

**FACTS CİHAZLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİNİN
SEZGİSEL ALGORİTMALARLA
OPTİMİZASYONU**

VOLKAN YAMAÇLI

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
HAZİRAN – 2014**

**FACTS CİHAZLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİNİN
SEZGİSEL ALGORİTMALARLA
OPTİMİZASYONU**

VOLKAN YAMAÇLI

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Kadir ABACI**

**MERSİN
HAZİRAN – 2014**

Volkan YAMAÇLI tarafından Yrd. Doç. Dr. Kadir ABACI danışmanlığında hazırlanan “FACTS Cihazları İçeren Güç Sistemlerinin Sezgisel Algoritmalarla Optimizasyonu” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR

Doç. Dr. Mehmet BAYRAK

Yrd. Doç. Dr. Kadir ABACI

.....
.....
.....

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..03./09./2014 tarih ve ..2014..19...../..533..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN
Enstitü Müdürü

FACTS CİHAZLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİNİN SEZGİSEL ALGORİTMALARLA OPTİMİZASYONU

Volkan YAMAÇLI

ÖZ

Son yıllarda teknolojik gelişmelerle birlikte elektrik enerjisinin tüketiciye en temiz ve kaliteli biçimde ulaştırılması zorunluluk haline gelmiştir. Bunun yanında elektrik ve elektronik cihazların günlük yaşamda önemli bir yer tutması sebebiyle hem bireysel konutlar hem de sanayi tesislerinde elektrik enerjisine olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Dolayısıyla enerjiyi kaliteli ve sorunsuz biçimde üretmenin ve iletmenin yanında ekonomik kaygılar da ortaya çıkmıştır. Bu çalışma hem ekonomik hem de gerilim kararlılığı ve kalitesi ile ilgili kaygıları göz önüne alarak güç sistemlerinde üretim maliyetinin ve gerilim kalitesinin iyileştirilmesi konusunda yapılan optimizasyon çalışmalarının sonuçlarını sunmaktadır. Optimizasyon çalışması, maliyet odaklı olmak üzere, klasik bir güç akışı metodunun sezgisel algoritmalarla entegre edilerek sistemdeki gerekli bara gerilimlerini de iyileştirecek biçimde yapılmıştır. Sonuçlar incelenirse kullanılan üç optimizasyon algoritmasının birbirlerinden farklı çözüm uzayları ve sonuçlar verdikleri fakat üçünün de maliyeti tatmin edici biçimde iyileştirdikleri görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Güç Sistemi, Güç Akışı, Optimizasyon, FACTS Cihazları, Sezgisel Algoritmalar

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kadir ABACI, Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalı

OPTIMIZATION OF THE POWER SYSTEMS INCLUDING FACTS DEVICES BY USING HEURISTIC ALGORITHMS

Volkan YAMAÇLI

ABSTRACT

In recent years, it has become obligation for electrical energy to be delivered to the consumers as clean and high quality along with the technological developments. As well as, due to the importance of the role of electrical and electronic equipments in daily life, the demand to the electrical energy has been increased day by day. Hence, in addition to the concerns of generating and transmitting the electrical energy with high quality, the economical concerns have also risen. This work presents the results of optimizing the generation cost by considering these concerns of the economy and energy quality. The optimization process used in this work is focused on the economical side of the power system problem with also improving the the voltage quality of the buses needed. It is seen by the results that the three optimization algorithm used in this work converge to different solution spaces and results but optimize the system in satisfactorily manner.

Key Words: Power System, Power Flow, Optimization, FACTS Devices, Heuristic Algorithms

Adviser: Asst. Prof. Dr. Kadir ABACI, Mersin University, Electric-Electronics Department

TEŞEKKÜR

“FACTS Cihazları İçeren Güç Sistemlerinin Sezgisel Algoritmalarla Optimizasyonu” konulu tez çalışmamın seçilmesinde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek veren değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Kadir ABACI'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
EKLER DİZİNİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	6
3.1. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ BİLEŞENLERİ	7
3.1.1. Elektrik Güç Sistemlerinin Yapısı	7
3.1.1.1. Üretim	8
3.1.1.2. İletim	9
3.1.1.3. Dağıtım	10
3.1.2. İletim ve Dağıtım Tesislerinin İncelenmesi	10
3.1.2.1. Dağıtım tesisleri	10
3.1.2.2. Transformatörler	11
3.1.3. Seri ve Şönt Elemanlar	14
3.1.3.1. Seri elemanlar	14
3.1.3.2. Şönt elemanlar	16
3.2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ	19
3.2.1. Generatör Modeli	20
3.2.2. Yük Modeli	20
3.2.3. İletim Hattı Modeli	21
3.2.3.1. Kademe değiştirici transformatör modeli	22
3.2.4. FACTS Teknolojisi	23
3.2.4.1. Statik var kompanzatör (SVC)	23
3.2.4.2. Statik senkron kompanzatör (STATCOM)	25
3.3. GÜÇ AKIŞI	26
3.3.1. Güç Akışının 3 Baralı Örnek Bir Güç Sistemine Uygulanması	30
3.3.2. FACTS Cihazlarının Güç Akışı Denklemine Eklenmesi	31
3.3.2.1. Statik var kompanzatör cihazının güç akışında modellenmesi	32
3.3.2.2. Statik senkron kompanzatör cihazının güç akışında modellenmesi	33

3.4. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ.....	33
3.4.1. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması	34
3.4.2. Optimizasyon Metotlarının Sınıflandırılması	34
3.4.3. Amaç Fonksiyonu	35
3.4.4. Sezgisel Yöntemler	35
3.4.4.1. Yapay arı kolonisi algoritması	36
3.4.4.2. Diferansiyel gelişim algoritması	40
3.4.4.3. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması.....	43
3.5. SEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI	46
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	49
4.1. IEEE 30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN MALİYET OPTİMİZASYONU	49
4.2. SİSTEME KDT CİHAZININ EKLENMESİ	51
4.3. SİSTEME SVC CİHAZININ EKLENMESİ	53
4.4. SİSTEME STATCOM CİHAZININ EKLENMESİ.....	55
4.5. SİSTEME KDT VE SVC CİHAZININ EKLENMESİ	57
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	61
EKLER.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. 3 baralı örnek güç sisteminin başlangıç parametreleri.....	30
Çizelge 3.1. 3 baralı örnek güç sisteminin iterasyona göre parametre değerleri ...	31
Çizelge 4.1. IEEE 30 baralı güç sisteminin generatör maliyet optimizasyon sonuçları	49
Çizelge 4.2. IEEE 30 baralı test sistemine KDT eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları.....	51
Çizelge 4.3. IEEE 30 baralı test sistemine SVC eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları.....	53
Çizelge 4.4. IEEE 30 baralı test sistemine STATCOM eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları.....	55
Çizelge 4.5. IEEE 30 baralı test sistemine KDT ve SVC eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları.....	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Güç sistemi modeli	19
Şekil 3.2. a) Pi eşdeğer modeli b) Matrisel formda gösterimi	21
Şekil 3.3. Kademe değiştirici transformatörün elektriksel eşdeğer devresi	22
Şekil 3.4. Basit bir SVC modeli	24
Şekil 3.5. a) SVC ile kontrol edilen güç sisteminin basit bir şeması b) Endüktif SVC akımı için AC sistemin fazör diyagramı c) SVC'nin sürekli hal gerilim-akım karakteristiği.....	25
Şekil 3.6. Basit bir STATCOM modeli.....	25
Şekil 3.7. 3 baralı örnek güç sistemi modeli	30
Şekil 3.8. Yapay arı kolonisi algoritması akış diyagramı	39
Şekil 3.9. Diferansiyel gelişim algoritması akış diyagramı	42
Şekil 3.10. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması akış diyagramı.....	45
Şekil 3.11. Güç akışının sezgisel algoritmalarla kullanılması	48
Şekil 4.1. IEEE 30 baralı güç sisteminin maliyet optimizasyonu	50
Şekil 4.2. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri	50
Şekil 4.3. IEEE 30 baralı güç sisteminin KDT cihazı ile maliyet optimizasyonu ..	52
Şekil 4.4. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak KDT cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri	52
Şekil 4.5. IEEE 30 baralı güç sisteminin SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu..	54
Şekil 4.6. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri	54
Şekil 4.7. IEEE 30 baralı güç sisteminin STATCOM cihazı ile maliyet optimizasyonu	56
Şekil 4.8. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak STATCOM cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri.....	56
Şekil 4.9. IEEE 30 baralı güç sisteminin KDT ve SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu	58
Şekil 4.10. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak KDT ve SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri.....	58

EKLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Ek-1. IEEE 30 Baralı Güç Sistemi Bilgileri	66

