanılan kısıtlar Denklem (5.14), Denklem (5.15), Denklem (5.16), Denklem (5.17), Denklem (5.18) ve Denklem (5.19)'da gösterilmiştir.

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, \quad i = 1 \dots N_G \quad (5.14)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad i = 1 \dots N_G \quad (5.15)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad i = 1 \dots N_{PQ} \quad (5.16)$$

$$i_{sh}^{min} \leq i_{sh} \leq i_{sh}^{max} \quad (5.17)$$

$$V_{se}^{min} \leq V_{se} \leq V_{se}^{max} \quad (5.18)$$

$$0 \leq \phi_{se} \leq 2\pi \quad (5.19)$$

Denklem (5.14)'te ifade edilen P_{Gi} generatör baralarında üretilen aktif güç, Q_{Gi} ise generatör baralarında üretilen reaktif güç değeridir. V_i yük baralarının gerilim değeri, V_{se} UPFC tarafından seri enjekte edilen gerilim, ϕ_{se} seri enjekte edilen gerilimin açısı, i_{sh} UPFC tarafından enjekte edilen şönt akımıdır. N_G generatör baralarının sayısı, N_{PQ} ise yük baralarının sayısıdır.

5.4. OPTİMİZASYON PARAMETRELERİ

ICA yönteminin güç sistemlerinde FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesindeki performansını PSO ve GA ile karşılaştırabilmek için algoritmalarda benzer başlangıç popülasyonları ve durdurma ölçütleri kullanılmıştır. Kullanılan ICA, PSO ve GA parametreleri Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Optimizasyon için kullanılan ICA parametreleri.

ICA Parametre	Değer
Ülke sayısı	24
Asimilasyon katsayısı	2
ξ	0.05
Popülasyon sayısı	50

Tablo 5.2. Optimizasyon için kullanılan PSO parametreleri.

PSO Parametre	Değer
Parçacık sayısı	24
Atalet katsayısı	0.75
Bilişsel parametre	1.15
Sosyal parametre	1.15
Popülasyon sayısı	50

Tablo 5.3. Optimizasyon için kullanılan GA parametreleri.

GA Parametre	Değer
Popülasyon büyüklüğü	24
Crossover olasılığı	0.7
Mutasyon olasılığı	0.05
Popülasyon Sayısı	50

5.5. ICA YÖNTEMİNİN OPTİMİZASYON PROBLEMİNE UYGULANMASI

IEEE-30 baralı güç sisteminde SVC'nin optimal yerleşim noktalarını belirlemek için ICA optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. ICA yönteminin adımları aşağıda anlatılmıştır.

5.5.1. İmparatorlukların Başlatılması

İlk adım, voltaj sapması (V_d) ve SVC boyutuna (η_j) işaret eden ülkeleri tanımlamaktır. IEEE-30 baralı güç sisteminde SVC'lerin konumlandırılabilceği 24 adet yük barası vardır. Optimize edilecek iki değişkenden oluşan 24 ülke (dört emperyalist, yirmi koloni) vardır. Emperyalist rekabetçi algoritma diğer evrimsel algoritma örneklerinde olduğu gibi başlangıç popülasyonu ile başlar. Ülke olarak adlandırılan bireyler iki türdür. Bu bireyler koloniler ve emperyalistlerdir. Denklem (5.20)'de ülke olarak adlandırılan bireyler gösterilmiştir.

$$Country = \begin{bmatrix} Country\ 1 \\ Country\ 2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Country\ 24 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{d3} n_{j3} \\ V_{d4} n_{j4} \\ V_{d6} n_{j6} \\ V_{d7} n_{j7} \\ V_{d9} n_{j9} \\ V_{d10} n_{j10} \\ V_{d12} n_{j12} \\ V_{d14} n_{j14} \\ V_{d15} n_{j15} \\ V_{d16} n_{j16} \\ V_{d17} n_{j17} \\ V_{d18} n_{j18} \\ V_{d19} n_{j19} \\ V_{d20} n_{j20} \\ V_{d21} n_{j21} \\ V_{d22} n_{j22} \\ V_{d23} n_{j23} \\ V_{d24} n_{j24} \\ V_{d25} n_{j25} \\ V_{d26} n_{j26} \\ V_{d27} n_{j27} \\ V_{d28} n_{j28} \\ V_{d29} n_{j29} \\ V_{d30} n_{j30} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$Cost = F (Country) = J (Country) = \begin{bmatrix} J_3 \\ J_4 \\ J_6 \\ J_7 \\ J_9 \\ J_{10} \\ J_{12} \\ J_{14} \\ J_{15} \\ J_{16} \\ J_{17} \\ J_{18} \\ J_{19} \\ J_{20} \\ J_{21} \\ J_{22} \\ J_{23} \\ J_{24} \\ J_{25} \\ J_{26} \\ J_{27} \\ J_{28} \\ J_{29} \\ J_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5686 \\ 0.5231 \\ 0.5874 \\ 0.5315 \\ 0.7485 \\ 0.6987 \\ 0.7278 \\ 0.6415 \\ 0.6514 \\ 0.6874 \\ 0.7817 \\ 0.7417 \\ 0.7574 \\ 0.4374 \\ 0.9214 \\ 0.5315 \\ 0.8616 \\ 0.4306 \\ 0.8987 \\ 0.4835 \\ 0.8562 \\ 0.9117 \\ 0.8713 \\ 0.5067 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Denklem (5.20)'de ifade edilen V_d ve n_j değerleri amaç fonksiyonunda ($J = w_1.J_1 + w_2.J_2$) yerine yazılarak $F (Country)$ değerleri hesaplanmıştır. Denklem (5.21)'de en düşük değere sahip dört bara emperyalist diğer baralar ise bu emperyalistlerin kolonileridir. Denklem (5.21)'deki değerlere göre 24 numaralı bara Emperyalist-1, 20 numaralı bara Emperyalist-2, 26 numaralı bara Emperyalist-3 ve 30 numaralı bara Emperyalist-4 olarak belirlenmiştir. Kalan ülkeler (koloniler), imparatorlukların gücüne bağlı olarak dağıtılır. Bir imparatorluğun sahip olabileceği kolonilerin sayısı doğrudan onun gücüyle orantılıdır. Kolonilerin emperyalistler arasında dağılımı, emperyalistlerin maliyetlerini hesaplamak ve ardından normleştirilmiş maliyetleri belirlemekle başlar.

$$N_{imp} = 4, N_{col} = 20 \quad (5.22)$$

$$c_1 = 0.4306, c_2 = 0.4374, c_3 = 0.4374, c_4 = 0.5067 \quad (5.23)$$

Denklem (5.22) ve Denklem (5.23)'te verilen değerleri kullanarak emperyalistlerin maliyetleri hesaplanır. Emperyalistlerin maliyetleri Denklem (5.24), Denklem (5.25), Denklem (5.26) ve Denklem (5.27)'de gösterilmiştir.

$$c_1 = (0.4306 - 0.5067) = -0.0761 \quad (5.24)$$

$$c_2 = (0.4374 - 0.5067) = -0.0693 \quad (5.25)$$

$$c_3 = (0.4835 - 0.5067) = -0.0232 \quad (5.26)$$

$$c_4 = (0.5067 - 0.5067) = 0 \quad (5.27)$$

Daha sonra her emperyalistin gücü hesaplanır. Emperyalistlerin güçleri Denklem (5.28), Denklem (5.29), Denklem (5.30) ve Denklem (5.31)'de gösterilmiştir.

$$p_1 = \left(\frac{0.4306}{1.8582} \right) = 0.2317 \quad (5.28)$$

$$p_2 = \left(\frac{0.4374}{1.8582} \right) = 0.2353 \quad (5.29)$$

$$p_3 = \left(\frac{0.4835}{1.8582} \right) = 0.2601 \quad (5.30)$$

$$p_4 = \left(\frac{0.5067}{1.8582} \right) = 0.2726 \quad (5.31)$$

Dört emperyalistinde gücünü belirledikten sonra kalan yirmi koloni, imparatorlukları oluşturmak üzere dağıtılır. Bunun için emperyalistlerin her birinin sahip olacağı koloni sayısı hesaplanır. Emperyalistlerin sahip olacağı koloni sayısı Denklem (5.32), Denklem (5.33), Denklem (5.34) ve Denklem (5.35)'te gösterilmiştir.

$$NC_1 = \text{round} (0.2317 * 20) \quad (5.32)$$

$$NC_2 = \text{round} (0.2353 * 20) \quad (5.33)$$

$$NC_3 = \text{round} (0.2601 * 20) \quad (5.34)$$

$$NC_4 = \text{round} (0.2726 * 20) \quad (5.35)$$

Sonuçlar, birinci ve ikinci imparatorluğun dört koloniye sahip olduğunu, üçüncü ve dördüncü imparatorluğun ise altı koloniye sahip olduğunu göstermiştir. İmparatorlukların başlatılması artık tamamlanmış ve algoritma asimilasyon süreci olan bir sonraki aşamaya hazırdır.

5.5.2. Kolonilerin Asimilasyonu

İmparatorlukların başlamasının ardından, bir sonraki adım kolonileri kendi emperyalistlerine doğru hareket ettirmektir.

Bu adımda, tüm kolonileri emperyalist pozisyona daha yakın bir x mesafesi ile hareket ettirerek emperyalistlerine doğru hareket ettirdik.

5.5.3. Emperyalist ve Kolonilerin Konum Değişimi

Koloniler asimilasyon sürecini tamamladıktan sonra, yeni kolonilerin pozisyonları yeni maliyet fonksiyonlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Ardından kolonilerin maliyet fonksiyonları emperyalistlerinin maliyet fonksiyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Herhangi bir koloninin emperyalistinden daha iyi bir maliyet fonksiyonuna sahip olduğu tespit edilmediğinden emperyalist pozisyonunu koloni ile değiştirmemiştir.

5.5.4. İmparatorluklar Arasında Rekabet

Bu aşamada en zayıf imparatorlukların en zayıf kolonilerini ele geçirmek için imparatorluklar arasında rekabet başlatılır. Bu süreç, emperyalist gücü ve kolonilerin ortalama gücünün bir fonksiyonu olan her imparatorluğun gücünü hesaplayarak başlamaktadır. Her bir imparatorluğun toplam maliyet hesabı, Denklem (5.36), Denklem (5.37), Denklem (5.38) ve Denklem (5.39)'da gösterilmiştir.

$$\text{İmparatorluğun_toplam_maliyeti } (TC_1) = -26511 \quad (5.36)$$

$$\text{İmparatorluğun_toplam_maliyeti } (TC_2) = -24761 \quad (5.37)$$

$$\text{İmparatorluğun_toplam_maliyeti } (TC_3) = -22319 \quad (5.38)$$

$$\text{İmparatorluğun_toplam_maliyeti } (TC_4) = -20518 \quad (5.39)$$

Her bir imparatorluğun normalleştirilmiş maliyet hesabı, Denklem (5.40), Denklem (5.41), Denklem (5.42) ve Denklem (5.43)'te gösterilmiştir.

$$NTC_1 = (-26511) - (-20518) = -5993 \quad (5.40)$$

$$NTC_2 = (-24761) - (-20518) = -4243 \quad (5.41)$$

$$NTC_3 = (-22319) - (-20518) = -1801 \quad (5.42)$$

$$NTC_4 = (-20518) - (-20518) = 0 \quad (5.43)$$

Her bir imparatorluğun koloni kapma ihtimali Denklem (5.44) ve Denklem (5.45)'te gösterilmiştir.

$$P_{p1} = 0.49, P_{p2} = 0.36 \quad (5.44)$$

$$P_{p3} = 0.15, P_{p4}=0 \quad (5.45)$$

Her bir imparatorluğun koloni kapma ihtimali hesaplandıktan sonra P, R ve D vektörleri oluşturulur. P, D ve R vektörleri Denklem (5.46), Denklem (5.47) ve Denklem (5.48)'de gösterilmiştir. En yüksek D indeksine sahip imparatorluk diğer imparatorlukların kolonilerini toplayarak emperyal rekabet sürecinden galip çıkan taraftır.

$$P= [0.49, 0.36, 0.15, 0] \quad (5.46)$$

$$R= [0.23, 0.18, 0.1, 0.43] \quad (5.47)$$

$$D= [0.26, 0.18, 0.05, -0.43] \quad (5.48)$$

D vektör değerleri incelendiğinde 0.26'lık değer ile emperyal rekabetten galip çıkan İmparatorluk-1'dir. İmparatorluk-1, IEEE-30 baralı güç sisteminde 24 numaralı barayı temsil etmektedir. SVC'nin optimal yerleşimi için ICA algoritması tarafından önerilen nokta 24.baradır. Diğer iterasyonlarda durdurma koşulu sağlanana kadar aynı şekilde devam eder.



6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Çeşitli FACTS cihazlarının yapısını ve güç şebekelerindeki etkilerini inceledikten sonra, bu tez çalışmasında FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktaları araştırılmıştır. Bu amaçla kısıtlayıcı amaç fonksiyonları ile FACTS cihazları için optimum boyut ve yerleşim elde edilmesi sağlanmıştır. IEEE-30 baralı test sistemi için sonuçları elde eden algoritma MATLAB programında oluşturulmuştur. Bu bölümde sonuçlar gösterilmiş ve tüm simülasyonlar ayrı ayrı incelenmiştir.

Simülasyon çalışmaları dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, IEEE-30 baralı test sistemi analiz edilmiştir. Bu analiz, sistemin güç akışı, hat akışı ve optimizasyon öncesinde ve FACTS cihazı kullanıldığı durumlardaki gerilim profili seviyesini içermektedir.

İkinci bölümde, IEEE-30 baralı güç sistemine bir adet SVC eklenildiğinde optimal konumun tespiti gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde, IEEE-30 baralı güç sistemine UPFC bağlı iken bara gerilim seviyeleri ve aktif güç kayıpları incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise ICA yöntemi ile elde edilen sonuçlar, GA ve PSO teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

6.1. FACTS BAĞLANMADAN ÖNCE IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ

Bu bölümde, FACTS cihazlarının kullanılmadığı durumda IEEE-30 baralı güç sisteminin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Temel durumda (FACTS bağlı değilken) güç sistemi analiz edilmiş ve yük akışı, hat akışı ve yakınsama özellikleri de dahil olmak üzere tüm sonuçlar tartışılmıştır.