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı	Birimi
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
FACTS	Flexible AC Transmission System	
AC	Alternatif Akım	
YAK	Yapay Arı Kolonisi	
DG	Diferansiyel Gelişim	
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu	
SVC	Statik VAR Kompanzatör	
STATCOM	Statik Kompanzatör	
KDT	Kademe Değiştirici Transformatör	
kV	Kilovolt	
MW	Megawatt	
MVAR	Megavar	
MVA	Megavoltamper	
a	Kademe Değiştirici Transformatör Oranı	
B	Manyetik Alan	Tesla
H	Manyetik Alan Şiddeti	Amper/m
I	Akım	Amper
R	Rezistans	Ohm
X	Reaktans	Ohm
X _c	Şönt/Seri Reaktans	Ohm
X _t	Kademe Değiştiri Transformatör Reaktansı	Ohm
X _s	Görülen Şönt Reaktans	Ohm
L	İndüktör	Henry
C	Kapasitör	Farad

P	Aktif Güç	Megavar
Sembol	Anlamı	Birimi
Q	Reaktif Güç	Megawatt
P_G	Üretilen Aktif Güç	Megavar
Q_G	Üretilen Reaktif Güç	Megawatt
P_L	Çekilen Aktif Güç	Megawatt
Q_L	Çekilen Reaktif Güç	Megavar
V_G	Generatör Barası Gerilimi	Volt
V_L	Yük Barası Gerilimi	Volt
P_D	Aktif Talep Gücü	Megawatt
Q_D	Rekatif Talep Gücü	Megavar
Q_{in}	Enjekte Rekatif Güç	Megavar
δ	Generatör Açısı	Derece
ω	Generatör Açısız Hızı	radyan/sn
M	Eylemsizlik Sabiti	kg/m^2
D_G	Sönümleme Sabiti	kg/m^2
P_M	Mekanik Giriş Gücü	Newton
Y	Bara Admitansı	Siemens
θ	Bara Admitans Bileşeni Açısı	Derece
a_i	Generatör Maliyet Fonksiyonu 0. Dereceden Sabiti	
b_i	Generatör Maliyet Fonksiyonu 1. Dereceden Sabiti	
c_i	Generatör Maliyet Fonksiyonu 2. Dereceden Sabiti	

1. GİRİŞ

Son yıllarda hızla artan teknolojik gelişmelerle birlikte elektrik enerjisine olan talep de artmaktadır. Dolayısıyla günümüz dünyasındaki ekonomik endişeler nedeniyle de elektrik enerjisinin en ekonomik biçimde tüketiciye ulaştırılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Modern bir elektrik güç sistemin temel amacı tüketiciye güvenli ve kaliteli enerjiyi en ekonomik ve kolay biçimde sağlamaktır. Ayrıca endüstrileşmenin artmasının sonucu olan sürekli yük artımı ile birlikte güç sistemleri kararlılık limitine yakın noktalarda çalışmaya zorlandığından kararlılık sınırları azalmaya ve gerilim kararlılığı kritik bir konu olmaya başlamıştır [1]. Böylelikle ortaya çıkan yeni iletim hatları ile üretim mekanizmalarının planlanmasındaki yüksek maliyetlere çevre koşullarındaki zorluklar da eklenince var olan güç sistemlerinin kontrol edilebilirliği ve iletim kapasitelerini artırma gereksinimi de doğmuştur. Bunu sağlayacak çözüm, Hingorani tarafından 1980 yıllarında FACTS cihazları ile önerilmiştir [2-4].

Güç elektroniği teknolojisinin ilerlemesi ile hızla gelişen FACTS cihazları, güç sisteminin daha esnek, güvenli ve ekonomik çalışmasında etkili olmaya başlamıştır. Bu cihazlar güç sistemlerinin durumlarına göre belirlenen sınırlar içerisindeki hızlı ve esnek geçişlerle sistemi kararlı ve optimal düzeyde tutabilmektedirler. Buna karşılık FACTS parametrelerinin de sistem denklemlerine eklenmesi ile kontrol değişkenlerinin artması nedeniyle çözülmesi gereken matematiksel sistemin karmaşık hale gelmesi kaçınılmazdır. Dolayısıyla FACTS cihazları optimal güç akışına dahil edildiğinde çözüm yöntemi olarak klasik yöntemlerden farklı biçimde, rastgele yakınsamalar yapacak, başlangıç koşullarına bağımlı olmayan, lokal değerlere takılmayan, kolayca ıraksayan ve kararlı olan yöntemlerin kullanılması gerekli olacaktır [5-9]. Çok parametrelili güç sistemlerindeki kararlılık problemlerinin yanı sıra ekonomik endişelerin de oraya çıkması kaçınılmazdır. Günümüzde özellikle generatör üretim maliyetinin düşürülmesinin önemi bilinmekte fakat enerji kalitesinin de kabul edilebilir en iyi seviyede tutulması istenmektedir.

Son zamanlarda, güç sistemlerinin hem kararlılık hem de maliyet yönünden iyileştirilmesi için üretim santrallerinin kısıtlama koşulları göz önüne alınarak

elektrik güç sistemlerinin analizi, FACTS cihazlarının yerleştirilmesi ve sistem parametrelerinin en uygun biçimde seçilmesi amacıyla optimal güç akışı incelemeleri ve çözümleri yapılmaktadır.

Optimal güç akışında optimize edilmesi istenilen temel amaç fonksiyonları, üretim birimlerinin generatör yakıt maliyetleri ve gerilimleri, sistemin enerji kayıpları, olası bir hata anındaki durumu ve buna benzer kullanıcı tarafından kontrol edilebilen diğer parametreler içinden seçilebilmektedir. Optimal güç akışı hesaplamalarında kullanılan bazı eşitsizlik ve kısıtlamalar mevcuttur. Bunlar, generatörlerin aktif ve reaktif güç üretimleri üzerindeki kısıtlamalar, generatör ve yük baralarındaki gerilim kısıtlamaları, iletim hatlarının güç akışı sınırları ve FACTS cihazlarının parametreleri üzerindeki kısıtlamalar olarak tanımlanabilir [10-13].

Optimal güç akışı problemi ilk defa 1962 yılında Carpentier tarafından ortaya atılmış ve matematiksel eşitsizliklerin programlama kodlarının oluşturulması uzun bir süre sonra yapılabilmektedir. Genel bir bakış ile optimal güç akışı, üretim birimleri, iletim hatları ve sınır koşullarına bağlı olarak; lineer olmayan, çok boyutlu ve geniş bir nümerik problem olarak tanımlanabilir. Bugüne kadar problemin çözümünde kullanılan matematiksel yöntemlere örnek olarak, kuadratik programlama tekniği [14], indirgenmiş gradyan metodu [15], Newton-Raphson metodu [16], lineer programlama tekniği [17] ve P-Q ayrıştırma tekniği [18] gösterilebilir. Bu çözüm yöntemleri için bazı işlemler ve iterasyonlar sonucunda optimal çözüme ulaşmayı amaçlamaktadırlar. Fakat bu klasik metotlar kullanıcı tarafından belirlenen problemin başlangıç koşullarına duyarlı olmakta ve dolayısıyla sadece kullanıcı tarafından belirlenen başlangıç koşulları çerçevesinde dar sınırlar içindeki optimal noktalara yakınsayabilmektedirler.

Klasik metotların dezavantajları ve bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi sonucunda, son zamanlarda sezgisel yöntemlerin mühendislik alanındaki çok bilinmeyenli sınır değer problemlerine uygulanarak optimal parametrelerin elde edilmesi çalışmalarına başlanmıştır. Sezgisel yöntemlerde klasik yöntemlerden farklı olarak türevsel çözüm metotları yerine rastgele çözüm metotları kullanılmaktadır. Dolayısıyla sezgisel yöntemler lokal optimal değerde takılmayıp verilen sınırlar içerisinde tüm alanları tarayabilmekte ve en iyi uygun yakınsayabilmektedir [19].

Sezgisel algoritmalar, doğada bulunan canlı topluluklarının ortak bir amaç için düzenli biçimde ve iş bölümü ile hareket ederek belirlenen amaca en uygun biçimde ulaşmayı hedefleyen davranışlarını örnek alarak oluşturulan yöntemlerdir. Bu yöntemlere bal arılarının yiyecek arama davranışlarından esinlenerek oluşturulan yapay arı kolonisi [19], hücrelerin bölünmesi ve evrimsel davranışlardan esinlenen diferansiyel gelişim [20] ve canlı sürülerinin yön bulma davranışlarından esinlenerek oluşturulan parçacık sürü optimizasyon [21] yöntemleri örnek olarak gösterilebilir. Bu algoritmalar çözüm kümesini kodlayarak topluluk kümesi içinde amaç fonksiyonuna yönelik arama yaparlar. Bu tip algoritmaların özellikle lineer olmayan çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde güçlü yöntemler oldukları birçok kez gösterilmiştir [22-26].

Bu çalışmada, elektrik güç sisteminin optimal çalışma noktalarının bulunmasında sezgisel algoritmaların yeterlilikleri ve etkileri incelenmiştir. Elektrik güç sistemine FACTS cihazları eklenerek, bu cihazların parametrelerinin de en uygun biçimde elde edilmesi sezgisel algoritmaların optimal güç problemine uygulanması ile sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde kaynak araştırması, üçüncü bölümünde elektrik güç sistemlerinin, optimal güç akışının modellenmesi ve sezgisel algoritmalar, dördüncü bölümde sezgisel algoritmalar kullanılarak elde edilen bulgular ve son bölümde de sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Güç sistemlerinin analizi, FACTS cihazlarının güç sistemlerine entegrasyonu ve maliyet optimizasyonu literatürde birçok çalışmaya konu olmuştur. Güç akışı 1960'lı yıllarda ortaya atılmış ve birçok iteratif çözüm metodu geliştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda güç elektroniğindeki gelişmelere paralel olarak FACTS cihazları güç sistemlerine eklenmiş ve yakın zamanda da çeşitli sezgisel optimizasyon metotları kullanılarak güç sistemi parametreleri optimize edilmiştir.

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımının ne şekilde yapılması gerektiği, bu konuda ilk çalışmalardan olan, 1915 yılında Amerikan Elektrik Mühendisleri toplantısında Robert Philip tarafından sunulan bir makalede ele alınmıştır [27].

Güç akışının matematiksel bir eşitsizlik haline getirilerek iteratif yöntemlerle bilgisayarlar yoluyla çözülmesi konusu McGillis tarafından ortaya atılmıştır [28].

Günümüzde bilinen ve halen kullanılan güç akışı denklemlerinin çeşitli iteratif yöntemlerle çözülebileceği Ness tarafından matematiksel olarak örneklendirilmiş ve literatürde kabul görmüştür [29].

1968 yılında, reaktif güç akışı çözümünde Newton-Raphson metodunun güç akışı çözümünde kullanılmış ve akademik bir çalışma olarak yayınlanmıştır [30].

Newton-Raphson metodunun yük akışına uygulanmasının ilk örneklerinden birisi Wasley ve arkadaşları tarafından literatüre kazandırılmıştır [31].

Güç akışı yöntemlerinin tatmin edici sonuçlar vermesi sonrasında optimal güç akışı hedef olarak seçilmiş ve bu konudaki çalışmaların ilk örnekleri Dommel ve Tinney tarafından 1968 yılında verilmiş ve tam anlamıyla bir bilimsel çalışma haline getirilmiştir [12].

Takip eden yıllarda, optimal güç akışına güvenlik sınır koşulları da dahil edilerek daha kararlı ve güvenli bir optimal güç akışı amaçlanmıştır [13].

Optimal güç akışı çalışmaları halen günümüze kadar sürmekte iken, güç elektroniğindeki gelişmeler ile birlikte 1990'lı yıllarda FACTS cihazları literatürde yer almaya başlamış ve ilk adımlar atılmıştır [2].

FACTS cihazlarına olan ilgi arttıkça daha verimli ve kolay biçimde kullanılmaları ve modellenmeleri amacıyla ilk çalışmalar Hignoari tarafından yapılmıştır [4].

FACTS cihazlarının gerilim kararlılığına etkisi ve kaotik analizleri incelenmiştir [32,33].

1990'lı yıllarda FACTS cihazlarını içeren güç sistemlerindeki güç akışı ve kontrolü ile ilgili örnek çalışmalar yapılmıştır [5,6].

Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesini takiben yüksek işlem gücü gerektiren çeşitli optimizasyon metotları önerilmeye başlanmıştır [18].

Bu çalışmaları FACTS cihazları içeren güç sistemlerinin optimizasyonu ile ilgili çalışmalar takip etmiştir [7,8].

İlk zamanlar kullanılan bu çalışmalar genellikle nümerik metotlara dayanan iteratif yöntemlerdir [14-17].

Bunun yanında son yıllarda doğa-temelli sezgisel algoritmalara olan ilgi artmıştır ve literatüre birçok yeni yöntem kazandırılmıştır [34].

Sezgisel algoritmalara olan ilginin artmasıyla birlikte diğer birçok matematiksel modelleme imkanı olan sistemlerde olduğu gibi, iteratif güç akışı yöntemlerinin sezgisel algoritmalarla entegre biçime kullanılması ile birlikte güç sistemlerinin optimizasyonunda da sezgisel algoritmalar kullanılmaya başlanmıştır [35-40].

Bu çalışmaları, güç iletim sistemlerinde gerilim kalitesi ve kararlılığı problemlerinin de iyileştirilmesi amacıyla FACTS cihazları içeren güç sistemlerinin optimizasyonunu ile ilgili çalışmalar takip etmiştir [41].

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Elektrik enerjisinin kolay kullanılabilir ve diğer enerji biçimlerine dönüştürülebilir olması sayesinde, üzerindeki talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla, hem doğayı mümkün olduğunca kirletmeyecek hem de insanların yaşam koşullarını kısıtlamayacak şekilde hidrolik santraller, fosil yakıtlar ile çalışan termik santraller ile birlikte son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarını elektrik enerjisine dönüştüren rüzgar, güneş enerjisi ve dalga enerjisi santralleri gibi elektrik üretim tesisleri kurulmaktadır. Dolayısıyla üretim tesislerinin hammaddeye en kolay biçimde ulaşılacak ve doğal koşullara en uygun olacak biçimde genellikle nüfus yoğunluğunun az olduğu bölgelerde kurulması nedeniyle üretilen enerjinin, tüketici nüfusun mevcut bulunduğu yerlere ulaştırılabilmesi için iletim hatları kurulmakta ve enerji iletiminin en kaliteli, güvenli ve ekonomik biçimde gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu aşamada, enerji kalitesi ve üretim maliyetinin en uygun değerde işlenebilmesi için enerji üretim sistemlerindeki kontrol edilebilir parametrelerin optimize edilebilmesi dolayısıyla sistemin matematiksel modellemesinin yapılması amaçlanmaktadır. Sistemin modellemesinin yapılabilmesi için genel çerçevede bir bütün halinde tanımlanması gerekmektedir.

3.1. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ BİLEŞENLERİ

Günümüzde enerji, nüfusun ve sanayileşmenin paralel biçimde artması ile, çok büyük miktarda endüstri, tarım, ulaşım, haberleşme ve bireysel tüketiciler gibi birçok kesim tarafından tüketilmektedir. Bir yıl içerisinde talep edilen ve kullanılan toplam enerji yıllık enerji talebi olarak isimlendirilir ve petrol, kömür, doğal gaz ve uranyum gibi birincil enerji kaynaklarından faydalanılır. Bu tür enerji kaynakları fosil enerji kaynakları olarak nitelendirilir ve ülkemizin yıllık elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık olarak %70'ini oluşturmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde bu tür yakıtların kullanılmasının yanı sıra yenilenebilir enerji kaynakları olarak ta isimlendirilen su, biogaz, güneş, rüzgar, jeotermal ve dalga enerjileri de son yıllarda hem akademik çalışmalara konu olmuş hem de birçok yabancı ülkede kullanılmaya başlanmıştır.

Büyük miktarlarda elektrik enerjisi kolay ve elverişli bir şekilde depo edilemez. Bu nedenle herhangi bir anda enerji talebi generatör tarafından üretilen elektrik enerjisi ile karşılanmaktadır. Bir başka deyişle generatör üretim miktarı tüketici talebine uymak zorundadır. Bununla birlikte güç sistemleri önceden bilinmeyen ve çok hızlı bir şekilde ortaya çıkan yük değişimlerine karşı güvenli bir şekilde ayak uydurmak zorundadır. Bir güç sisteminin güvenilirliği olarak da adlandırılan bu özelliği, tüketicilere sunulan en önemli avantajlardan birisidir. Yük değişimleri esnasında gerilimde meydana gelen değişimler tüketiciye sunulan enerjinin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. O halde burada kaynak tarafından sağlanan elektrik enerjisinin iyi kalitede olması için;

- Regüleli ve belirli gerilim düzeylerinde az flukslu olması,
- Regüleli ve belirli frekans düzeylerinde az flukslu olması,
- Düşük harmonik içermesi gerekmektedir.

Enerji kalitesi tüketici için ne kadar vazgeçilemez bir konumda ise, üretim maliyeti konusu da hem üretici hem tüketici açısından vazgeçilemez bir konumdadır. Günümüzde, kabul edilebilir sınırlar içerisinde, enerji kalitesi ve üretim maliyeti birlikte optimize edilebilmektedir. Optimal enerji yukarıda belirtilen kalite kriterlerine ek olarak düşük üretim maliyeti ve hat kayıplarını içermelidir.

3.1.1. Elektrik Güç Sistemlerinin Yapısı

Bir elektrik enerji sistemleri üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç temel birimden oluşmaktadır. Enerji sağlayıcı üretim şirketleri kendi servis sağladıkları bölgelerde üretim, iletim ve dağıtımdan sorumludurlar.

Güç sistemlerinin farklı kısımları farklı gerilim seviyelerinde çalışır. Genellikle gerilim değeri 1 kV'un altında ise alçak gerilim, 1 ile 100 kV arasında ise orta gerilim, 100 ile 300 kV arasında ise yüksek gerilim ve 300 kV'un üzerinde olanlar ise çok yüksek gerilim olarak nitelendirilirler.