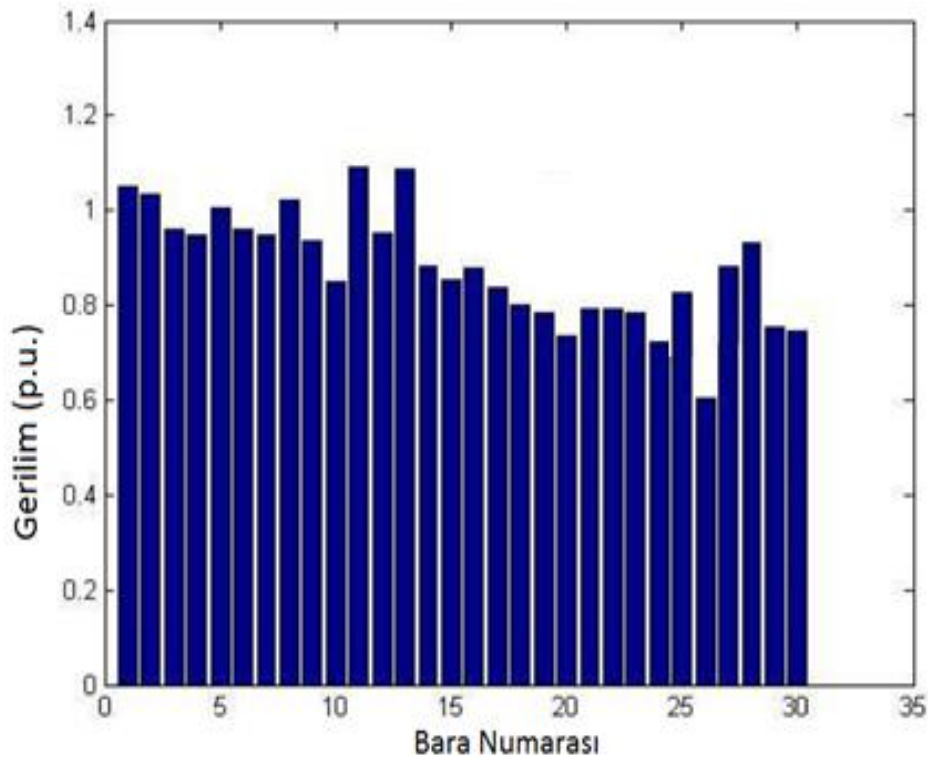
IEEE-30 baralı güç sistemi 30 bara, 41 hat ve 6 generatörden oluşmaktadır. Güç sisteminin, bara, generatör ve hat verileri sırasıyla Ek-1, Ek-2 ve Ek-3'te belirtilmiştir. Güç akışı analizi, sistemin kararlı çalışma limitlerini belirlemek için kullanılan matematiksel analizi içeren önemli bir yöntemdir. IEEE-30 baralı test sistemi için güç akışı analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. IEEE-30 baralı güç sisteminin hat akışı simülasyonu.

Hat No	FACTS Bağlı Değişken Hat Akışı						FACTS Bağlı Değişken Kayıplar	
	Baralar	P	Q	Baralar	P	Q	P Kayıp	Q Kayıp
1	2-1	3.4762	-0.4956	1-2	-3.1461	1.0715	0.3301	0.5759
2	3-1	1.7814	0.2764	1-3	-1.3147	0.1547	0.4667	0.4341
3	4-2	1.0512	0.2547	2-4	-0.9413	-0.0859	0.1099	0.1688
4	4-3	1.4571	-0.1579	3-4	-1.4184	0.2874	0.0387	0.1295
5	5-2	2.0781	0.0511	2-5	-1.8412	0.6612	0.2369	0.7123
6	6-2	1.3475	0.1294	2-6	-1.2456	0.1301	0.1019	0.2595
7	6-4	1.1417	-0.5364	4-6	-1.1234	0.6146	0.0183	0.0782
8	7-5	-0.2890	0.6413	5-7	0.3744	-0.4987	0.0854	0.1426
9	7-6	1.0741	-0.1599	6-7	-1.0301	0.2544	0.0440	0.0945
10	8-6	-0.0294	-1.4573	6-8	0.0074	1.5472	0.022	0.0899
11	9-6	0.4713	0.2469	6-9	-0.4713	-0.1697	0.0000	0.0772
12	10-6	0.3671	0.3216	6-10	-0.3671	-0.1672	0.0000	0.1544
13	11-9	-0.5543	-0.6791	9-11	0.5543	0.8314	0.0000	0.1523
14	10-9	1.0416	0.8146	9-10	-1.0416	-0.6214	0.0000	0.1938
15	12-4	1.0741	0.3795	4-12	-1.0741	-0.0941	0.0000	0.2854
16	13-12	-0.5379	-0.9173	12-13	0.5379	1.0583	0.0000	0.1410
17	14-12	0.2714	0.1304	12-14	-0.2679	-0.1046	0.0035	0.0258
18	15-12	0.6590	0.4214	12-15	-0.6177	-0.3304	0.0413	0.0910
19	16-12	0.2714	0.2107	12-16	-0.2503	-0.1976	0.0211	0.0131
20	15-14	0.0731	0.0514	14-15	-0.0714	-0.0515	0.0014	0.0001
21	17-16	0.1513	0.1467	16-17	-0.1369	-0.1318	0.0144	0.0149
22	18-15	0.2094	0.1170	15-18	-0.2123	-0.0914	0.0029	0.0256
23	19-18	0.1017	0.0674	18-19	-0.0972	-0.0584	0.0045	0.0090
24	20-19	-0.1947	-0.0453	19-20	0.1870	0.0541	0.0077	0.0088
25	20-10	0.2714	0.0913	10-20	-0.2674	-0.0724	0.0040	0.0189
26	17-10	0.1534	0.0519	10-17	-0.1434	-0.0501	0.010	0.0018
27	21-10	0.5416	0.3856	10-21	-0.5275	-0.3391	0.0141	0.0465
28	22-10	0.2714	0.1847	10-22	-0.2609	-0.1625	0.0105	0.0222
29	22-21	-0.0189	-0.0089	21-22	0.0189	0.0096	0.0000	0.0007
30	23-15	0.2178	0.1949	15-23	-0.2103	-0.1709	0.0075	0.0240
31	24-22	0.2436	0.1523	22-24	-0.2276	-0.1307	0.016	0.0216
32	24-23	0.1062	0.1198	23-24	-0.1009	-0.1103	0.0053	0.0095
33	25-24	0.0596	0.0378	24-25	-0.0594	-0.0299	0.0002	0.0079
34	26-25	0.1207	0.0901	25-26	-0.1093	-0.0804	0.0114	0.0097
35	27-25	-0.0642	-0.0617	25-27	0.0697	0.0678	0.0055	0.0061
36	27-28	0.5710	0.6799	28-27	0.5710	-0.3452	0.0000	0.3347
37	29-27	0.2348	0.1276	27-29	-0.2023	-0.0737	0.0325	0.0539
38	30-27	0.2694	0.1476	27-30	-0.2127	-0.0379	0.0567	0.1097
39	30-29	0.1273	0.0473	29-30	-0.1152	-0.0209	0.0121	0.0264
40	28-8	0.1531	0.4042	8-28	-0.1409	-0.3869	0.0122	0.0173
41	28-6	0.4318	0.3061	6-28	-0.4301	-0.2923	0.0017	0.0138
Toplam Kayıplar (p.u)							1.7504	3.929

Yük akışı analizinde generatör ve yük ile ilgili aktif ve reaktif güçlerin yanı sıra her bir baradaki gerilim büyüklüğü ve açılar da hesaplanmıştır. Hattaki kayıplar ise gönderici ve alıcı uçlardaki güç akışı arasındaki farka dayanarak hesaplanmıştır. Tablo 6.1’de aktif ve reaktif güç kayıpları gösterilmiştir.

Şekil 6.1’de optimizasyon öncesi güç akışı sonucu elde edilen bara gerilimleri gösterilmiştir. Şekil 6.1’de 7, 10, 14, 15, 18-27, 29 ve 30 numaralı baralardaki gerilimin düşük olduğu ve birim değerin (1 p.u.) altında olduğu görülmektedir. 3, 4, 6, 9, 12 ve 28 numaralı baralardaki gerilim değerleri ise kabul edilebilir seviyededir.



Şekil 6.1. Optimizasyon öncesi bara gerilim seviyesi.

Şekil 6.1’deki zayıf baralara FACTS cihazı bağlayarak gerilim seviyesi artırılabilir. FACTS cihazlarının yerleşim noktalarını belirlemek için kritik baraların belirlenmesi gerekir. Kritik baraları belirlemek için ilk olarak PSAT programı ile sürekli güç akışı yapılmıştır. Daha sonra tanjant vektör analizi yöntemi ile sistemin en zayıf baraları tespit edilmiştir. Güç sisteminin yük baralarının tanjant vektör değerleri Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

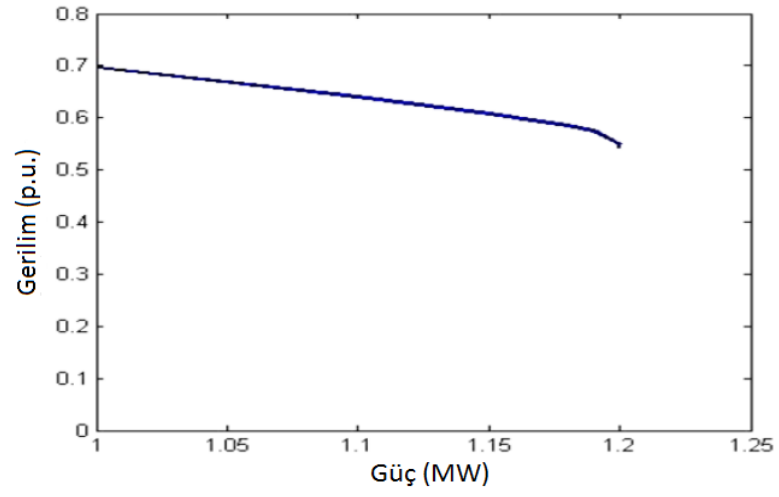
Tablo 6.2. IEEE-30 baralı güç sisteminin tanjant vektör değerleri.

Bara No	Tanjant Vektör Değeri
3	0.1644
4	0.1874
6	0.1943
7	0.1649
9	0.1125
10	0.1024
12	0.1912
14	0.1589
15	0.1943
16	0.2169
17	0.1248
18	0.1289
19	0.1479
20	0.2645
21	0.1978
22	0.2074
23	0.1895
24	0.2896
25	0.1023
26	0.2936
27	0.1425
28	0.1695
29	0.1852
30	0.2781

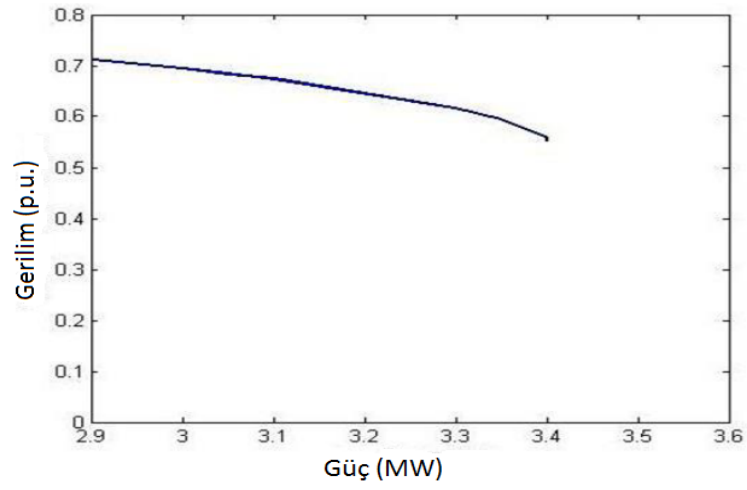
PSAT programında güç akışı yapılarak her bir baraya ait gerilim değeri hesaplanmıştır. Tanjant vektör değeri sürekli güç akışı sonucunda elde edilen gerilim değerindeki değişimlerin yüklenme değerine (λ_{max}) bölünmesi ile bulunmuştur. Tanjant vektör analizine göre tanjant vektör değeri en büyük olan baralar sistemin en zayıf baralarıdır. Bu sistemde en zayıf baralar 20, 24, 26 ve 30 numaralı baralardır.

6.1.1. P-V Eğrileri

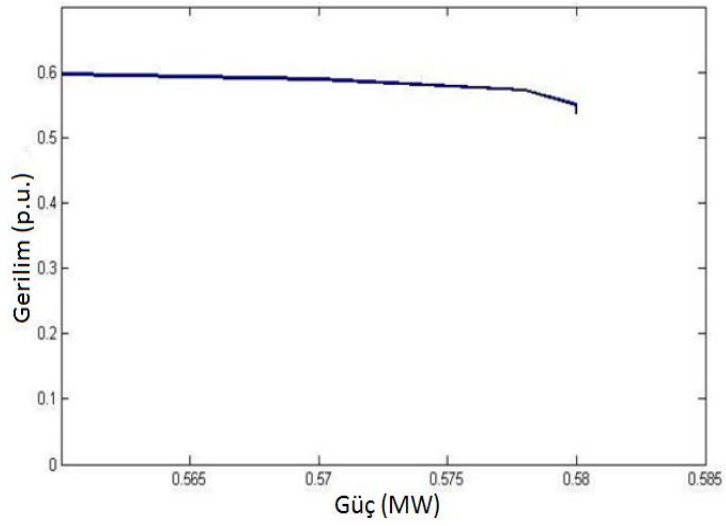
Güç akışı sonucu elde edilen Şekil 6.1'deki grafikte IEEE-30 baralı güç sisteminin gerilim karakteristiği bakımından en zayıf baralarının 20, 24, 26 ve 30 numaralı baralar olduğu belirlenmiştir. Bu baraların P-V eğrileri sırasıyla Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



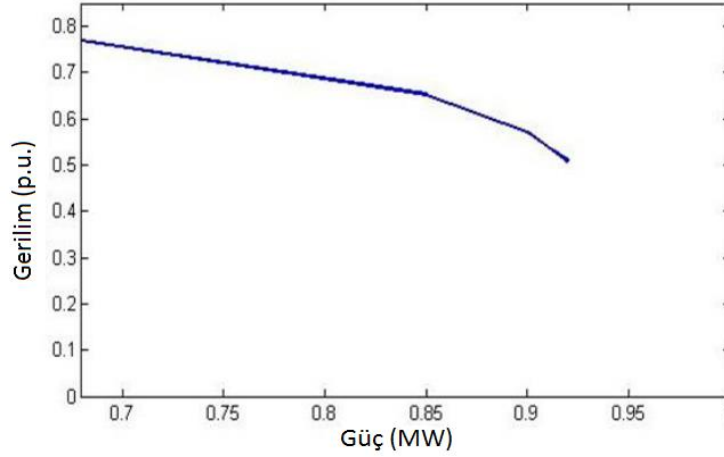
Şekil 6.2. Bara 20'nin P-V eğrisi.