3.1.1.1. Üretim

Elektrik enerjisi bir motorun veya genellikle bir türbinin çıkış şaftından çıkan enerjinin dönüşümü ile üretilir. Çoğu güç sistemleri mekanik enerjiyi ya ısı ya da direkt olarak sudan elde ederler. Ana temel enerji kaynakları olarak kömür, doğal gaz, nükleer ve fuel oil kullanılır. Elektrik üretiminde rüzgar, biogaz, jeotermal enerji kaynakları kullanımında da son yıllarda bir hayli artış vardır.

Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü çoğunlukla senkron generatörler vasıtasıyla, rüzgar enerjisi üretiminde ise bir indüksiyon generatör tarafından gerçekleştirilir. Senkron generatörler tarafından 10 ile 20 kV arasında olan gerilim seviyesinde üretilerek güç sistemine aktarılan elektrik enerjisi yükseltici transformatörler vasıtasıyla gerilimi yükselttilerek iletim hattına gönderilir.

Elektrik enerjisi senkron generatörler tarafından üretilir. Genellikle senkron generatör bir türbin veya bir dizel motor tarafından tahrik edilir. Türbin ya hız kontrolunu sağlayan veya ayarlanan değerlerde güç-frekans karakteristiğine göre çıkış gücü veren bir teçhizattan oluşur.

Senkron generatörler buhar veya gaz türbinleri tarafından tahrik edilen yüksek hızlı generatörler, ve su türbinleri tarafından tahrik edilen düşük hızlı generatörler olarak sınıflandırılabilir. Yüksek hızlı generatörler merkezkaç kuvvetini azaltmak için çapı küçük fakat aksiyal uzunluğu fazladır. Tipik olarak 2 veya 4 kutuplu 50 Hz'lik bir şebekede 1500 ile 3000 devir/dakika'da çalışırlar. Düşük hızlı generatörler 500 devir/dakika ve daha düşük hızlara sahiptirler. Bunların kutup sayıları fazla, çapları geniş ve aksiyal uzunlukları kısadır. Gerçek manyetik kutup sayısı nominal frekans ve hıza bağlıdır.

Tüm generatörler stator ve rotor olmak üzere iki ana manyetik devreden oluşurlar. Bunlar dökme çelikten imal edilirler. Endüvi sargıları yük akımını taşırlar ve üç fazlı sargılardan oluşur. Rotor yüksek hızlıdır ve içerisinde uyartım sargıları mevcuttur. Düşük hızlı generatörler için uyartım sargıları çıkık kutuplu rotorlarda bulunur. Rotor da kısa devrelerde rotordaki mekanik zorlanmaları önleyici damper veya amortisör sargıları mevcuttur. Yüksek hızlı, çıkık kutuplu olmayan generatörlerde damper sargıları genellikle uyartım sargıları ile aynı yarık içerisinde

bulunur. Düşük hızlı generatörlerde ise yatay olarak kutup yüzeyine aksiyal yarıklarda bulunur.

Rotor uyarım sargıları rotorda manyetik flukslar üretmek için doğru akım gönderir. Oluşan bu döner manyetik alan üç fazlı statorun her fazında bir emk üretir ve güç sistemine bir ac akım taşır. AC endüvi akımları birleşerek manyetik devrede bir endüvi reaksiyonu yaparlar. Uyarım ve endüvi reaksiyonu fluksları rotora göre sabit, statora göre ise dönen bir alan meydana getirirler. Manyetik alan tek parça masif preslenmiş çelikten yapılan rotorda sabittir.

Eğer bazı nedenlerden dolayı rotor hızı senkronizmadan ayrılırsa alan sabit kalmayacak ve damper sargılarından akım akacaktır. Lenz kanununa göre bu akımlar sayesinde yeniden senkron hıza ulaşacaklardır.

Yeni güç istasyonlarında anma güçleri artan generatörler kullanılmaya başlanmıştır. Bunların çalışma maliyeti düşük güçleri yüksektir. Bu ekonomiklik sonucunda daha düşük maliyetli küçük binalar ve güç istasyonları ile daha küçük ekipmanlar kullanılmaktadır. Üstelik bazı ülkelerde son yıllarda doğal gaz çevrimli santrallerin kullanımı artmıştır. Burada hava soğutmalı generatörler tipik olarak 250 MW'tan başlayarak şirketler tarafından kullanılmaktadır. Modern senkron generatörler yaklaşık 100 MW'tan 1300 MW'a ve çalışma gerilimleri 10 kV ile 32 kV arasındadır.

Genel olarak bir senkron generatör iletim hattına yükseltici bir transformatör ile bağlıdır. Küçük güçlü generatörler kablolar, daha büyük olanları ise baralar ile bağlanır. Generatör transformatörleri genellikle tank tipidir. Transformatörden istasyon baralarına güç yüksek gerilim kabloları veya kısa bir güç taşıma hattı tarafından beslenir [1].

3.1.1.2. İletim

Elektrik enerjisinin en önemli avantajı birincil enerji kaynakları veya su rezervlerinin yanında üretilmesi ve daha sonra uzak mesafelerdeki yük merkezlerine iletebilmesidir. İletim hattında kayıp enerji akımın karesi ile orantılı olduğu için gerilimin yükseltilmesi gerekir. Elektrik şebekesi tüm güç istasyonlarının yük

merkezlerine bir iletim-dağıtım hatları bağlantılarından oluşmaktadır. Genellikle iletim şebekesi generatörden tüketicilere elektrik enerjisini bir çok mümkün olan bağlantılarla güvenilir ve esnek bir biçimde gönderecek şekilde bağlanır.

Elektrik enerjisi üretimin yük merkezlerine yakın olduğu yerlerde direkt olarak bir alt dağıtım şebekesine bağlanarak iletilebilir. Bir güç sistemine yeni ilaveler yapılacağı zaman eski hatlar daha düşük gerilim seviyelerine bağlanır ve bu hatlar alt iletim şebekesinin bir parçası olabilir.

3.1.1.3. Dağıtım

Elektrik enerjisinin çoğu direk olarak tüketiciye orta ve yüksek gerilim şebekeleri vasıtasıyla iletim veya alt iletim hatlarından transfer edilir. Dağıtım şebekeleri genellikle taşıma sistemlerinde kullanılan birleşik yapıya uyması için radyal bir yapıda bağlanırlar. Bazı endüstriyel tüketiciler kendi enerji gereksinimlerini kendileri karşılayabilirler.

Tipik olarak generatör terminalinden çıkan elektrik enerjisinin yaklaşık %8'i iletim ve dağıtımda kaybolmaktadır.

3.1.2. İletim ve Dağıtım Tesislerinin İncelenmesi

Dağıtım tesisleri şebekeleri genellikle 69 kV, 115 kV ve 138 kV gerilimde çalışırlar. Büyük endüstriyel tüketiciler sık sık dağıtım tesislerine direkt olarak bağlanırlar. Bazı sistemlerde, alt-iletim şebekesi ana dağıtım istasyonları ile içiçe olabildiği gibi bu istasyonlar daha geride de olabilir. Güç, büyük güçlü servis istasyonlarından dağıtım şebekelerine gönderilir. İlk gerilim genel olarak 115 kV, 138 kV veya 230 kV'tur. Çıkış gerilimi 4-35 kV arasındadır. 12 kV ve daha üzeri gerilimler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [32].

3.1.2.1. Dağıtım Tesisleri

Bir dağıtım tesisi iletim hatları, transformatörler, generatör üniteleri, kontrol ekipmanlarının birlikte birbirine bağlı olarak bulunduğu bir noktadır. Genellikle elektriksel gücün akımı burada kontrol edilir, gerilim seviyeleri ayarlanır ve sistem güvenilirliği çeşitli otomatik koruma aygıtları tarafından burada ayarlanır.

Dağıtım tesislerinin tümü birçok sayıda gelen ve giden akımların birleşme yeridir. Bu akımlar bir baraya gelir ve herhangi bir darbeye karşı korunmak amacıyla bazı aygıtlar kullanılır. Her elektrik devresi birincil ve ikincil devreye bölünebilir. Birincil devre iletim hattını, güç transformatörünü, baraları, akım ve gerilim transformatörlerinin yüksek taraflarını içerir. İkincil devre ise akım ve gerilim trafolarının düşük taraflarını, devre kesicilerini, izolatörleri ve devre koruma aygıtlarını içerir.

Bara hatlar ve transformatörler için elektrik kontaklama noktasıdır. Baralar alüminyum veya bakır iletkenlerden oluşur ve izolatörler tarafından desteklenir. Dağıtım tesislerinin dışındaki baralar genellikle çelik ve alüminyumdan yapılır. Bir çok farklı sayıda baralar düzenlenir. Bu bağlantılar yapılırken sistemin güvenilirliği ve çalışma noktasının esnekliği giderilmemelidir. Bara sistemlerinin türleri güç sistemlerinde önemli bir rol oynar.

Daha büyük dağıtım tesisleri içerisine bara sistemlerini dahil ederek çok yüksek yatırımlar sonucu büyük tesisler inşa edilir.