Şekil 6.3. Bara 24'ün P-V eğrisi.



Şekil 6.4. Bara 26'nın P-V eğrisi.



Şekil 6.5. Bara 30'un P-V eğrisi.

Gerilim kararlılığı, güç sistemlerinde en önemli parametrelerden biridir. Gerilim kararlılığı, sistemdeki bozucu etkiden sonra sistemin tüm baralarında voltajı sabit bir seviyede tutabilme yeteneği olarak tanımlanır. Gerilim çökmesi, yük arttıkça sistemin bazı bölgelerinde voltajı kontrol edememenin sonucudur. Gerilim istikrarsızlığı bölgesel bir olaydır fakat zamanla sistem çöküşüne neden olabilir. Gerilim kararsızlığının temel sebebi sistemde yeterli reaktif gücün olmamasıdır. FACTS denetleyicileri ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak sistem kararlı hale getirilir. Bölüm 6.2 ve 6.3'te IEEE-30 baralı güç sisteminin kritik baralarına ilave edilen SVC ve UPFC denetleyicilerinin etkileri incelenmiştir.

6.2. SVC BAĞLI IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ

Bu bölümde, IEEE-30 baralı güç sisteminde SVC'nin optimal yerleşimi yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Güç sisteminde SVC'nin optimal yerleşimi ICA tekniği ile analiz edilmiş ve sonuçlar GA ve PSO teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde çeşitli algoritmalar ile SVC denetleyicisinin IEEE-30 baralı güç sisteminde optimal yerleşim noktaları belirlenmiş ve bu noktalara SVC ilave edilmesi ile elde edilen bara gerilim seviyeleri ve kayıpları içeren simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Çalışmanın amacı, iletim hatlarında FACTS cihazlarının optimal konumlandırılmasıdır. Bu amaca ulaşabilmek için PSO, GA ve ICA teknikleri kullanılmıştır.

ICA yöntemini kullanarak SVC'nin optimal yerleşim noktalarını belirlemek için iki temel amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Tablo 6.3'te IEEE-30 baralı güç sistemi için ICA, GA ve

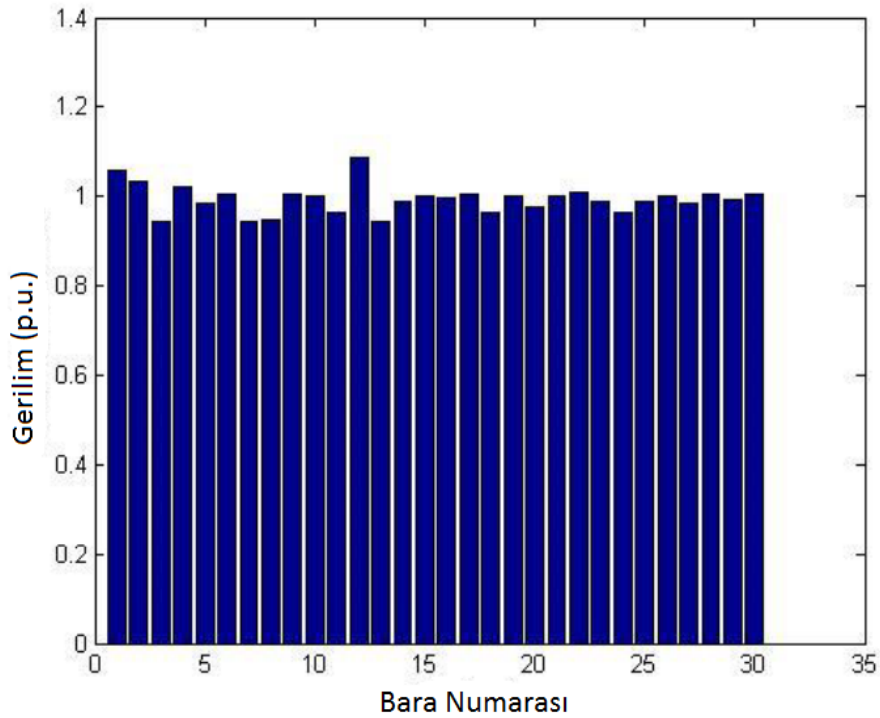
PSO algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen SVC'nin boyut ve konum analizi gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan algoritmaların yakınsama süreleri ve çözüme ulaştığı iterasyon sayıları da gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Optimizasyon sonrası SVC boyut ve konum verileri.

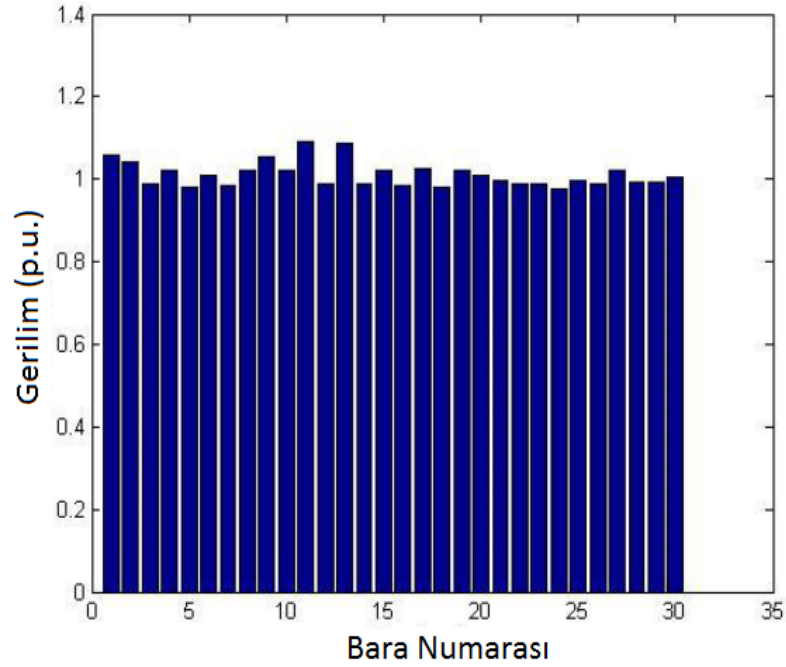
Yöntem	Konum 1	Boyut 1 (MVar)	Konum 2	Boyut 2 (MVar)	Yakınsama Süresi (s)	İterasyon Sayısı
ICA	24	60	20	45	416	73
GA	26	40	30	52	538	92
PSO	26	40	30	52	559	84

Tablo 6.3'te PSO ve GA yöntemi kullanıldığında SVC cihazı için optimal konumun 26 ve 30 numaralı baralar olduğu, ICA yöntemi kullanıldığında ise 24 ve 20 numaralı baralar olduğu belirlenmiştir. ICA tekniği kullanıldığında PSO ve GA yöntemlerinden daha hızlı bir çözüm elde edilmiştir. SVC'nin GA ve PSO yöntemlerinde 26 ve 30 numaralı baralarda tahsis edilmesinden sonra, gerilim profili seviyesi birim değere ulaşmıştır.

Şekil 6.6'da GA ve PSO yöntemleri ile Şekil 6.7'de ise ICA yöntemi ile SVC'nin optimal konumlandırılması sonucu elde edilen gerilim değerleri gösterilmiştir. SVC'nin optimal konumlandırılması ile gerilim profilinin kademeli olarak düzeldiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. GA ve PSO yöntemleri ile SVC'nin optimal konumlandırılması sonucu elde edilen bara gerilim değerleri.



Şekil 6.7. ICA yöntemi ile SVC'nin optimal konumlandırılması sonucu elde edilen bara gerilim değerleri.

ICA yöntemini kullanarak sistemi optimize etmenin birçok avantajı vardır. Bu avantajlardan en önemlileri güç aktarım kapasitesini artırmak ve kayıpları azaltmaktır. SVC'nin optimal yerleşim noktalarını belirledikten sonra bu noktalara SVC ilave ederek IEEE-30 baralı güç sistemi için güç akışı ve hat akışı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca simülasyonlarda güç şebekesinin toplam kayıpları da gösterilmiştir. Tablo 6.4, Tablo 6.5, Tablo 6.6, Tablo 6.7, Tablo 6.8, Tablo 6.9, Tablo 6.10 ve Tablo 6.11'de güç sistemine SVC ilave edildikten sonra gerçekleştirilen güç akışı ve hat akışı simülasyonlarının sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Bara 30'a SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.

Bara No	V	Açı	P generatör	Q generatör	P yük	Q yük
1	1.06	0	7.9124	0.3203	0	0
2	1.028	-17.284	2.3412	3.6930	0.8773	0.4998
3	0.926	-24.928	0	0	0.0953	0.0479
4	1.03	-31.714	0	0	0.3103	0.0659
5	0.979	-49.716	0.9874	3.1624	3.7924	0.7769
6	1.005	-37.349	0	0	0	0
7	0.954	-45.174	0	0	0.9234	0.4417
8	0.954	-39.473	1.3974	4.5372	1.2743	1.2074
9	1.002	-46.873	0	0	0	0

Tablo 6.4. (devam). Bara 30’a SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.

10	1.00	-61.347	0	0	0.2337	0.0873
11	0.957	-37.413	0.74	1.4574	0	0
12	1.059	-58.614	0	0	0.4517	0.3174
13	0.954	-52.619	0.6874	1.9692	0	0
14	0.979	-65.418	0	0	0.2531	0.0673
15	1.003	-65.749	0	0	0.3312	0.1017
16	0.989	-62.149	0	0	0.1513	0.0871
17	1.004	-64.371	0	0	0.3627	0.2413
18	0.959	-72.543	0	0	0.1374	0.0451
19	1.001	-73.946	0	0	0.3874	0.1384
20	0.968	-71.102	0	0	0.0897	0.0314
21	1.004	-67.44	0	0	0.7415	0.4524
22	1.007	-67.3420	0	0	0	0
23	0.979	-70.7234	0	0	0.1294	0.0658
24	0.986	-73.6431	0	0	0.3512	0.2713
25	0.979	-75.9324	0	0	0	0
26	1.004	-81.1230	0	0	0.1573	0.0938
27	0.987	-74.7183	0	0	0	0
28	1.002	-40.824	0	0	0	0
29	0.994	-90.31	0	0	0.0974	0.0378
30	1.00	-101.328	0	0	0.4263	-1.0184

Tablo 6.4’te SVC’nin Bara 30’a dahil edilmesinden sonraki güç akışı sonuçları gösterilmiştir. Bara 30’un gerilim değerinin 1 p.u değerine ulaştığı görölmektedir. Diğer baralardaki voltaj seviyesi de geliştirilmiştir. SVC’nin Bara 30’a ilave edilmesinden sonra güç akışı gerçekteşirilmiş ve elde edilen aktif ve reaktif güç kayıpları Tablo 6.5’te gösterilmiştir.

Tablo 6.5. Bara 30’a SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.

Hat No	Hat akışı						Kayıplar	
	Baralar	P	Q	Baralar	P	Q	P kayıp	Q kayıp
1	2-1	5.4172	-0.5173	1-2	-4.9731	2.0134	0.4441	1.4961
2	3-1	2.4294	0.8413	1-3	-2.1623	0.2713	0.2671	1.1126
3	4-2	1.4924	0.5763	2-4	-1.3703	-0.1794	0.1221	0.3969
4	4-3	2.0743	-0.2639	3-4	-1.9827	0.4598	0.0916	0.1959
5	5-2	2.9173	0.2683	2-5	-2.5634	1.2813	0.3539	1.5496
6	6-2	1.9793	0.3749	2-6	-1.7346	0.2673	0.2447	0.6422
7	6-4	1.6498	-1.0314	4-6	-1.573	1.2487	0.0768	0.2173
8	7-5	-0.2745	0.9803	5-7	0.3247	-0.8694	0.0502	0.1109
9	7-6	1.2875	-0.2829	6-7	-1.2307	0.4394	0.0568	0.1565

Tablo 6.5. (devam). Bara 30’a SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.

10	8-6	0.1746	-2.4503	6-8	-0.0764	2.7503	0.0982	0.3
11	9-6	0.6203	0.5417	6-9	-0.6203	-0.3849	0	0.1568
12	10-6	0.4813	0.5793	6-10	-0.4813	-0.2274	0	0.3519
13	11-9	-0.7243	-0.9964	9-11	0.7243	1.4614	0	0.465
14	10-9	1.3406	1.3673	9-10	-1.3406	0.7894	0	0.5779
15	12-4	1.3899	0.7116	4-12	-1.3899	-0.0089	0	0.7027
16	13-12	-0.6775	-1.4573	12-13	0.6775	1.9712	0	0.5139
17	14-12	0.3846	0.2175	12-14	-0.3601	-0.1345	0.0245	0.083
18	15-12	0.8886	0.6274	12-15	-0.7811	0.4174	0.1075	0.21
19	16-12	0.3529	0.3380	12-16	-0.3247	-0.2600	0.0282	0.078
20	15-14	0.1037	0.0701	14-15	-0.0976	-0.0655	0.0061	0.0046
21	17-16	0.1823	0.1978	16-17	-0.1691	-0.1811	0.0132	0.0167
22	18-15	0.2896	0.1847	15-18	-0.2683	-0.1294	0.0213	0.0553
23	19-18	0.1392	0.0801	18-19	-0.1341	-0.0821	0.0051	0.002
24	20-19	-0.2512	-0.0578	19-20	0.2671	0.0812	0.0159	0.0234
25	20-10	0.3872	0.1871	10-20	-0.3473	-0.0913	0.0399	0.0958
26	17-10	0.1959	0.0727	10-17	-0.1949	-0.0724	0.0013	0.0030
27	21-10	0.653	0.4724	10-21	-0.6246	-0.3523	0.0284	0.1201
28	22-10	0.3216	0.2084	10-22	-0.3074	-0.1594	0.0142	0.049
29	22-21	-0.0830	-0.0949	21-22	0.0880	0.1060	0.005	0.0111
30	23-15	0.2448	0.1894	15-23	-0.2257	-0.1472	0.0191	0.0422
31	24-22	0.2260	0.0534	22-24	-0.2043	-0.0257	0.0217	0.0277
32	24-23	0.098	0.0758	23-24	-0.0992	-0.069	0.0012	0.0125
33	25-24	-0.057	-0.1728	24-25	0.0765	0.2194	0.0195	0.0466
34	26-25	0.1627	0.1312	25-26	-0.1460	-0.0942	0.0167	0.037
35	27-25	-0.2472	-0.374	25-27	0.2897	0.4323	0.0425	0.0583
36	28-27	1.0561	0.5778	27-28	-1.0561	0.0944	0	0.6471
37	29-27	0.3367	-0.1928	27-29	-0.2862	0.2954	0.0514	0.0972
38	30-27	0.4216	-0.3249	27-30	-0.2843	0.5964	0.1418	0.267
39	30-29	0.1889	-0.3135	29-30	-0.1414	0.4231	0.0484	0.0915
40	28-8	0.2705	0.5724	8-28	-0.2493	-0.5167	0.0257	0.061
41	28-6	0.8116	0.1056	6-28	-0.8024	-0.063	0.0138	0.0436
Toplam Kayıplar (p.u)							2.5179	11.1569

Tablo 6.6. Bara 26’ya SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.

Bara No	V	Açı	P gen	Q gen	P yük	Q yük
1	1.06	0	7.9062	0.3261	0	0
2	1.029	-17.28	2.3280	3.7415	0.8794	0.5112
3	0.889	-25.679	0	0	0.0986	0.0448
4	0.897	-31.68	0	0	0.3146	0.0546
5	1.006	-50.135	0.9930	3.0492	3.7819	0.7166
6	0.928	-37.346	0	0	0	0
7	0.914	-45.343	0	0	0.9931	0.4481

Tablo 6.6. (devam). Bara 26'ya SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.

8	1.025	-39.286	1.4211	4.5337	1.2690	1.2186
9	0.834	-47.230	0	0	0	0
10	0.659	-62.407	0	0	0.2393	0.0824
11	1.087	-27.394	0.7292	1.4736	0	0
12	0.843	-58.739	0	0	0.4615	0.3142
13	1.079	-52.84	0.6881	1.9843	0	0
14	0.989	-65.616	0	0	0.28	0.0564
15	0.956	-66.524	0	0	0.3360	0.180
16	0.973	-62.358	0	0	0.1419	0.0627
17	0.862	-64.683	0	0	0.3769	0.2933
18	0.851	-73.609	0	0	0.192	0.0633
19	0.985	-75.73	0	0	0.379	0.1317
20	0.971	-72.287	0	0	0.0787	0.0228
21	0.938	-67.586	0	0	0.7065	0.4651
22	0.897	-67.27	0	0	0	0
23	0.852	-70.985	0	0	0.192	0.0671
24	0.869	-73.719	0	0	0.3854	0.2719
25	0.877	-75.123	0	0	0	0
26	1.00	-80.245	0	0	0.1473	0.0792
27	0.821	-74.194	0	0	0	0
28	0.887	-40.378	0	0	0	0
29	0.994	-93.272	0	0	0.0986	-1.0891
30	0.982	-94.72	0	0	0.4724	0.0676

Tablo 6.6 SVC'nin 26 numaralı barada konumlandırılması sonucu gerçekleştirilen güç akışı sonuçlarını göstermektedir. Bara 26'nın voltaj değeri geliştirilmiş ve 1 p.u değerine ulaşmıştır. SVC'nin 26 ve 30 numaralı baralardaki etkilerini özetlemek gerekirse; güç sistemindeki kayıpların azaltılması bakımından 26 numaralı baraya SVC'nin eklenmesi daha avantajlıdır. Fakat voltaj iyileştirmesi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında 30 numaralı baranın daha iyi olduğu görölmektedir. Bara 26'ya SVC yerleştirdikten sonra güç sistemindeki aktif ve reaktif güç kayıpları Tablo 6.7'de gösterilmiştir.

Tablo 6.7. Bara 26'ya SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.

Hat No	Hat Akışı						Kayıplar	
	Baralar	P	Q	Baralar	P	Q	P kayıp	Q kayıp
1	2-1	5.4378	-0.5142	1-2	-4.9757	2.029	0.4621	1.5148
2	3-1	2.4183	0.834	1-3	-2.1361	0.2731	0.2822	1.1071
3	4-2	1.5011	0.5167	2-4	-1.3562	-0.168	0.1449	0.3487
4	4-3	2.0461	-0.2126	3-4	-1.9872	0.4167	0.0589	0.2041
5	5-2	2.9162	0.2517	2-5	-2.5804	1.2488	0.3358	1.5005

Tablo 6.7. (devam). Bara 26'ya SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.

6	6-2	1.9608	0.3597	2-6	-1.7858	0.2216	0.175	0.1351
7	6-4	1.6547	-1.0586	4-6	-1.5985	1.2767	0.0562	0.2181
8	7-5	-0.2765	0.9284	5-7	0.3511	-0.8679	0.0746	0.0605
9	7-6	1.2607	-0.2382	6-7	-1.2334	0.4104	0.0275	0.1719
10	8-6	0.1658	-2.4565	6-8	0.0731	2.7653	0.0927	0.3088
11	9-6	0.6312	0.5624	6-9	-0.6312	-0.3328	0	0.2296
12	10-6	0.4713	0.5983	6-10	-0.4713	-0.2513	0	0.347
13	11-9	0.7922	1.0712	9-11	-0.7922	1.4537	0	0.3825
14	10-9	1.3513	1.3538	9-10	-1.3513	-0.7824	0	0.5714
15	12-4	1.4210	0.7928	4-12	-1.4210	-0.0503	0	0.7425
16	13-12	-0.6183	-1.4867	12-13	-0.6183	1.9437	0	0.457
17	14-12	0.3583	0.2414	12-14	-0.3518	-0.1374	0.0065	0.104
18	15-12	0.8329	0.6537	12-15	-0.785	-0.4301	0.0479	0.2236
19	16-12	0.3654	0.3713	12-16	-0.3174	-0.2659	0.048	0.1054
20	15-14	0.1197	0.0867	14-15	-0.0972	-0.0651	0.0225	0.0216
21	17-16	0.1674	0.1697	16-17	-0.1864	-0.1547	0.019	0.015
22	18-15	0.2894	0.1847	15-18	-0.2613	-0.1273	0.0281	0.0574
23	19-18	0.1524	0.0947	18-19	-0.1438	-0.0836	0.0086	0.0111
24	20-19	-0.2384	-0.0653	19-20	0.2654	0.078	0.027	0.0127
25	20-10	0.3384	0.1758	10-20	-0.3746	-0.1341	0.0362	0.0417
26	17-10	0.1979	0.0678	10-17	-0.1957	-0.0657	0.0022	0.0021
27	21-10	0.6737	0.4913	10-21	-0.6917	-0.3417	0.018	0.1496
28	22-10	0.3723	0.2154	10-22	-0.2965	-0.1524	0.0758	0.063
29	22-21	-0.0785	-0.1310	21-22	0.0683	0.1074	0.0102	0.0236
30	23-15	0.2154	0.1438	15-23	-0.2342	-0.1465	0.0188	0.0027
31	24-22	0.2119	0.0524	22-24	-0.1696	-0.0273	0.0423	0.0251
32	24-23	0.0957	0.0754	23-24	-0.0984	-0.0619	0.0338	0.0135
33	25-24	-0.1711	-0.1678	24-25	0.0817	0.2102	0.0894	0.0424
34	26-25	0.1689	0.1235	25-26	-0.1417	-0.0983	0.0272	0.0252
35	27-25	-0.2584	-0.3256	25-27	0.3004	0.4345	0.042	0.1089
36	28-27	1.0314	0.5987	27-28	-1.0314	0.089	0	0.5097
37	29-27	0.4114	-0.4654	27-29	-0.3785	0.6874	0.0329	0.222
38	30-27	0.3274	-0.0834	27-30	-0.2894	0.1872	0.038	0.1038
39	30-29	0.1929	0.3629	29-30	-0.1621	-0.2714	0.0308	0.0915
40	28-8	0.2805	0.5811	8-28	-0.2513	-0.5213	0.0292	0.0598
41	28-6	0.8093	0.0892	6-28	-0.7644	-0.046	0.0449	0.0432
Toplam Kayıplar (p.u)							2.4895	10.3782

Tablo 6.8 SVC'nin 24 numaralı baraya dahil edilmesinden sonraki güç akışı sonuçlarını göstermektedir. Güç akışı sonucunda 24 nolu baranın geriliminin 1 p.u değerine ulaştığı ve diğer baralarda da gerilim iyileştirmesi sağlandığı gözlemlenmiştir.

Tablo 6.8. Bara 24'e SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.

Bara No	V	Açı	P gen	Q gen	P yük	Q yük
1	1.06	0	7.9165	0.3173	0	0
2	1.028	-52.316	2.4183	3.6714	0.8964	0.5230
3	0.997	-60.679	0	0	0.0973	0.0571
4	0.982	-66.783	0	0	0.4126	0.0713
5	1.005	-85.187	0.9913	3.0917	3.5374	0.6714
6	1.003	-72.496	0	0	0	0
7	0.912	-80.573	0	0	0.9316	0.4274
8	1.026	-74.591	1.4176	4.9814	1.2271	1.3117
9	1.006	-81.986	0	0	0	0
10	0.959	-97.176	0	0	0.1357	0.0913
11	1.087	-72.351	0.7925	1.4388	0	0
12	0.979	-93.172	0	0	0.4587	0.3117
13	1.091	-87.284	0.6873	1.8394	0	0
14	0.978	-100.915	0	0	0.2496	0.0684
15	1.007	-101.375	0	0	0.3608	0.1217
16	0.983	-97.819	0	0	0.1881	0.0862
17	1.004	-98.743	0	0	0.3928	0.2874
18	1.006	-108.071	0	0	0.195	0.0374
19	0.976	-111.03	0	0	0.397	0.1392
20	0.982	-107.42	0	0	0.878	0.0287
21	0.991	-101.419	0	0	0.7169	0.4718
22	1.005	-102.459	0	0	0	0
23	0.982	-105.714	0	0	0.1584	0.0753
24	1.001	-107.621	0	0	0.3824	0.2575
25	0.984	-110.293	0	0	0	0
26	0.971	-114.987	0	0	0.1598	0.0971
27	1.009	-109.694	0	0	0	0
28	0.989	-75.516	0	0	0	0
29	1.004	-128.941	0	0	0.0987	-1.0347
30	1.003	-129.416	0	0	0.3457	0.0913

Bara 24'e SVC ilave edildikten sonra sistemdeki aktif ve reaktif güç kayıpları Tablo 6.9'da gösterilmiştir. Tablo 6.9'da 1, 2, 3, 5 ve 6 numaralı iletim hatlarındaki kayıpların daha yüksek olduğu görülmektedir. SVC'nin 24.baraya eklenmesi ile toplam aktif güç kayıpları azaltılmıştır.

Tablo 6.9. Bara 24’e SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.

Hat No	Hat Akışı						Kayıplar	
	Baralar	P	Q	Baralar	P	Q	P	Q
1	2-1	5.4384	-0.5215	1-2	-4.9713	2.1327	0.4671	1.6112
2	3-1	2.4339	0.8429	1-3	-2.346	0.3228	0.1879	1.1657
3	4-2	1.5191	0.5832	2-4	-1.3614	-0.0751	0.1577	0.5081
4	4-3	2.0715	-0.2592	3-4	-1.9879	0.5572	0.0836	0.298
5	5-2	2.8132	0.2674	2-5	-2.6945	-0.3876	0.1187	0.1202
6	6-2	1.9813	0.3813	2-6	-1.8746	0.3577	0.1067	0.739
7	6-4	1.6492	-1.0663	4-6	-1.6094	1.0816	0.0398	0.0153
8	7-5	-0.2498	0.9288	5-7	0.3214	-0.7561	0.0716	0.1727
9	7-6	1.3003	-0.2671	6-7	-1.2734	0.5452	0.0269	0.2781
10	8-6	0.1619	-2.4384	6-8	0.0679	2.8592	0.094	0.4208
11	9-6	0.6214	0.5473	6-9	-0.6137	-0.2687	0.0077	0.2786
12	10-6	0.4783	0.5814	6-10	-0.4719	-0.2173	0.0064	0.3641
13	11-9	0.7334	1.0864	9-11	0.7203	1.3814	0.0131	0.295
14	10-9	1.3465	1.3551	9-10	-1.3374	-0.8848	0.0091	0.4703
15	12-4	1.4171	0.7315	4-12	-1.4093	0.7143	0.0078	0.0172
16	13-12	-0.6694	-1.4266	12-13	0.6719	1.7813	0.0025	0.3547
17	14-12	0.3895	0.2076	12-14	-0.3453	-0.0198	0.0442	0.1878
18	15-12	0.9082	0.6294	12-15	-0.9718	-0.2854	0.0636	0.344
19	16-12	0.3462	0.3512	12-16	-0.342	-0.1756	0.0042	0.1756
20	15-14	0.1219	0.0693	14-15	-0.0928	0.0541	0.0291	0.0152
21	17-16	0.1903	0.2085	16-17	-0.1726	-0.0547	0.0177	0.1538
22	18-15	0.3103	0.1923	15-18	-0.2719	-0.0173	0.0384	0.175
23	19-18	0.1543	0.0993	18-19	-0.1383	0.0347	0.016	0.0646
24	20-19	-0.2371	-0.0514	19-20	0.2582	0.1873	0.0211	0.1359
25	20-10	0.3976	0.1973	10-20	-0.3571	0.0134	0.0405	0.1839
26	17-10	0.2174	0.0763	10-17	-0.198	0.0521	0.0194	0.0242
27	21-10	0.6793	0.4735	10-21	-0.6349	-0.4412	0.0444	0.0323
28	22-10	0.3367	0.2172	10-22	-0.3124	-0.0428	0.0243	0.1744
29	22-21	-0.0749	-0.0958	21-22	0.0873	0.2314	0.0124	0.1356
30	23-15	0.2581	0.1943	15-23	-0.2283	-0.0281	0.0298	0.1662
31	24-22	0.2216	0.0573	22-24	-0.1984	0.0861	0.0232	0.0282
32	24-23	0.1143	0.0813	23-24	-0.0897	0.0473	0.0246	0.034
33	25-24	-0.1573	-0.1743	24-25	0.0853	0.3373	0.072	0.163
34	26-25	0.1746	0.1375	25-26	-0.1482	0.0247	0.0264	0.1128
35	27-25	-0.2549	-0.3471	25-27	0.3064	0.552	0.0515	0.2049
36	28-27	1.0536	0.1673	27-28	-1.0513	-0.2086	0.0023	0.0413
37	29-27	0.4234	-0.6512	27-29	-0.2914	0.8072	0.132	0.156
38	30-27	0.3341	-0.0764	27-30	-0.2811	0.3074	0.053	0.231
39	30-29	0.2074	0.3425	29-30	-0.1538	-0.1831	0.0536	0.1594
40	28-8	0.2843	0.5830	8-28	-0.2530	-0.3987	0.0313	0.1843
41	28-6	0.8149	0.0946	6-28	-0.7829	0.0674	0.032	0.029
Toplam Kayıplar (p.u)							2.3778	10.1538

Tablo 6.10 SVC'yi Bara 20'ye ekledikten sonraki güç akışı sonuçlarını göstermektedir. SVC'yi Bara 20'ye ekledikten sonra Bara 20'nin gerilim seviyesinde bir iyileşme meydana gelmiş ve 1 p.u değerine ulaşmıştır. SVC'nin 20 numaralı barada konumlandırılması ile kayıpların önceki durumlara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.10. Bara 20'ye SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin güç akışı simülasyonu.