3.1.2.2. Transformatörler

Transformatörler, farklı gerilim seviyelerinde çalışmakta olan güç sistemlerinin, farklı kısımlarını bağlamak için gereklidir. Gerilim seviyelerini değiştirmek için kullanılan transformatörler ayrıca dönüştürme oranları ve kademe değişimleri nedeniyle gerilim kontrol işlerinde kullanılır [1]. Büyük güçlü servis transformatörleri kademe değiştiricilere sahip olabilir. Bazılarında ise ikincil tarafta seri bir gerilim regülatörü de bulunabilir [32].

- Güç sistemi transformatörleri fonksiyonlarına göre genel olarak 3 kategoride incelenebilir.
- Generatör çıkışını arttırıcı transformatör (iletim şebekesi ve generatörle irtibatlı)
- İletim transformatörleri: İletim hattının farklı noktalarında ve genellikle farklı gerilim seviyelerinde kullanılır.
- Dağıtım Transformatörleri: Tüketiciler tarafından istenen düşük gerilimlerin elde edebileceği yük merkezlerindeki trafolar.

Generatör ve iletim transformatörleri yağ soğutmalı olup 1000 MVA'dan daha fazla güçtedirler. Tank içerisindeki yağ hem soğutma hem de izolasyon vazifesi görür. Isı omik ve bakır kayıplarına sebep olur. Yağ dış radyatörlerin arasından geçirilir. Yağın sirkülasyonu transformatör içerisinde ya doğal yollarla ya da dış etkiler vasıtasıyla yapılır. Yüksek güçlü transformatörler taşıma problemleri nedeniyle genellikle parçalı bir şekilde dizayn edilirler. Daha küçük güç transformatörleri genellikle birleştirilmiş bütün halinde tasarlanır.

Generatör transformatörleri generatör çıkışındaki gerilimi arttırarak iletim hattına veya alt iletim hatlarına verirler. Bir güç istasyonunda 200-500 MW güçlerinde büyük generatörler ve her bir generatörün kendileriyle bağlantılı iki sargılı transformatörleri olabilir. Bu generatörlerin aksine daha küçük bir güç istasyonunda 3 sargılı 3 fazlı transformatörlerle irtibatlı generatörler çalıştırılabilir.

Generatör transformatörleri genellikle üçgen-yıldız bağlı ve nötr noktası toprakla irtibatlıdır. Üçgen düşük gerilim sargısı asimetrik yüklenme ve transformatör sargısının lineer olmayan B-H eğrisi karakteristiğinden dolayı meydana gelecek arzu edilmeyen harmonik akımları azaltmak ve yok edecek şekilde tasarlanır. Büyük güç istasyonlarında birçok generatör üniteleri ile birlikte bazı nötralize trafoları iletim hattında meydana gelen tek faz kısa devre akımlarını sınırlamak için toprakla irtibatlandırılmaz.

İletim transformatörleri farklı gerilim seviyelerinde farklı çalışma noktalarında kullanılabilirdiği gibi dağıtım şebekelerine veya büyük endüstriyel tesislere enerji taşıyan iletim hattına direkt olarak ta irtibatlıdır. Transformatör sargıları yıldız bağlı olup iletim ve alt iletim hatlarına doğrudan bağlıdır ve normal olarak nötr noktası topraklanmıştır. Bu transformatörler sık sık asimetrik yüklendikleri zaman geçecek sirkülasyon akımlarına karşı üçgen tertipli de bağlanmaktadır. Bu ilave sargı bir istasyon içerisindeki mahalli yüklere veya bir reaktif güç kompanzatörüne kaynak sağlayabilir.

Eğer iki sargılı transformatörün çevirme oranı çok yüksek değilse bunun yerine bir sargılı oto transformatörü kullanılabilir. Oto trafosunda birincil sargının parçası w_1 ve ikincil sargının parçası w_2 ortak kullanılarak ekonomiklik sağlar. Oto

transformatörleri genellikle düzenli gerilim seviyelerinde İngiltere’de 132/275 kV, 275/400 Amerika’da 138/230 kV, 230/345 kV, 345/500 kV ve Avrupa’da ise 110/220 kV, 220/400 kV olarak kullanılır.

Dağıtım şebekeleri normal olarak yüksek gerilim tarafı yıldız ve orta gerilim tarafı üçgen sargılı olan ve simetrik olmayan yükleri azaltmaya yardım eden transformatörler tarafından desteklenir [1].

Gerilim kararlılığı için transformatör empedansları çok önemlidir. Büyük güçlü servis transformatörlerinin empedansları (kaçak reaktansları) transformatör bazında yaklaşık %8 ile %11 arasında değişir. Dağıtım transformatörlerinin ise %2 ile %4 arasında değişmektedir. Transformatörler özellikle büyük güçlü servis transformatörleri dağıtım sistemi empedansının büyük bir kısmına sahiptir.

Birçok dağıtım transformatörleri doyma noktasında çalışır. Uyarım akımı gerilim azalması esnasında düşer. Gerilimde %1’lik bir azalma reaktif güçte %3-6 arası bir düşmeye neden olur [32].

Kademe değiştirici ve düzenleyici transformatörler

Bir çok modern güç sistemlerinde çeşitli seviyelerde gerilim değerleri vardır. Örneğin bir sistemin ana taşıma hattı 220 kV’tan 735 kV’ a kadar değişik gerilim seviyelerinde iken, ikinci bir taşıma hattı 60 kV’tan 150 kV’a kadar olan bir değerde gerilime sahip olabilir. Herhangi bir transformatörün ana görevi şebekeyi farklı gerilim seviyelerinde bağlamaktır. Güç sisteminden çekilen yüklerde sık sık değişimler arzu edilmeyen gerilim değişimlerine neden olur . Bu problemi çözmek için kademe değiştiricilerden faydalanılır. Yaygın olarak güç sistemlerinde çeşitli gerilim seviyelerinde güç akışını kesmeksizin ekipmanların bağlantısı bu aygıtlar tarafından sağlanır. Genel olarak gerilimdeki değişim oranı $\pm\%10$ seviyelerindedir. Bir sistemde kademe değiştiriciler;

- Dağıtım sistemini beslemek,
- Alt iletim şebekelerine bağlantı yapmak
- Farklı gerilim seviyelerine bağlantı yapmak
- Generatör çıkışını arttırmak gibi çeşitli görevlere sahiptirler.

Kademe değiştiriciler hem yük altında hem de yüksüz çalışabilecek şekilde üretilirler. Yüksüz çalışma yapanlarda kademe değiştirme işlemi yapılırken enerji yoktur. Yük altında kademe değiştiricilerde ise transformatör enerjili iken çalışma yapılabilir. Kademe değiştiriciler otomatik veya rölelerden gelecek sinyallere göre çalışma yaparlar. Kademe değiştiricinin bir günde çalışma sayısının az olması kademe değiştiricinin daha uzun ömürlü olmasını sağlar [38].

Trafo kademeleri ana sargının bulunduğu tankta veya bir başka tankta bulunabilir. Aynı tankta bulunduğu zaman, kademe değiştiriciler genellikle trafonun yüksek gerilim tarafında (daha düşük akım olduğu için) ve nötr noktasına yakındır. Oto transformatörlerde kademeler yüksek gerilim tarafında fakat sargının ortak kısmına yakındır.

Kademeler ayrı bir tankta kullanıldığı zaman sargı ana transformatörün bir tersiyer sargısı gibi yapılır. Gerilim seri bir transformatör eklenerek tersier sargıdan enjekte edilebilir. Bir başka çözüm ayrı bir uyarım transformatörü kullanarak olur.

3.1.3. Seri ve Şönt Elemanlar

İletim şebekelerinde şönt ve seri elemanlar olarak seri kapasitör veya şönt kompanzatörler bir nevi amaçlar için kullanılırlar. Genellikle gerilimi nominal değere yakın tutmak, hat akımını azaltarak şebeke kayıplarını azaltmak ve böylece kararlılığa katkıda bulunmak bu amaçlardan bazılarıdır. Çoğu kompanzasyon, kapasitörler tarafından sağlanır ve indüktif yükü dengeler. Bir nevi reaktif gücü absorbe eder. Burada iletim hatlarında kullanılmakta olan ve baralara seri veya paralel biçimde bağlanarak yapılan kompanzasyonun gerilim kararlılığı açısından etkileri anlatılacaktır [38].

3.1.3.1. Seri Elemanlar

Seri kompanzasyon tam olarak, uzak mesafelere taşınan gücün iletilmesini sağlayan iletim hattının empedansını azaltmak için yapılır. Gerilimin azalmasını sınırlamak, aktif ve reaktif güç kayıplarını azaltmak amacıyla gerilim kararlılığını geliştirmek yönünde eğilimlere sahiptir. Tipik olarak bir taşıma hattının indüktif reaktansı %25 ile %70 arasında kompanse edilir. %100 kompanzasyon asla istenmez. Üstelik aşırı kompanzasyon koruma aygıtlarının karmaşıklığını artırır.