Bara No	V	Açı	P gen	Q gen	P yük	Q yük
1	1.06	0	7.7072	0.3451	0	0
2	1.03	-40.617	2.2240	3.6547	0.7472	0.5682
3	0.979	-48.624	0	0	0.0985	0.0547
4	1.03	-54.713	0	0	0.3046	0.0542
5	0.967	-73.012	0.8295	3.0875	3.2612	0.9618
6	1.024	-60.317	0	0	0	0
7	0.979	-68.247	0	0	0.9423	0.4865
8	1.022	-63.16	1.5121	4.2346	1.1945	1.1699
9	1.042	-69.71	0	0	0	0
10	1.019	-86.147	0	0	0.3329	0.0842
11	1.089	-60.284	0.7458	1.4753	0	0
12	0.98	-81.679	0	0	0.4566	0.3058
13	1.076	-75.69	0.6582	1.9749	0	0
14	0.978	-88.612	0	0	0.19	0.0698
15	1.01	-89.254	0	0	0.3275	0.1045
16	0.984	-85.237	0	0	0.1852	0.0672
17	1.017	-87.516	0	0	0.2569	0.3292
18	0.949	-96.012	0	0	0.1213	0.0469
19	1.017	-98.164	0	0	0.3824	0.1527
20	1.01	-95.482	0	0	0.1172	0.0278
21	0.997	-90.737	0	0	0.8124	0.3255
22	0.979	-90.268	0	0	0	0
23	0.992	-93.617	0	0	0.1365	0.0754
24	0.974	-96.556	0	0	0.4360	0.2089
25	0.994	-98.17	0	0	0	0
26	0.968	-103.563	0	0	0.1141	0.0972
27	1.02	-97.153	0	0	0	0
28	0.989	-62.186	0	0	0	0
29	0.995	-113.62	0	0	0.0982	-1.0207
30	1.002	-117.187	0	0	0.5726	0.0946

Tablo 6.11, Bara 20'ye SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı güç sisteminin hat akışı simülasyonu sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 6.11. Bara 20'ye SVC yerleştirdikten sonra IEEE-30 baralı sistemin hat akışı simülasyonu.

Hat No	Hat Akışı						Kayıplar	
	Baralar	P	Q	Baralar	P	Q	P kayıp	Q kayıp
1	2-1	4.8225	-0.7036	1-2	-4.9513	1.0089	0.1288	0.3053
2	3-1	2.0132	0.1255	1-3	-2.0455	0.1655	0.0323	0.291
3	4-2	1.5394	0.3915	2-4	-1.4556	0.0273	0.0838	0.3642
4	4-3	2.0918	-0.2413	3-4	-1.9982	0.6477	0.0936	0.4064
5	5-2	2.6155	0.2688	2-5	-2.543	0.4895	0.0725	0.7583
6	6-2	1.8524	0.3931	2-6	-1.725	0.4479	0.1274	0.0548
7	6-4	1.618	-1.5284	4-6	-1.5184	1.4784	0.0996	0.05
8	7-5	-0.2533	0.7199	5-7	-0.1129	-0.6596	0.1404	0.0603
9	7-6	1.3328	-0.2527	6-7	-1.2484	0.6524	0.0844	0.3997
10	8-6	0.1912	-2.3541	6-8	-0.1452	2.0637	0.046	0.2904
11	9-6	0.6465	0.5473	6-9	-0.6035	-0.1668	0.043	0.3805
12	10-6	0.5124	0.0549	6-10	-0.4714	-0.0151	0.041	0.0398
13	11-9	0.7456	1.0954	9-11	-0.7254	0.7528	0.0202	0.3426
14	10-9	1.3654	1.0314	9-10	-1.3382	-0.9619	0.0272	0.0695
15	12-4	1.4108	0.2546	4-12	-1.3843	0.2023	0.0265	0.0523
16	13-12	-0.6438	-1.4357	12-13	0.6564	1.2173	0.0126	0.2184
17	14-12	0.4172	0.1164	12-14	-0.3541	0.0798	0.0631	0.0366
18	15-12	0.7874	0.2347	12-15	-0.7714	-0.1964	0.016	0.0383
19	16-12	0.3783	0.3564	12-16	-0.3093	-0.0693	0.069	0.2871
20	15-14	0.1345	0.0827	14-15	-0.0896	0.1349	0.0449	0.2176
21	17-16	0.2136	0.2073	16-17	-0.1714	0.0417	0.0422	0.2564
22	18-15	0.3274	0.2145	15-18	-0.2713	0.0852	0.0561	0.2997
23	19-18	0.1783	0.1213	18-19	-0.127	0.1312	0.0513	0.2525
24	20-19	-0.2314	-0.0512	19-20	0.1614	0.2843	0.07	0.2331
25	20-10	0.4137	0.2062	10-20	-0.3397	0.1143	0.074	0.3205
26	17-10	0.217	0.082	10-17	-0.1823	0.1497	0.0347	0.2317
27	21-10	0.7013	0.471	10-21	-0.6113	-0.1367	0.09	0.2803
28	22-10	0.3527	0.2216	10-22	-0.2952	0.0598	0.0575	0.2814
29	22-21	-0.0524	-0.0826	21-22	0.0913	0.3136	0.0389	0.2337
30	23-15	0.2768	0.1949	15-23	-0.2157	0.0741	0.0611	0.269
31	24-22	0.2456	0.0637	22-24	-0.1889	0.186	0.0567	0.2497
32	24-23	0.1273	0.0992	23-24	-0.0862	0.1497	0.0411	0.2489
33	25-24	-0.1321	-0.1652	24-25	0.0957	0.2353	0.0364	0.0701
34	26-25	0.2021	0.1467	25-26	-0.1324	0.1211	0.0697	0.2686
35	27-25	-0.2322	-0.3357	25-27	0.2532	0.4527	0.021	0.117
36	28-27	1.0676	0.3253	27-28	-1.0324	-0.3076	0.0352	0.0178
37	29-27	0.4432	-0.4359	27-29	-0.3812	0.9073	0.062	0.4714
38	30-27	0.32	-0.0687	27-30	-0.2654	0.1969	0.0546	0.1282
39	30-29	0.1542	0.3414	29-30	-0.1481	-0.0481	0.0061	0.2933
40	28-8	0.3046	0.8845	8-28	-0.2407	-0.7040	0.0639	0.1805
41	28-6	0.9552	0.1053	6-28	-0.9864	0.1697	0.0312	0.275
Toplam Kayıplar (p.u)							2.326	10.0039

Bu bölümde, IEEE-30 baralı güç sisteminde SVC'nin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda kayıplar ve bara gerilim seviyeleri analiz edilmiştir. SVC'yi şebekeye dahil etmeden önce IEEE-30 baralı güç sisteminin baralarında gerilim seviyesi oldukça düşüktü ve bazı baralarda gerilim çökmesi riski yaşanıyordu. Kritik noktalara SVC ilave edilmesiyle gerilim seviyesinde önemli derecede artış gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Kullanılan algoritmalar SVC'nin 20, 24, 26 ve 30 numaralı baralarda konumlandırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Voltaj seviyesindeki iyileştirmeler her bir lokasyon için gösterilmiştir. 4 farklı lokasyon için SVC'nin sistem kayıplarına etkisi tartışılmıştır. SVC'nin 20 numaralı barada konumlandırılması ile sistem kayıplarının azaltılması bakımından en iyi sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir.

Bu analizde, farklı optimizasyon teknikleri kullanarak SVC'nin gerilim kararlılığına ve sistem kayıplarının azaltılmasına olan etkisi gösterilmiştir. Kullanılan evrimsel algoritmaların tamamında (GA, PSO, ICA) sistemin gerilim profilinin artırıldığı ve kayıpların azaltıldığı gözlemlenmiştir.

6.3. UPFC BAĞLI IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİ

IEEE-30 baralı güç sisteminde UPFC cihazlarının optimal yerleşim noktalarını belirlemek için PSO, GA ve ICA optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. UPFC kurulumundan önce ve sonra bara gerilimleri incelenerek UPFC denetleyicisinin gerilim kararlılığına etkisi gösterilmiştir. Hat kayıpları UPFC'nin konumuna bağlı olarak çeşitli optimizasyon teknikleri ile incelenmiştir. UPFC'nin sisteme dahil edilmesi ile sistem yüklenebilirliğinde önemli derecede artış olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 6.12'de IEEE-30 baralı güç sisteminde UPFC'nin optimal yerleşim noktaları belirtilmiştir.

Tablo 6.12. IEEE-30 baralı güç sisteminde UPFC için optimal konum verileri.

Optimizasyon Yöntemi	Optimal Konum	Aktif Güç Kayıpları	V_{se}	$\emptyset_{se}$	i_{sh}
PSO	3-4	2.5478	0.2480	67	0.0106
	3-4	2.3742	0.2152	65	-0.0686
	25-27		0.2794	83	-0.0495
	5-7	1.9649	0.1081	112	0.1094
	21-22		0.0954	217	-0.0146
	1-2		0.1128	103	0.0174

Tablo 6.12. (devam). IEEE-30 baralı güç sisteminde UPFC için optimal konum verileri.

GA	16-17	2.5318	0.2320	71	0.0156
	3-4	2.1642	0.1829	109	0.0365
	12-15		0.2051	217	-0.0187
	3-4	1.7614	0.1789	95	0.0589
	15-18		0.1857	113	0.1589
	22-24		0.1285	239	0.0254
ICA	24-23	2.5143	0.2398	84	0.0198
	24-23	2.0843	0.1185	110	0.0158
	20-10		0.2153	93	0.0258
	24-23	1.6274	0.1110	208	0.0154
	20-10		0.1845	234	-0.0112
	30-27		0.1145	78	0.0685

UPFC'nin optimal yerleşim noktalarını belirlemek için ICA algoritması 3 defa çalıştırılmıştır. Birinci çalıştırmada, algoritma UPFC için optimal konumun 24 ve 23 numaralı baralar arası olduğunu belirlemiştir. Birinci UPFC sisteme ilave edildikten sonra algoritma tekrar çalıştırıldı ve optimal konumun 20 ve 10 numaralı baralar arası olduğu belirlenmiştir. Böylece sisteme iki UPFC dahil edilmiştir. Algoritma üçüncü kez çalıştırıldığında üçüncü UPFC için optimal konumun 30 ve 27 numaralı baralar arası olduğu belirlenmiştir.

Sistemde üç adet UPFC bulunması durumunda kayıpların 1.6274'e düştüğü gözlemlenmiştir. UPFC'nin şebekeye dahil edilmesinden sonra gerilim profilinin seviyesi aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir. Tablo 6.13, Tablo 6.14 ve Tablo 6.15 sırasıyla bir, iki ve üç UPFC kullanılması durumunda bara gerilimlerinin seviyesini göstermektedir.

Tablo 6.13. Bir UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.

Bara No	UPFC öncesi bara voltajı	UPFC sonrası bara voltajı		
		GA	PSO	ICA
Bara 01	1.05	1.05	1.05	1.05
Bara 02	1.034	1.018	1.03	1.021
Bara 03	0.958	0.947	1.013	0.968
Bara 04	0.946	0.947	1.016	0.975
Bara 05	1.006	1.012	1.013	1.015
Bara 06	0.959	0.95	1.006	0.916
Bara 07	0.948	0.976	0.984	0.923
Bara 08	1.023	1.024	1.019	1.02
Bara 09	0.937	0.954	0.955	0.918
Bara 10	0.848	0.997	0.945	0.965

Tablo 6.13. (devam). Bir UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.

Bara 11	1.091	1.058	1.038	1.07
Bara 12	0.953	1.024	1.017	0.979
Bara 13	1.088	1.027	1.059	1.058
Bara 14	0.884	0.991	0.94	0.991
Bara 15	0.853	0.925	0.915	0.985
Bara 16	0.881	0.934	0.924	0.976
Bara 17	0.837	0.946	0.936	0.957
Bara 18	0.801	0.924	0.931	0.94
Bara 19	0.783	0.943	0.931	0.936
Bara 20	0.735	0.902	0.899	0.905
Bara 21	0.792	0.914	0.864	0.904
Bara 22	0.792	0.916	0.887	1.03
Bara 23	0.783	0.921	0.865	0.962
Bara 24	0.723	0.913	0.879	1.04
Bara 25	0.694	0.897	0.864	0.992
Bara 26	0.602	0.886	0.829	0.967
Bara 27	0.723	0.894	0.879	0.949
Bara 28	0.932	0.957	0.948	0.994
Bara 29	0.775	0.882	0.867	0.947
Bara 30	0.768	0.903	0.893	0.946

Tablo 6.13'te IEEE 30 baralı güç sisteminde bir UPFC kullanıldığında güç sistemi baralarının gerilim seviyesi gösterilmiştir. Optimizasyon öncesi bara gerilim değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu problemi ortadan kaldırmak için üç evrimsel algoritma uygulanarak UPFC için optimal yerleşim noktaları belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarından UPFC'lerin belirlenen noktalara yerleştirilmesi ile gerilim profili seviyesinin geliştirildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6.12'de belirtildiği gibi UPFC; GA yönteminde 16-17 numaralı hatları arasına, PSO yönteminde 3-4 numaralı hatlar arasına, ICA yönteminde ise 24-23 numaralı hatlar arasına yerleştirilmiştir. ICA yöntemi kullanıldığında aktif güç kayıplarının en aza indirildiği gözlemlenmiştir. Kullanılan üç evrimsel algoritmada da gerilim profili seviyesinin iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Tablo 6.14'te IEEE 30 baralı güç sisteminde iki UPFC kullanıldığında güç sistemi baralarının gerilim seviyesi gösterilmiştir

Tablo 6.14. İki UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.