Normal olarak seri kapasitörler ya hat başında ya da hattın ortasında yer alır. Hat başlarında bulduklarında hata akımlarının az ve korumanın daha kolay olmasına rağmen kapasitörler hattın ortasında bulunurlar. Bu nedenle kontrol ve bakım gereklidir. Eğer terminalde bulunurlarsa bu işlemler daha kolaydır. Bu nedenle kapasitör bankları hattın maksimum %30'nu kompanze edebilecek seviyelerde hat başı ve sonunda eşit olarak kullanılır. Seri kapasitörün yeri hattın ortasında olabildiği gibi hattın 1/3 veya 1/4'lük yerinde de olabilir. Kapasitör banklarının hattın farklı noktalarında bulunmalarına ilişkin detaylı çalışmalar yapılmıştır.

Bazen büyük yüklü güç transferleri esnasında reaktif akım yükselir ve seri kapasitörün olduğu taraftaki gerilim çok büyük artışlar gösterebilir. Bu durumda sistem uygun olan gerilim seviyelerine göre dizayn edilmelidir. Normal olarak bir seri kapasitörün gerilim düşümü hat gerilimi oranının yüzde olarak birkaçıdır. Kapasitörün olduğu tarafta bir kısa devre esnasında geçici olarak hat gerilimine yaklaşık eşit olacak biçimde bir gerilim oluşabilir. Bu durumda sistemi hatadan arındırmak için bir by-pass sistemi oluşturularak yüksek gerilimlerden kaçınılır [1].

Seri kapasitörler kullanılarak yapılan kompanzasyonla uzun iletim hatlarının birleştirilmesi ve geçici hal kararlılığının iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Ancak, günümüzde kısa hatlarda da kullanılmakta ayrıca gerilim kararlılığını iyileştirmektedir.

Seri kompanzasyon hattın net indüktif reaktansını azaltır. Hattın reaktif tüketimi I^2X 'i kompanze etmek için reaktif güç I^2X_c üretir. Seri kapasitör reaktif üretimi, daha çok ihtiyaç hissedildiğinde akımın karesi ile orantılı olarak artar. Bu nedenle kendi kendini düzenleyebilir. Bu özelliği nedeniyle pasif şönt kapasitörlerden ziyade statik var kompanzatör ile kıyaslanabilir. Hafif yüklerde seri kapasitörlerin etkisi azdır. Şönt reaktörlere uzun hatlar için ihtiyaç vardır.

Seri kapasitör grubu kapasitör, metal oksit varistör, by-pass swici kontrol ve koruma cihazları gibi bazı ekipmanlardan oluşur. Burada Miller tarafından tavsiye edilen ve çok uzun hatlarla açı kararlığı arasında yakın bir ilişki içerisinde bulunan bir reaktif kompanzasyonun üzerinde durulacaktır.

Seri kapasitörler bir baraya bağlı bulunmaktan ziyade hemen hemen sürekli iletim hatlarında bulunurlar. Bazen hat terminalinde veya hat boyunca farklı noktalarda bulunabilirler. Çok uzun hatlar hariç genellikle terminalde bulunurlar. Kompanzasyon hattın %75 ile %80'lik bir kısmını kompanze etmeyi planlar. Koruma rölelerinin karakteristikleri nedeniyle bu mesafeler sınırlanmak zorunda kalır.

İki paralel hattın birisinin devre dışı kalması durumunda sistem aşırı yüklenir. Seri kapasitörler tarafından reaktif güç üretilir. Böylece kısa bir zamanda aşırı yüklenmenin önüne geçilebilir. Aşırı yüklenme sınırı standartlar çerçevesinde birkaç dakika içerisinde %150'yi geçmeyecek şekilde müsaade edilir.

3.1.3.2. Şönt Elemanlar

Genellikle uzak mesafelere reaktif güç taşınmadığı için tüketim bölgelerine yakın yerlerde kompanzasyon yapılmalıdır. Bunu başarmanın en basit ve en ucuz yolu bir şönt kompanzasyon sayesinde sağlanabilir. Burada bir kapasitör ve/veya bir indüktör ya direkt olarak baraya ya da bir transformatörün tersier sargısına bağlanabilir. Şönt kapasitör bankları hatlara bağlanmaktan ziyade sürekli baralarda bulunurlar. İletim sistemlerinde şönt kompanzasyon yapımının birinci amacı yakın yük bölgelerinde gerilimin kontrolü ve yükün kararlılığının sağlanması içindir.

Şönt elemanlar iletim hattı boyunca gerilim düşümünü ve kayıpları minimize etmek içinde kullanılır. Genellikle statik şönt elemanlar ya manuel ya da röleler vasıtasıyla otomatik olarak devreye alınır veya çıkartılır. Mekanik anahtarlamalı şönt kapasitör bankları büyük yük bölgelerindeki istasyonlarda tesis edilir. Tristörlerin kullanılmasıyla modern çözümler geliştirilmiştir.

Sistem güç talep ettiği zaman hattın kapasitansı tarafından üretilen reaktif güç hattın endüktansının düşük olması nedeniyle tüketilen güçten düşüktür. Böylece hat net bir reaktif kaynak gibi davranır. Bunun neticesinde şebeke gerilimi yüksek değerlere götürülür. Bu reaktif gücü tüketmek ve gerilimi kontrol altına almak için şönt reaktörler kullanılır. Yükün artması durumunda gerilimi belli sınırlar içerisinde muhafaza etmek için daha fazla şönt kompanzasyonun sisteme ilave edilmesinde fayda vardır. Genellikle 200 km'den uzun hatlar için şönt reaktörlerin kullanılması

tavsiye edilir. Ağır yüklenme durumu esnasında bazı reaktörler devre dışı kalabilirler ve şönt kapasitörler gerilimi arttırarak bir reaktif güç kaynağı olarak davranırlar.

Şönt kompanzasyon bir senkron kompanzator gibi görev görür. Senkron kompanzator aşırı uyarıldığında bir reaktif güç kaynağı gibi davranır ve reaktif güç üretir. Uyarım seviyesinin altında ise reaktif gücü absorbe eder. Senkron kompanzatorler gerilim ve reaktif güç kontrolunda önemli bir rol oynarlar. Değişen yük durumlarında gerilimi arzu edilen sınırlar içerisinde tutarak kararlılığı iyileştirirler. Dağıtım tesislerinde senkron kompanzatorler kullanılacağı zaman çalışma maliyetini azaltmak için şönt kapasitörler veya reaktörler sık sık sisteme anahtarlanarak eklenirler.

Gerilim kararlılığı için, şönt kapasitör bankları çok faydalıdır ve generatörlerin uyumlu bir şekilde yakın güç faktörleri ile çalışmasını sağlarlar. Gerilim değişimi sonrasında şönt kapasitör banklarının reaktif güç çıkışı gerilimin karesi nispetinde düşmektedir. Bu seri kapasitörün kendini doğal olarak düzenlemesi olayına zıttır. SVC ile kıyaslandığında maliyetlerinin düşük olması avantajdır. Anahtarlama süresi oldukça hızlıdır. Akım sınırlayıcı reaktörler geçici hal anahtarlamasını minimize ederler. Gerilimin hızlı bir şekilde kontrolü tam olarak mümkün değildir.

Bir iletim hattının devre dışı kalması durumunda hat yeniden devreye alınana kadar kapasitör bankının enerjisi kesilmelidir. Ayrıca anahtarlama gerilim regülatörü veya kademe değiştiricinin müdahalesinden daha önce olmalıdır. Günümüzde mekanik anahtarlı kapasitörlerin yerine mikro proses kontrollü lojik anahtarlar kullanılmaktadır.

Mekanik anahtarlı kapasitörlerin bir çok dezavantajları vardır. Geçici hal gerilim kararsızlığı için anahtarlama asenkron motorun durmasını engelleyecek kadar hızlı olmayabilir. Eğer bir sistemde gerilim çökmesi olursa sistemin stabil parçaları tehlikeli aşırı gerilimler nedeniyle zarar görebilir. Aşırı gerilim azalması esnasında şönt kapasitörlerin devreye enerji sağlaması sistemi olumsuz etkileyecektir [32].

Statik var kompanzatör (SVC)

Statik var kompanzatörler şönt kapasitör ve reaktörlerin mekanik anahtarlama hareketlerinin yerini alır. Avantajları içerisinde, hızlı olmaları gerilimi kesin olarak ayarlamaları ve de kısıklı anahtarlama zamanı ziyade geniş bir şekilde sınırsız anahtarlama sahasına sahip olmalarıdır. Gerilim bir eğim karakteristiğine göre düzenlenir. Eğim sürekli hal kazancı ile ilgilidir ve genellikle %1 ile %5 arasında bir kontrol değişimine sahiptir.

Güç sistemlerinde SVC uygulamaları ile ilgili yapılan tartışmaların çoğu uzun iletim hatları ve aç kararlılığının geliştirilmesi ile ilgilidir. Uzun hatlar bara gerilimini ayarlayan kompanzatörler tarafından desteklenir.

Motorlara ilişkin geçici hal kararsızlığını önlemek için SVC'ler anahtarlı kapasitörlerden daha etkilidir. Aşırı gerilim, yük artımı ve gerilim azalması esnasında kapasitör bankının enerjilenmesi sonucu oluşur. Gerilimin, gerilim altında muhafaza edilmesi SVC ile mümkündür.

Kapasitif birikimi sağlamak için SVC'ler mekanik anahtarlı şönt kapasitör bankları ve şönt reaktörlerin yakınında düzenlenebilir. Bir reaktif güç veya süseptans regülatöründe sürekli hal çalışmaları esnasında istenilen çıkışı elde etmek için kullanılır. Bir arıza sonrası SVC diğer gerilim regülatör kontrollerinden daha hızlı cevap verecektir. Bir sonraki arızalarda yeniden pozisyon ve koordine olmak yavaş ekipmanlar yüzünden (kademe değiştiriciler, gerilim kontrollü mekanik anahtarlı kapasitör ve reaktörler, generatör uyarım kontrolleri) SVC çıkışı reaktif gücünün, ayarlanan noktaya dönüşünü geciktirir. Reaktif güç regülatörlerinin zaman sabitleri saniyeler veya dakikalar mertebesindedir [33].

SVC eğiminin ayarı özellikle bir reaktif güç regülatörünün yokluğunda diğer gerilim kontrol ekipmanları ile koordineli çalışması için önemlidir. Bir arıza sonrasında büyük bir eğim ayarı SVC cevabını azaltır. Daha büyük bir gerilim düşümüne neden olur. SVC cevabındaki bu azalma şönt kapasitör banklarının açılmasına izin verebilir ve böylece gerilim kontrolü gerçekleştirilebilir. Yük bölgelerinde statik senkron kompanzatör ihtiyacı yerel üretim miktarı ile ilgilidir.

Yük artarsa generatörün reaktif güç birikimi öylesine azalır ki diğer hızlı davranışlı reaktif birikimler arzu edilmeye başlar.

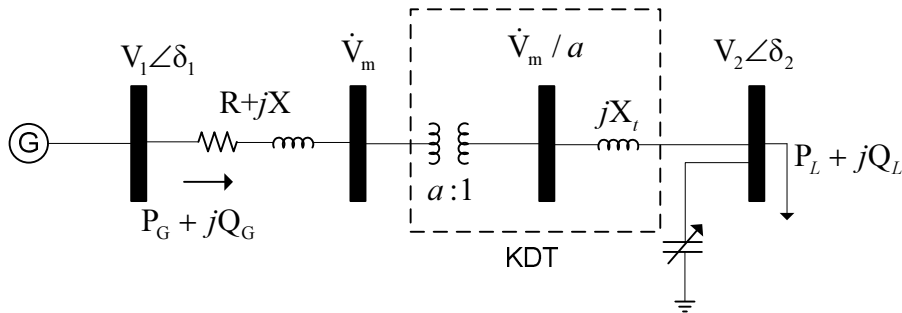
Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

Statik senkron kompanzatörler SVC cihazları gibi reaktif güç üretme ve çekme yeteneğine sahiptirler. Fakat diğer kompanzasyon cihazlarına nispeten hızlı gerilim düşümlerinden daha az etkilenmesi sayesinde daha avantajlıdır. Böyle bir durumda daha hızlı tepki verebilmesinden dolayı yüksek kapasiteli enerji tesisleri ve enerji endüstrisi için yaygın kullanım alanı vardır.

Statcom ortak kuplaj noktasına şönt bağlı bir gerilim kaynağı içeren evirici devresidir. Buradaki amaç statcom gerilimini yük tarafından talep edilen reaktif yükü karşılayacak ve harmonik akımlarının şebekenin sadece aktif akım vereceği şekilde kontrol etmektir. İdeal olarak yükün reaktif ve harmonik akım ihtiyacının DC kapasitör aracılığıyla enjekte akım olarak baraaya aktarılması ile bara gerilimi istenilen seviyeye çekilebilmektedir. Ayrıca statcomun DC kapasitör içermesi sayesinde de çektiği aktif güç çok küçük olması nedeniyle ihmal edilebilecektir.

3.2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

Bir güç sisteminin analizi için matematiksel modelleri generatör, transformatör, baralar, iletim hatları, yükler ve FACTS kontrolörlerinden oluşan sistem bileşenlerini gösteren diferansiyel ve cebrik eşitliklerden oluşur. Sistemin dengeli bir sistem olduğu kabul edilmekte ve sistem modeli tek faz için oluşturulmaktadır. Şekil 3.1’de bu bileşenlerden oluşan bir güç sistemi gösterilmiştir [33].



Şekil 3.1. Güç sistemi modeli

3.2.1. Generatör Modeli

Enerji üretim sistemlerinde yapısı ve kontrolünün uygun olmasından dolayı senkron generatörler kullanılmaktadır. Bir senkron makinanın matematiksel modelleri temel klasik devre eşitlikleri kullanılarak elde edilir. Makinanın mekanik hareket denklemi iki kısmi diferansiyel eşitlik olarak elde edilir. Generatörün mekaniksel dinamiğini ifade eden durum denklemleri salınım eşitliklerinden faydalanılarak aşağıdaki gibi yazılırlar.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_M + P_G + D_G \omega) \quad (3.1)$$

$$\dot{\delta} = \omega \quad (3.2)$$

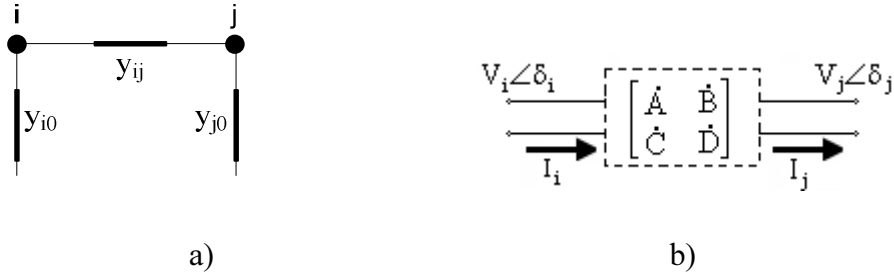
Burada δ generator açısı, ω açısal hız, sırasıyla M ve D_G generator eylemsizlik ve sönümlenme sabitleri, P_G generatörün elektriksel çıkış gücü, P_M generatör için mekanik giriş gücüdür [39].

3.2.2. Yük Modeli

Elektrik güç sistemlerinde yüklerin karakteristikleri çeşitlilik göstermektedir. Yüklerin bu davranışlarından dolayı onlara ait çok sayıda çeşitli model yaklaşımları yazılmıştır. Bunlar statik yük modelleri, sabit empedans, sabit güç, sabit akım ve dinamik yük modelleri olarak iki ana gruba ayrılabilir [40]. Genellikle hem güç sistemleri mühendisleri ve hem de akademik araştırmacılar güç ve gerilim arasındaki ilişkiyi göstermek için sistem kararlılığı ve planlama çalışmalarını statik yük modellerinden yararlanarak yapmaktadırlar. Bu modeller, statik ve zamanla değişmeyen olduğu için, çeşitli çalışma durumlarında yük davranışları başarılı bir şekilde elde edilememektedir. Bazı yayınlarda bu statik yük modellerinin başarısından şüphelenilmekte ve yükün davranış düşüncesinin belirgin olmadığı gözlenmektedir. Üstelik yük davranışı çoğunlukla dinamiktir. Zamanın herhangi bir anında gerilim ve frekans değişimleri başladığında aktif ve reaktif güçlerde de değişim başlamaktadır. Bununla birlikte bare gerilimlerinin zamanla değişmesi dinamik bir olaydır. Bu sebepler yüzünden online optimizasyon tekniklerinde dinamik yük modelleri düşünülmelidir [41].

3.2.3. İletim Hattı Modeli

Üretilen enerjinin tüketiciye aktarılması için kullanılan iletim hattı matematiksel olarak empedans cinsinden modellenmektedir. İletim hatları modellenirken pi eşdeğer devresi kullanılmaktadır. pi eşdeğer modeli hat başı ve hat sonuna bağlı şönt elemanların hatta eklenebilme kolaylığı ve düşüm sayısında değişiklik yapmamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bir iletim hattının pi eşdeğer modeli Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. a) Pi eşdeğer modeli b) Matrisel formda gösterimi

Burada y_{ij} , i ve j baraları arasındaki hattın empedansı; y_{i0} ve y_{j0} ise i ve j baraları arasındaki hattın süseptansıdır. Yük modeli kurulurken, güç akışı hesaplamalarına uygunluğu açısından genellikle sabit güç modeli ele alınmaktadır [10-12]. Bir enerji iletim hattının hat başı gerilimi V_i ve hat başı akımı I_i aşağıdaki gibi matrisel formda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Hat sonu gerilimi V_j , hat sonu akımı I_j hattın genelleştirilmiş devre sabitleri $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$ cinsinden ifade edilir [33]. Genelleştirilmiş devre sabitlerini kartezyen biçimde $\dot{A} = a_1 + ja_2$, $\dot{B} = b_1 + jb_2$, $\dot{C} = c_1 + jc_2$, $\dot{D} = d_1 + jd_2$ şeklinde yazarsak, hat başı gerilimi ve hat sonu akımı için,

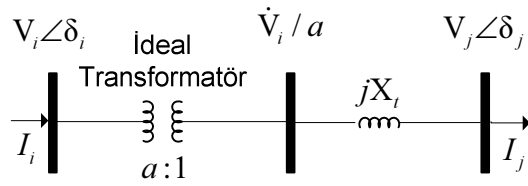
$$V_i = (a_1 + ja_2)V_j + (b_1 + jb_2)I_j \quad (3.4)$$

$$I_j = \frac{P_j - jQ_j}{V_j^*} \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilir.