Bara No	UPFC öncesi bara voltajı	UPFC sonrası bara voltajı		
		GA	PSO	ICA
Bara 01	1.05	1.05	1.05	1.05
Bara 02	1.034	1.024	1.009	1.038
Bara 03	0.958	1.003	1.002	0.908
Bara 04	0.946	1.010	1.003	0.902

Tablo 6.14. (devam). İki UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.

Bara 05	1.006	1.006	1.005	1.006
Bara 06	0.959	1.002	1.023	0.913
Bara 07	0.948	0.930	0.912	0.914
Bara 08	1.023	1.007	1.02	1.014
Bara 09	0.937	0.968	0.959	0.982
Bara 10	0.848	0.923	0.877	1.034
Bara 11	1.091	1.019	1.017	1.029
Bara 12	0.953	1.015	1.08	0.988
Bara 13	1.088	1.057	1.039	1.05
Bara 14	0.884	0.968	0.915	0.954
Bara 15	0.853	1.002	0.902	0.994
Bara 16	0.881	0.987	0.864	0.965
Bara 17	0.837	0.937	0.907	0.967
Bara 18	0.801	0.991	0.902	0.927
Bara 19	0.783	0.996	0.904	0.997
Bara 20	0.735	0.976	0.913	1.03
Bara 21	0.792	0.947	0.927	0.998
Bara 22	0.792	0.975	0.935	0.999
Bara 23	0.783	0.987	0.987	1.024
Bara 24	0.723	0.928	0.912	1.004
Bara 25	0.694	0.897	1.017	0.991
Bara 26	0.602	0.872	0.915	0.963
Bara 27	0.723	0.984	1.003	0.946
Bara 28	0.932	0.983	0.932	0.998
Bara 29	0.775	0.897	0.909	0.974
Bara 30	0.768	0.859	0.904	0.976

Tablo 6.14 güç sisteminde iki UPFC kullanıldığında voltaj seviyesini göstermektedir. Bu durumda, PSO yöntemi UPFC'leri 3-4 ve 25-27 hatları arasında, GA yöntemi 3-4 ve 12-15 numaralı hatlar arasında, ICA yöntemi ise 24-23 ve 20-10 numaralı hatlar arasında konumlandırmıştır.

Sürekli güç akışı sonucunda UPFC'lerin konumlandırıldığı baralardaki gerilim profili seviyesinin birim değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma durumu için ICA tekniği kayıpların azaltılması bakımından diğer algoritmalara göre daha iyi bir performans sergilemiştir. İki UPFC kullanıldığında gerilim seviyesi, sistemde tek bir UPFC kullanımına göre daha iyidir fakat FACTS bileşenlerinin sayısının artması nedeniyle maliyet de artacaktır. Tablo 6.15 güç sisteminde üç UPFC kullanılması durumunda gerilim profilinin seviyesini göstermektedir.

Tablo 6.15. Üç UPFC kullanıldığında gerilim profilinin seviyesi.

Bara No	UPFC öncesi bara voltajı	UPFC sonrası bara voltajı		
		GA	PSO	ICA
Bara 01	1.05	1.05	1.05	1.05
Bara 02	1.034	1.031	1.027	1.040
Bara 03	0.958	1.03	1.01	0.978
Bara 04	0.946	1.015	0.989	0.959
Bara 05	1.006	1.005	1.004	1.006
Bara 06	0.959	0.994	0.991	0.978
Bara 07	0.948	0.975	1.002	0.962
Bara 08	1.023	1.017	1.02	1.025
Bara 09	0.937	0.987	0.995	0.973
Bara 10	0.848	0.972	0.985	1.023
Bara 11	1.091	1.039	1.028	1.033
Bara 12	0.953	0.992	0.997	0.992
Bara 13	1.088	1.057	1.069	1.058
Bara 14	0.884	0.947	0.959	0.976
Bara 15	0.853	1.027	0.983	0.995
Bara 16	0.881	0.992	0.965	0.972
Bara 17	0.837	0.955	0.937	0.958
Bara 18	0.801	1.007	0.979	0.982
Bara 19	0.783	0.974	0.978	0.987
Bara 20	0.735	0.998	0.964	1.032
Bara 21	0.792	0.968	1.004	0.989
Bara 22	0.792	1.013	1.026	0.992
Bara 23	0.783	0.992	0.987	1.016
Bara 24	0.723	1.009	0.992	1.003
Bara 25	0.694	0.924	0.817	0.998
Bara 26	0.602	0.907	0.826	0.973
Bara 27	0.723	0.942	0.855	1.024
Bara 28	0.932	0.976	0.904	0.973
Bara 29	0.775	0.924	0.899	0.977
Bara 30	0.768	0.865	0.907	1.024

Tablo 6.15 güç sisteminde üç UPFC kullanılması durumunda gerilim profili seviyesini göstermektedir. Üç UPFC kullanıldığında PSO yöntemine göre UPFC’lerin optimal yerleşim noktaları 5-7, 21-22 ve 1-2 hatları arasındır. GA optimizasyon tekniğine göre UPFC’lerin optimal yerleşim noktaları 3-4, 15-18 ve 22-24 hatları arası, ICA tekniğine göre ise 24-23, 20-10 ve 30-27 hatları arasındır.

ICA tekniği ile kayıpların seviyesinin diğer tekniklerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Gerilim profilinin seviyesi, UPFC kurulumunun olduğu yerlerde birim değere ulaşmıştır. Simülasyon sonuçlarından güç sisteminde UPFC’lerin kullanımıyla kayıpların azaltılabileceği ve gerilim karalılığının sağlanabileceği belirlenmiştir.

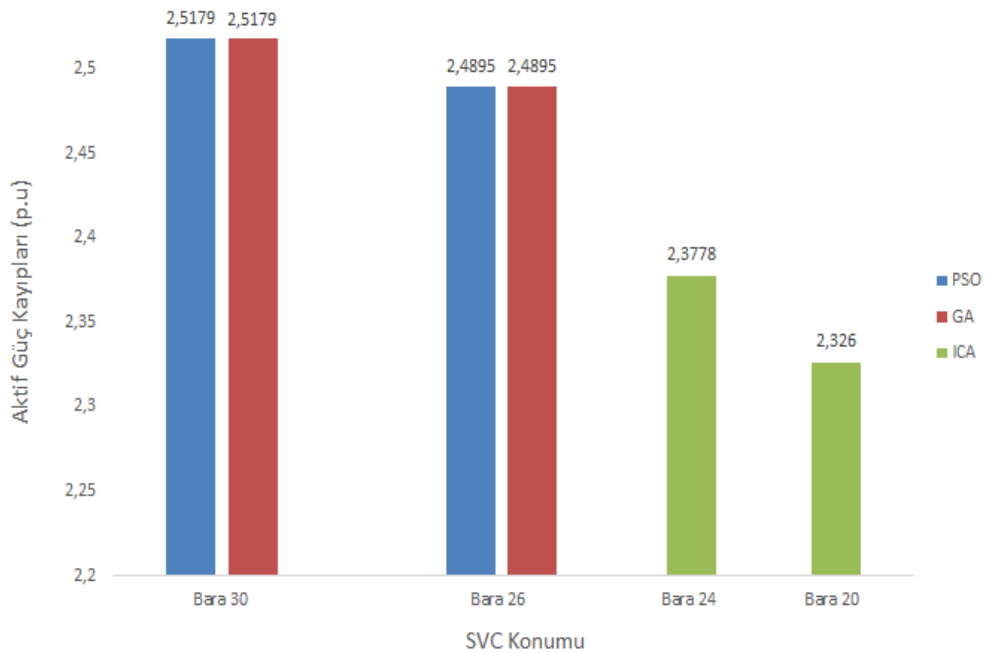
6.4. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmada IEEE-30 baralı güç sisteminin temel durumda ve güç sistemine SVC ve UPFC eklendiği durumlardaki simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.16 farklı algoritmalar kullanıldığında kayıpların seviyesini ve SVC'nin optimal konumunu göstermektedir.

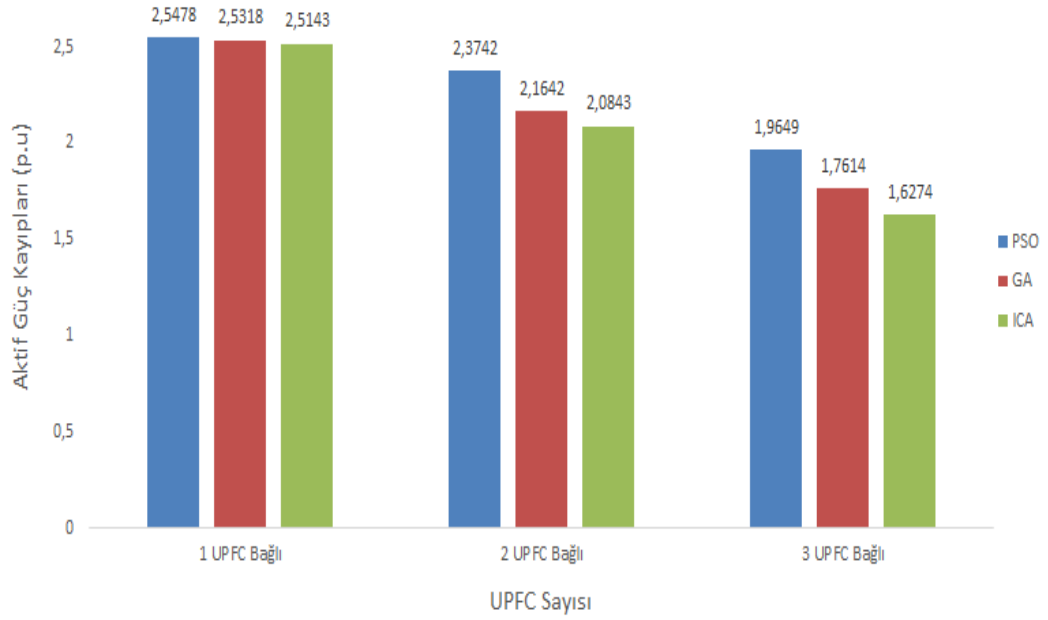
Tablo 6.16. SVC'nin farklı algoritmalarla optimal konumlandırılması sonucu kayıpların özeti.

Optimizasyon yöntemi	Bara no	Aktif güç kayıpları (p.u)
PSO	26	2.4895
	30	2.5179
GA	26	2.4895
	30	2.5179
ICA	24	2.3778
	20	2.3260

Tablo 6.16'da PSO ve GA algoritmalarının SVC'yi güç sisteminde aynı noktalara yerleştirdiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, ICA ile elde edilen kayıp seviyesinin diğer algoritmalarla göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.8'de ICA, GA ve PSO yöntemleri ile belirlenen SVC konumuna bağlı olarak aktif güç kayıplarının seviyesi gösterilmiştir. Şekil 6.9'da ise UPFC sayısına bağlı olarak aktif güç kayıplarının seviyesi gösterilmiştir.



Şekil 6.8. SVC konumuna bağlı olarak aktif güç kayıplarının seviyesi.



Şekil 6.9. UPFC sayısına bağlı olarak aktif güç kayıplarının seviyesi.

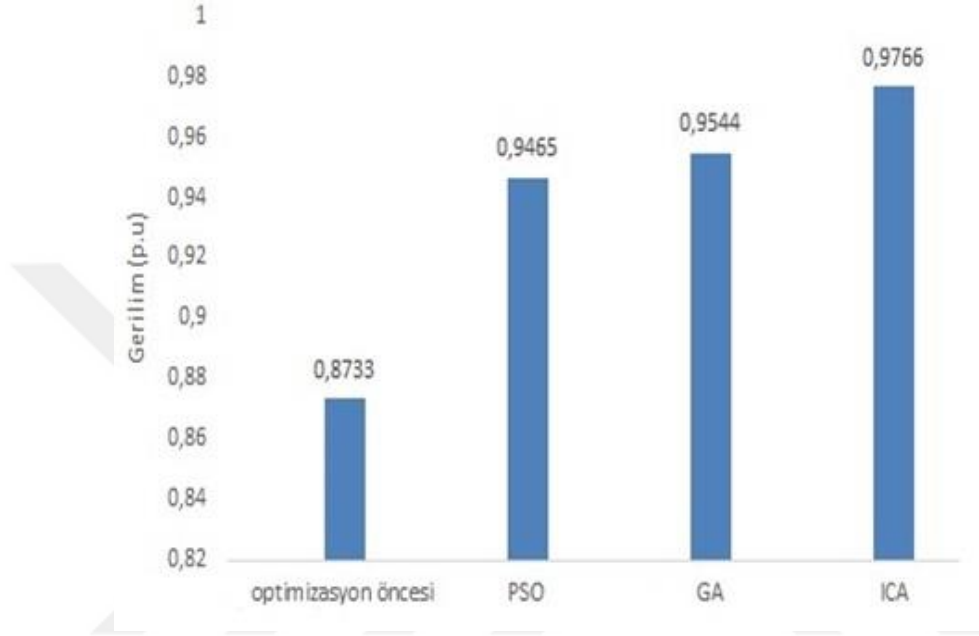
Şekil 6.8’de güç sistemindeki SVC’leri tahsis etme açısından PSO ve GA yöntemlerinde kayıp seviyesinin aynı olduğu görülmektedir. ICA tekniği diğer iki algorithmadan daha başarılıdır. ICA algoritmasında SVC’nin Bara 20’de konumlandırılması ile kayıplar en aza indirilmiştir. Şekil 6.9’da UPFC cihazlarıyla ilgili olarak üç farklı senaryo gösterilmiştir. UPFC’ler güç sistemine ayrı ayrı ve kombine şekilde bağlanmıştır.

UPFC sayısına bağlı olarak elde edilen kayıp değerleri incelendiğinde ICA algoritmasının daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Üç UPFC kullanıldığında, kayıp seviyesinin keskin bir şekilde düştüğü belirlenmiştir. Şekil 6.10 SVC’lerin konumlandırılması açısından algoritmaların yakınsama süresini göstermektedir.



Şekil 6.10. Algoritmaların yakınsama sürelerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.11, 6.12 ve 6.13 güç sisteminde farklı sayıda UPFC kullanıldığında ortalama bara voltaj değerlerini göstermektedir. Bir UPFC kullanıldığında, PSO yönteminde ortalama gerilim seviyesinin diğer tekniklerden daha düşük olduğu görülebilir. Bununla birlikte güç sisteminde iki UPFC kullanıldığında, GA ve ICA algoritmalarının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Üç UPFC kullanıldığında ise ICA tekniği daha iyi bir performans göstermiştir.



Şekil 6.11. Bir UPFC kullanıldığında ortalama bara voltajı.



Şekil 6.12. İki UPFC kullanıldığında ortalama bara voltajı.



Şekil 6.13. Üç UPFC kullanıldığında ortalama bara voltajı.

Simülasyon sonuçlarından FACTS denetleyicisi kullanarak gerilim seviyesinin ve kayıpların azaltılmasına bağlı olarak sistem yüklenebilirliğinin artırılacağı gözlemlenmiştir.

Bu bölümde FACTS cihazları ile kompanse edilen ve FACTS cihazı içermeyen IEEE-30 baralı güç sistemi analiz edilmiştir. Ayrıca voltaj profili ve P-V eğrileri de gösterilmiştir. SVC'ler ve UPFC'ler paralel ve seri- paralel kompanzatörler olarak kabul edilmiş ve güç sistemine dahil edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından FACTS bileşenlerinin kurulumundan sonra voltaj profili seviyesi ve aktif güç kayıplarının azaltılmasına bağlı olarak sistem yüklenebilirliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinin problemlerine çözüm üretmek için en son geliştirilen evrimsel algoritmalarından biri olan emperyalist rekabetçi algoritma araştırılmıştır. Emperyalist rekabetçi algoritma IEEE-30 baralı güç sisteminde FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi problemine uygulanmış ve sonuçlar GA ve PSO yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Emperyalist rekabetçi algoritmanın tercih edilme sebepleri yakınsama hızı, kayıp azaltma ve gerilim kararlılığındaki başarısıdır.

Başlangıçta FACTS cihazlarının güç sistemleri üzerindeki etkisi ve güç sistemlerinin bu cihazlara olan ihtiyacı tartışılmıştır. Daha sonra güç elektroniğinin en önemli bileşenlerinden biri olan FACTS cihazları açıklanmıştır. Farklı FACTS cihazlarının çeşitleri ve çalışma şekilleri anlatılmıştır.

Güç sistemlerinde FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarını bulmak için kullanılan amaç fonksiyonları ve kısıtlamalar gösterilmiştir. Optimizasyon probleminin çözümü için kullanılan ICA, PSO ve GA algoritmalarının karşılaştırması yapılmıştır. ICA yöntemi ile bulunan optimal yerleşim noktalarına SVC ve UPFC yerleştirildiğinde gerilim kararlılığı ve kayıpların azaltılması bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Simülasyonların gerçekleştirildiği güç sistemi IEEE 30 baralı güç sistemidir. FACTS cihazlarının sistemdeki etkisini gözlemleyebilmek için SVC ve UPFC cihazları test sistemine ayrı ayrı dahil edilmiştir. FACTS cihazının bağlı olduğu ve olmadığı durumlar için P-V eğrileri ve gerilim profili analiz edilmiştir. SVC'ler ve UPFC'ler paralel ve seri-paralel kompanzatörler olarak kabul edilmiş ve simülasyonlara dahil edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından FACTS cihazlarının belirlenen noktalara kurulumundan sonra voltaj profili seviyesinin geliştirildiği ve kayıpların azaltılması ile sistem yüklenebilirliğinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışma SVC ve UPFC cihazlarının güç sistemlerine etkisi ve bu cihazların güç sistemi problemlerine sağladığı çözümler hakkında yol gösterici olmuştur. Bundan sonraki çalışmalarda diğer FACTS cihazlarının güç sistemine entegrasyonu yapılarak etkileri tartışılabilir. Bu nedenle, farklı FACTS cihazları dahil ederek, farklı çözümler ve daha

kapsamlı analizler yapılabilir. Daha fazla FACTS kullanımı ve farklı amaç fonksiyonları ile güç aktarım problemleri giderilebilir. Son zamanlarda, araştırmacılar algoritmaların özelliklerini birleştirerek yeni bir algoritma elde etmek için uğraşmaktadır. Dolayısıyla, genetik algoritma ve emperyalist rekabetçi algoritma gibi algoritmaların bir kombinasyonu ile her ikisinin de özelliklerini içeren hibrit bir algoritma elde edilebilir.



8. KAYNAKLAR

- [1] M. M. Belsnes, G. Warland and O. Wolfgang, "Simulating equilibrium prices in oligopoly power markets," *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, Trondheim, 2011, pp. 1-8.
- [2] A. Kumar and S. B. Dubey, "Enhancement of transient stability in transmission line using SVC facts Controller," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 2, no. 2, 2013.
- [3] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS*, IEEE Press, 1999.
- [4] Y. H. Song and A. T. Johns, *Flexible AC Transmission System (FACTS)*, London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers (IEE), 1999.
- [5] Cigre 95 TP108, "FACTS Overview," IEEE Power Engineering Society, 1995.
- [6] M. Karthik and P. Arul, "Optimal power flow control using FACTS devices," *International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE)*, vol. 1, no. 12, pp. 2319–6378, 2013.
- [7] C. Makkar and L. Dewan, "Transient stability enhancement using robust FACTS controllers a brief tour," *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, vol. 1, no. 7, pp. 150-154, 2010.
- [8] S. K. Rajendran, "Power system performance enhancement using flexible AC transmission system devices," Ph.D. dissertation, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, Canada, 2015.
- [9] S. Soman. (2015, September 28). FACTS devices to enhance power system performance [Online]. Available: <http://electrical-engineering-portal.com/facts-devices-to-enhance-power-system-performance>
- [10] N. G. Hingorani, "Flexible AC transmission," *IEEE Spectrum*, vol. 30, no.4, pp. 40-45, 1993.
- [11] R. Idris, A. Khairuddin and M. Mustafa, "A multi-objective Bees Algorithm for optimum allocation of FACTS devices for restructured power system," *TENCON IEEE Region 10 Conference*, Singapore, 2009, pp. 1-6.
- [12] H. Shaheen, G. Rashed and S. Cheng, "Optimal location and parameters setting of unified power flow controller based on evolutionary optimization techniques," *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, Tampa, USA, 2007, pp. 1-8.
- [13] R. Sheeba, M. Jayaraju, M. Muhammed, T. Shanavas and K. Sundareswaran, "Identification of optimal location of SVC through artificial intelligence techniques," *Innovative Smart Grid Technologies-India (ISGT India) IEEE PES*, Kerala, India, 2011, pp. 149-154.
- [14] D. Mondal, A. Chakrabarti and A. Sengupta, "PSO based location and parameter setting of advance SVC controller with comparison to GA in mitigating small signal oscillations," *Energy, Automation, and Signal (ICEAS), International Conference*, Odisha, India, 2011, pp. 1-6.

- [15] A. Bhowmik, A. Chakraborty and P. Das, "Optimal location of UPFC based on PSO algorithm considering active power loss minimization," *Power India Conference IEEE Fifth*, Murthal, India, 2012, pp. 1-6.
- [16] R. Rekha and G. Kannan, "A comparative analysis on reactive power optimization using various techniques in deregulated power system," *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS) International Conference*, Nagercoil, India, 2013, pp. 1341-1346.
- [17] G. Rashed, H. Shaheen and S. Cheng, "Optimal location and parameter settings of multiple TCSCs for increasing power system loadability based on GA and PSO techniques," *Natural Computation ICNC Third International Conference*, Haikou, China, 2007, pp. 335-344 .
- [18] Z. Lu, M. Li, W. Tang and Q. Wu, "Optimal location of FACTS devices by a Bacterial Swarming Algorithm for reactive power planning," *Evolutionary Computation (CEC) IEEE Congress*, Singapore, 2007, pp. 2344–2349.
- [19] A. Mohammadi and M. Jazaeri, "A hybrid particle swarm optimization-genetic algorithm for optimal location of svc devices in power system planning," *Universities Power Engineering Conference (UPEC) 42nd International*, Brighton, 2007, pp. 1175–1181.
- [20] Y. Valle Del, M. Digman, A. Gray, J. Perkel, G. Venayagamoorthy and R. Harley, "Enhanced particle swarm optimizer for power system application," *Swarm Intelligence Symposium(SIS) IEEE*, St. Louis, 2008, pp. 1-7.
- [21] I. Kheirizad, A. Mohammadi and M. Varahram, "A novel algorithm for optimal location of FACTS devices in power system planning," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 177-183, 2008.
- [22] M. Kowsalya, K.K. Ray, U. Shipurkar and Saranathan, "Voltage stability enhancement by optimal placement of UPFC," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 310-314, 2009.
- [23] R. Jahani, "Optimal placement of UPFC in power systems using imperialist competitive algorithm," *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 8, no. 6, pp. 999-1007, 2011.
- [24] S. Jayanti and S.K. Goswami, "Solution of multiple UPFC placement using Gravitational Search Algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 531-541, 2014.
- [25] B. Bhattacharyya, V. Kumar Gupta and S. Kumar, "UPFC with series and shunt FACTS controller for the economic operation of a power system," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 5, pp. 775-787, 2014.
- [26] P. Ramesh and M.D. Reddy, "Loss reduction through optimal placement of Unified Power Flow Controller using Firefly Algorithm," *International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, no. 10, pp. 4657-4667, 2013.
- [27] N. M. Nwohu, "Optimal location of unified power flow controller (UPFC) in nigerian grid system," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 4, no. 2, pp. 147-153, 2010.
- [28] A. Laifa and M. Boudour, "Optimal placement and parameter setting of UPFC device using a perturbed particle swarm optimization," *Energy Conference and Exhibition*

- (EnergyCon) *IEEE International*, Manama, Bahrain, 2010, pp. 205-210.
- [29] S. I. Tous, E. Salimi and S. Hasanpour, "Optimal placement of UPFC for voltage drop compensation," *International Journal of Automation and Power Engineering*, 2012, pp. 112-117.
 - [30] S. Reddy and K. M. Verma, "An approach for optimal placement of UPFC to enhance voltage stability margin under contingencies," *Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, Bombay, 2008, pp. 441-446.
 - [31] D. Povh, "Modeling of FACTS in power system studies," *Power Engineering Society Winter Meeting IEEE*, Singapore, 2000, pp. 1435 – 1439.
 - [32] Z. Krupka, "Method cooperation in optimization process," *MECHATRONIKA 13th International Symposium*, Slovakia , 2010, pp. 21-23.
 - [33] M. Baysal, "Harmonik içeren güç sistemlerinin gerilim kararlılığının yük modellemeleri ve FACTS elemanları bakımından incelenmesi," Doktora tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
 - [34] M. Shahrazad, "Optimal allocation of FACTS devices in power networks using imperialist competitive algorithm (ICA)," Ph.D. dissertation, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University, London, 2015.
 - [35] E. Larsen, D. Baker, A. Imece, L. Gerin-Lajoie and G. Scott, "Basic aspects of applying SVC's to series-compensated AC transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1466-1473, 1990.
 - [36] E. H. Watanabe, M. Aredes, P. G. Barbosa, G. Santos, F. K. A. Lima, *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications*, 3rd ed., USA: Elsevier, 2007, ch.31, pp. 783-808.
 - [37] A. Gelen and T. Yalcinoz, "Analysis of TSR-based SVC for a three-phase system with static and dynamic loads," *Electrical Engineering ICEE '07. International Conference*, Lahore, 2007, pp. 1-6.
 - [38] N. Mithulananthan, A. Sode-Yome, N. Acharya, and S. Phichaisawat, Application of FACTS controllers in Thailand power systems, *Lecture Notes*, Asian Institute of Technology, 2005.
 - [39] M. Güleryüz, "FACTS cihazları ve rüzgar enerji santrallerinin gerilim kararlılığına etkilerinin incelenmesi," Yüksek Lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
 - [40] Y. H. Song and A. T. Johns, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, 1st ed., London, England: IET, 1999, pp. 542-548
 - [41] ABB Ltd. (2016, June 15). [Online]. Available: <http://www.abb.com>
 - [42] Areva T&D. (2016, May 12). [Online]. Available: <http://www.arevatd.com>
 - [43] Fingrid's Annual Report. (2017, August 22). [Online]. Available: http://www.fingrid.fi/en/investors/talousliitteet/taloudelliset%20raportit%20English/Annual%20Report%202009_Fingrid.pdf
 - [44] X. P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems Modelling and Control*, 1st ed., New Jersey, USA: Springer, 2006.
 - [45] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*, 2nd ed., England: John Wiley & Sons,

2004.

- [46] J. J. Paserba, "How FACTS controllers benefit AC transmission systems," *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, pp. 1257-1262, 2004.
- [47] Siemens Ltd. (2017, March 15). [Online]. Available: <http://www.siemens.com>
- [48] L. De Souza, E. Watanabe and J. Da Rocha Alves, "Thyristor and gate-controlled series capacitors: A comparison of components rating," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 899-906, 2008.
- [49] M. M. Ertay. "Enerji iletim sistemlerinin UPFC ile kontrolü," Yüksek Lisans tezi, Elektrik Eğitimi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2006.
- [50] B. M. Han, H. J. Kim, and S. T. Baek, "Performance analysis of SSSC based on three-level multi-bridge PWM inverter," *Electric Power Systems Research*, vol. 61, no. 3, pp. 195-202, 2002.
- [51] Overview of Flexible AC Transmission System, FACTS, International Council on Large Electric Systems (CIGRE). (2017, April 11). [Online]. Available: http://b4.cigre.org/content/download/1973/25265/version/2/file/FACTS+overview_Cigr%C3%A9+B4_What+is+FACTSID10VER39.pdf
- [52] A. Gupta, and P. R. Sharma, "Static and transient stability of power system by optimally placing UPFC," *Advanced Computing and Communication Technologies (ACCT) Third International Conference*, Rohtak, India, 2013, pp. 121-125.
- [53] A. S. Mehraban, A. Edris, C. D. Schauder and J. H. Provanzana, "Installation, commissioning, and operation of the world's first UPFC on the AEP system," *Power System Technology Proceedings POWERCON '98 International Conference*, Beijing, China, 1998, pp. 323-327.
- [54] E. Uzunovic, B. Fardanesh, L. Hopkins, B. Shperling, S. Zelingher and A. Schuff, "NYPA convertible static compensator (CSC) application phase I: STATCOM," *Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES*, 2001, pp. 1139-1143.
- [55] B. Karthik, "Modeling studies of inter line power flow controller for multi line transmission system," *IET-UK International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES)*, Tamilnadu, India, 2007, pp. 475-479.
- [56] S. Omran, R. Broadwater, J. Hambrick and M. Dilek, "DSR design fundamentals: Power flow control," *PES General Meeting 2014 IEEE Conference and Exposition IEEE*, 2014, National Harbor, USA, pp. 1-5.
- [57] D. J. Gotham, and G. T. Heydt, "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.13, no.1, pp. 60-65, 1998.
- [58] K. M. Rogers, and T. J. Overbye, "Power flow control with distributed flexible AC transmission system (D-FACTS) devices," *North American Power Symposium (NAPS)*, Starkville, USA, 2009, pp. 1-6
- [59] A. Brissette, D. Maksimović, and Y. Levron, "Distributed series static compensator deployment using a linearized transmission system model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1269-1277, 2015.
- [60] F. Kreikebaum, M. Imayavaramban, and D. Divan, "Active smart wires: An inverter-

- less static series compensator," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) IEEE*, Atlanta, USA, 2010, pp. 3626-3630.
- [61] D. Das, F. Kreikebaum, D. Divan and F. Lambert, "Reducing transmission investment to meet renewable portfolio standards using smart wires," *Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE PES*, New Orleans, USA, 2010, pp. 1-7.
 - [62] H. Johal, *Distributed Series Reactance: A New Approach To Realize Grid Power Flow Control*, 2nd ed., Ann Arbor, USA: ProQuest Dissertations Publishing, 2008.
 - [63] D. Divan, and H. Johal, "Distributed FACTS-A new concept for realizing grid power flow control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 2253-2260, 2007.
 - [64] X. Chen, B. Chen, C. Tian, J. Yuan and Y. Liu, "Modeling and harmonic optimization of a two-stage saturable magnetically controlled reactor for an arc suppression coil," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 2824-2831, 2012.
 - [65] C. Feng, W. Jun, Z. Hao, L. Wenhua, T. Cuihua, Y. Jian and C. Baichao, "Fast response research of magnetically controlled reactor," *International Journal of Smart Home*, vol. 9, no.10, pp. 97-106, 2015.
 - [66] Z. Liang, and D. He, "The application and research of MCR in substation reactive power compensation," *Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), International Conference*, Offenburg, Germany, 2015, pp. 112-115.
 - [67] N. Tabataei, G. Aghajani, N. Boushehri and S. Shoarinejad, "Optimal location of FACTS devices using adaptive particle swarm sptimization mixed with simulated annealing," *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, vol. 3, no. 2, pp. 60-70, 2011.
 - [68] P. Kundur, J. Paserba, and V. Ajjarapu "Definition and Classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, 2004.
 - [69] M. Pavella, D. Ernst and D. Ruiz-Vega, *Transient stability of power systems: A unified approach to assessment and control*, 1st ed., Newyork, USA:Springer Science, 2000.
 - [70] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Ames Iowa, USA: The Iowa State University Press,1977.
 - [71] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, USA: Mc.Graw-hill, 1994.
 - [72] A. Hoballah, "Power system stability assessment and enhancement using computational intelligence," Ph.D. dissertation, Department of Electronics and Information, Duisburg-Essen University, Duisburg, Germany, 2011.
 - [73] S. Tosun, "Güç sistemlerinde gerilim kararlılığının sezgisel yöntemlerle incelenmesi," Yüksek Lisans tezi, Elektrik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2011.
 - [74] U. G. Knight, *Power Systems in Emergencies: From Contingency Planning to Crisis Management*, London, England: John Wiley & Sons, 2001.
 - [75] ENTSO. (2016, 24 July). Operational handbook. [Online]. Available:

[https://www.entsoe.eu/index.php?id=57&no_cache=1&sword_list\[\]=Control](https://www.entsoe.eu/index.php?id=57&no_cache=1&sword_list[]=Control)

- [76] M. M. Begovic, and A. G. Phadke, "Control of voltage stability using sensitivity analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no.1, pp. 114–123, 1992.
- [77] T. V. Cutsem, and C. D. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, 1st ed., London, England: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [78] P. M. Anderson, and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 4th ed., The Iowa:Iowa State University Pres, 1986.
- [79] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 647-655, 1992.
- [80] M. K. Pal, "Voltage stability: analysis needs, modelling requirement and modelling adequacy," *IEE Proceedings-C (Generation, Transmission and Distribution)*, vol. 140, no. 4, pp. 279-286, 1993.
- [81] S. Sheng, W. Yingkun, L. Yuyi, L. Yong and J. Yu, "Cyber attack impact on power system blackout," *IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2011)*, London, 2011, pp. 33.
- [82] P. Hines, J. Apt, and S. Talukdar, "Large blackouts in North America: Historical trends and policy implications," *Energy Policy*, vol. 37, no. 12, pp. 5249-5259.
- [83] S. Repo, "On-line voltage stability assesment of power system an approach of black-box modelling," Ph.D. dissertation, Department of Electric Energy Engineering, Tampera University of Technology, Tampera, Finland, 2001.
- [84] G. Andersson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatziaargyriou, I. Kamwa, P. Kundur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor, and V. Vittal, "Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp.1922-1928, 2005.
- [85] S. Polat, ve H. Şekerci, "Dünyada ve ülkemizde önemli elektrik çöküntüleri," 4. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi'nde sunuldu, İzmir, 2015.
- [86] E. Atashpaz-Gargari, and C. Lucas, "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition," *Evolutionary Computation CEC IEEE Congress*, Singapore, 2007, pp. 4661-4667.
- [87] E. Atashpaz-Gargari, R. Rajabion, F. Hashemzadeh, B. Mesgari and F. Rajaiee Salmasi, "Identification of a MIMO evaporator and its decentralized PID controller tuning using colonial competitive algorithm," *IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008.
- [88] C. Lucas, Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 7, pp. 1407-1411, 2010.
- [89] W. Hu, G. G. Yen, and X. Zhang, "Multiobjective particle swarm optimization based on pareto entropy," *Journal of Software*, vol. 25, no. 5, pp. 1025-1050, 2014.
- [90] H. Wang, H. Ouyang, and L. Gao, "An improved global particle swarm optimization," *Control and Decision*, vol. 31, no. 7, pp. 1161-1168, 2016.
- [91] D. Singh, and P. K. Padhy, "Design and tuning of PID controller for higher order

- process using PSO-NM," *International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT2017)*, India, 2017.
- [92] M. H. A. Majid, and A. M. R. Arshad, "An analysis of PSO inertia weight effect on swarm robot source searching efficiency," *IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS 2017)*, Malaysia, 2017.
- [93] M.Y. Özsağlam, ve M. Çunkaş, "Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu algoritması," *Politeknik Dergisi*, c. 11, s. 4, ss. 299-305, 2008.
- [94] A. Chatterjee, A. Rastogi, R. Rastogi, A. Saini, and S. K. Sahoo, "Selective harmonic elimination of cascaded H-bridge multilevel inverter using genetic algorithm," *International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT2017)*, India, 2017.
- [95] T.Y. Lim, "Structured population genetic algorithms: a literature survey," *Artificial Intelligence Review*, vol. 41, no. 3, pp. 385-399, 2014.
- [96] K. Hergli, H. Marouani, M. Zidi, M. Y. Fouad, and M. Elshazly, "Identification of preisach hysteresis model parameters using genetic algorithms," *Journal of King Saud University-Science*, 2017.
- [97] J. G. Singh, S. N. Singh and S. C. Srivastava, "Enhancement of power system security through optimal placement of TCSC and UPFC," *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, Tampa, USA, 2007, pp. 1-6.
- [98] K. Ravi and M. Rajaram, "Optimal location of FACTS devices using enhanced particle swarm optimization," *Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), IEEE International Conference*, Ramanathapuram, India, 2012, pp. 414-419.

9. EKLER

9.1. EK 1: IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN BARA VERİLERİ

Tablo 9.1. IEEE-30 baralı güç sisteminin bara verileri.

BusNo	Bus_Type	PD	QD	B	VM	VA	Base_KV	Vmax	Vmin
1	3	0.0	0.0	0.0	1.060	0.0	132	1.05	0.95
2	2	21.7	12.7	0.0	1.043	-5.48	132	1.05	0.95
3	1	2.4	1.2	0.0	1.021	-7.96	132	1.05	0.95
4	1	7.6	1.6	0.0	1.012	-9.60	132	1.05	0.95
5	2	19.4	19.0	0.0	1.010	-14.37	132	1.05	0.95
6	1	0.0	0.0	0.0	1.010	-11.34	132	1.05	0.95
7	1	22.8	10.9	0.0	1.002	-13.12	132	1.05	0.95
8	2	30	30	0.0	1.010	-12.10	132	1.05	0.95
9	1	0.0	0.0	0.0	1.051	-14.38	1	1.05	0.95
10	1	5.8	2	0.19	1.045	-15.97	33	1.05	0.95
11	2	0.0	0.0	0.0	1.082	-14.39	11	1.05	0.95
12	1	11.2	7.5	0.0	1.057	-15.24	33	1.05	0.95
13	2	0.0	0.0	0.0	1.071	-15.24	11	1.05	0.95
14	1	6.2	1.6	0.0	1.042	-16.13	33	1.05	0.95
15	1	8.2	2.5	0.0	1.038	-16.22	33	1.05	0.95
16	1	3.5	1.8	0.0	1.045	-15.83	33	1.05	0.95
17	1	9	5.8	0.0	1.040	-16.14	33	1.05	0.95
18	1	3.2	0.9	0.0	1.028	-16.82	33	1.05	0.95
19	1	9.5	3.4	0.0	1.026	-17.00	33	1.05	0.95
20	1	2.2	0.7	0.0	1.020	-16.80	33	1.05	0.95
21	1	17.5	11.2	0.0	1.033	-16.42	33	1.05	0.95
22	1	0.0	0.0	0.0	1.033	-16.41	33	1.05	22
23	1	3.2	1.6	0.0	1.027	-16.61	33	1.05	23
24	1	8.7	6.7	0.043	1.021	-16.78	33	1.05	24
25	1	0.0	0.0	0.0	1.017	-16.35	33	1.05	25
26	1	3.5	2.3	0.0	1.000	-16.77	33	1.05	26
27	1	0.0	0.0	0.0	1.023	-15.82	33	1.05	27
28	1	0.0	0.0	0.0	1.007	-11.97	132	1.05	28
29	1	2.4	0.9	0.0	1.003	-17.06	33	1.05	29
30	1	10.6	1.9	0.0	0.992	-17.94	33	1.05	30

9.2. EK 2: IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN GENERATÖR VERİLERİ

Tablo 9.2. IEEE-30 baralı güç sisteminin generatör verileri.

N	PG	QG	Qmax	Qmin	VG	Mbase	Pmax	Pmin
1	250	0	999	-999	1.04	100	250	10
2	545	0	999	-999	1.035	100	300	10
5	650	0	999	-999	1.012	100	270	10
8	632	0	999	-999	1.02	100	250	10
11	505.2	0	999	-999	1.011	100	300	10
13	700	0	999	-999	1.05	100	270	10

9.3. EK 3: IEEE-30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN HAT VERİLERİ

Tablo 9.3. IEEE-30 baralı güç sisteminin hat verileri.

F_Bus	T_Bus	R	X	BT	Tap	δ
1	2	0.0192	0.0575	0.0528	0.0	0.0
1	3	0.0452	0.1652	0.0408	0.0	0.0
2	4	0.0570	0.01737	0.0368	0.0	0.0
3	4	0.0132	0.0379	0.0084	0.0	0.0
2	5	0.0472	0.1983	0.0418	0.0	0.0
2	6	0.0581	0.1763	0.0374	0.0	0.0
4	6	0.0119	0.0414	0.0090	0.0	0.0
5	7	0.0460	0.1160	0.0204	0.0	0.0
6	7	0.0267	0.0820	0.0170	0.0	0.0
6	8	0.0120	0.0420	0.0090	0.0	0.0
6	9	0.0	0.2080	0.0	0.978	0.0
6	10	0.0	0.5560	0.0	0.969	0.0
9	11	0.0	0.2080	0.0	0.0	0.0
9	10	0.0	0.1100	0.0	0.0	0.0
4	12	0.0	0.2560	0.0	0.932	0.0
12	13	0.0	0.1400	0.0	0.0	0.0
12	14	0.1231	0.2559	0.0	0.0	0.0
12	15	0.0662	0.1304	0.0	0.0	0.0
12	16	0.0945	0.1987	0.0	0.0	0.0
14	15	0.2210	0.1997	0.0	0.0	0.0
16	17	0.524	0.1923	0.0	0.0	0.0
15	18	0.1073	0.2185	0.0	0.0	0.0
18	19	0.0639	0.1292	0.0	0.0	0.0
19	20	0.0340	0.0680	0.0	0.0	0.0
10	20	0.0936	0.2090	0.0	0.0	0.0
10	17	0.0324	0.0845	0.0	0.0	0.0
10	21	0.0348	0.0749	0.0	0.0	0.0
10	22	0.0727	0.1499	0.0	0.0	0.0
21	22	0.0116	0.0236	0.0	0.0	0.0
15	23	0.1000	0.2020	0.0	0.0	0.0
22	24	0.1150	0.1790	0.0	0.0	0.0
23	24	0.1320	0.2700	0.0	0.0	0.0
24	25	0.1885	0.3292	0.0	0.0	0.0
25	26	0.2544	0.3800	0.0	0.0	0.0
25	27	0.1093	0.2087	0.0	0.0	0.0
28	27	0.0	0.3960	0.0	0.968	0.0
27	29	0.2198	0.4153	0.0	0.0	0.0
27	30	0.3202	0.6027	0.0	0.0	0.0
29	30	0.2399	0.4533	0.0	0.0	0.0
8	28	0.0636	0.2000	0.0428	0.0	0.0

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin BAKIR
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.07.1991- SAKARYA
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : hsynbakr@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2018
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Bingöl Erdem Lisesi	2009