3.2.3.1. Kademe Değiştirici Transformatör Modeli

Kademe değiştirici transformatörler (KDT) güç akışı çalışmalarında düğüm gerilimlerinin büyüklüğünü ve aktif güç akışını düzenlemek için kullanılırlar. Kademe değiştirici transformatörler Şekil 3.3'de gösterildiği gibi i. ve j. baralar arasına bağlı ideal bir transformatör ve sabit bir kaçak reaktansa (X_t) sahip bir devre elemanı olarak gösterilirler. Güç akışı çalışması yapılırken iki kapılı bir devre olarak modellenip akım ve gerilim bağıntıları elde edilerek orijinal bara admitans matrisinin içerisine katılabilir.



Şekil 3.3. Kademe değiştirici transformatörün elektriksel eşdeğer devresi

Buna göre Şekil 3.3'de verilen sistem için Kirchoff akım yasası uygulanarak giriş akımı;

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{I}_j}{a} = \frac{\dot{V}_i - a\dot{V}_j}{a^2} Y_{KDT} \quad (3.6)$$

Burada $Y_{KDT} = \frac{1}{X_t}$ olup kaçak admitans değeridir. Bu eşitlik kullanılarak iki kapılı sistemin şönt admitans değerleri aşağıdaki gibi elde edilir [33].

$$y_{ij} = \frac{Y_{KDT}}{a} \quad (3.7)$$

$$y_{i0} = Y_{KDT} \left(\frac{1-a}{a^2} \right) \quad (3.8)$$

$$y_{j0} = Y_{KDT} \left(1 - \frac{1}{a} \right) \quad (3.9)$$

Bu tezde güç akışı çalışması yapılırken baralar arasına yerleştirilen KDT'nin admitans değeri bara admitans matrisine katılarak her iterasyon sonunda kademe değiştirme oranı değişerek bara admitans matrisinin modifiye edilmesi suretiyle arzu edilen reaktif güç aktarımının sağlanması ve bu şekilde bara geriliminin istenen değerde tutulması hedeflenmiştir. Bu durumda i. ve j. baralar

arasına bağlanan KDT'li sistemin modifiye edilmiş bara admitans matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$Y_{BARA_{Mod}} = \begin{bmatrix} y_{ii} + y_{i0} + y_{ij} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ii} + y_{j0} + y_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Burada y_{ii} ve y_{jj} i. ve j. düğümlerinin kendi admitans değeridir.

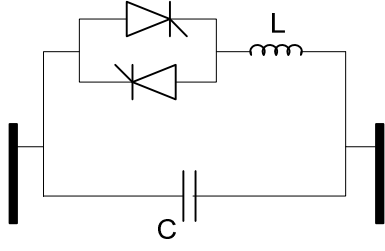
3.2.4. FACTS Teknolojisi

Güç transferlerinin artması ile, güç sistemi ağır şartlar altında daha yüksek kayıplar vererek çalışmaya başlamıştır. Bununla birlikte düzenli olmayan yük akışı ile güvenilir olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu bağlamda FACTS olarak isimlendirilen yeni bir teknoloji güç sistemlerinde yerini almaya başlamıştır. FACTS teknolojisinin ana hedefi sistemi kontrol altında tutarak güç transferinin düzenlenmesini ve ayrıca taşıma kapasitesinin belirli sınırlar dahilinde artırılmasını sağlamaktır. Günümüzün güç sistemleri büyük ve mekanik kontrollüdür. FACTS teknolojisi yüksek güç elektroniğine dayalı çeşitli tristör cihazlarından oluşmuş mikroelektronik, haberleşme ve ileri kontrol uygulamaları içeren bir teknolojidir. FACTS cihazları ile seçilen baradaki gerilimin büyüklüğü ve faz açısı kontrol edilebilir. Güç akışı, kontrol merkezi tarafından devamlı bir şekilde takip edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan FACTS cihazları aşağıdadır [41].

3.2.4.1. Statik var kompanzatör (SVC)

Bu şönt cihazların en popüler konfigürasyonu sabit bir kapasitör ile bir tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) ve tristör anahtarlamalı kapasitör ile tristör kontrollü reaktör (TSC-TCR)'dür. Tristörler simetrik bir şekilde ateşlenirler, α açısı 90° ile 180° arasında kontrol edilerek kapasitör gerilimi ayarlanır. SVC genellikle iletim hattına kademe düşürücü transformator üzerinden bağlanır [42].

Şekil 3.4 'de basit bir SVC'nin elektriksel eşdeğer devresi gösterilmektedir. Burada L ve C sırasıyla SVC'nin sahip olduğu endüktans ve kapasitans değerini göstermektedir.

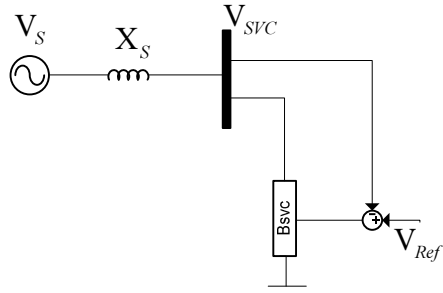


Şekil 3.4. Basit bir SVC modeli

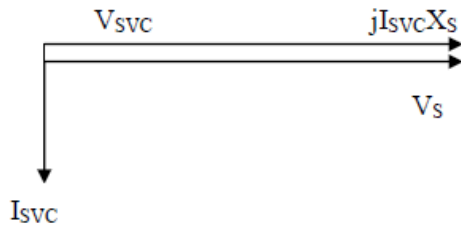
Şekil 3.4'de SVC bağlı örnek bir güç sistemi gösterilmiştir. SVC terminalinden görülen eşdeğer empedans X_S aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$X_S = \frac{V_b^2}{S_c} S_b \quad (3.11)$$

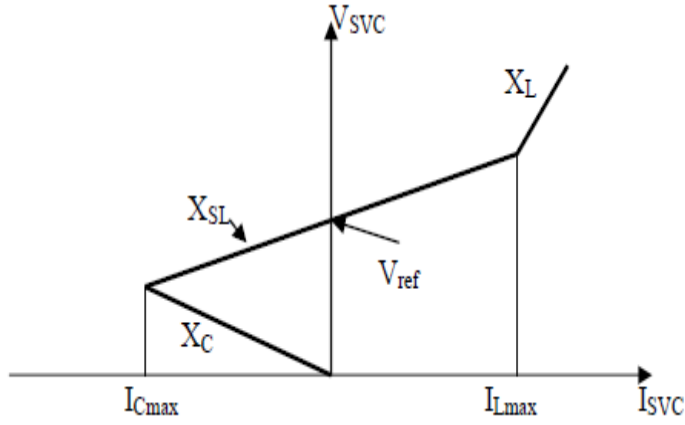
Burada S_c SVC barasındaki üç faz kısa devre gücü, V_b Faz-faz arası baz gerilimi, S_b ise sistemin baz gücünü gösterir.



a)



b)



c)

Şekil 3.5. a) SVC ile kontrol edilen güç sisteminin basit bir şeması b) Endüktif SVC akımı için AC sistemin fazör diyagramı c) SVC'nin sürekli hal gerilim-akım karakteristiği

Eğer I_{SVC} SVC'nin reaktif akımı ise SVC bara gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

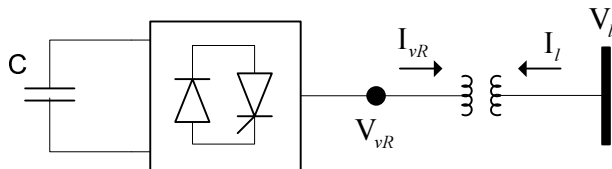
$$V_S = V_{SVC} + X_S I_{SVC} \quad (3.12)$$

Bu eşitliğin anlamı zayıf AC sistemlerde (yüksek X_S) gerilim kontrolünde daha etkilidir. Lineer olarak gerilim kontrol davranışı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_{SVC} = V_{ref} + X_{SL} I_{SVC} \quad (3.13)$$

3.2.4.2. Statik senkron kompanzatör (STATCOM)

Statik senkron kompanzatör iletim hattına şönt olarak bağlanan bir FACTS cihazıdır. Şekil 3.6'da basit bir STATCOM devre modeli gösterilmektedir. Basit olarak STATCOM bağlantı transformatörü, konverter ve bir DC kapasitörden ibarettir [43].



Şekil 3.6. Basit bir STATCOM modeli

Burada V_l AC sistem gerilimini, V_{vR} STATCOM çıkış gerilimini, X_{vR} ise cihazın öz empedansını ifade etmektedir. STATCOM çıkışında şebeke frekansında, kontrol edilebilir genlikte ve faz açısında, dengeli üç faz gerilimleri elde edilir. Bu düzenlemede AC sistem ile aygıt arasındaki sürekli durum güç alışverişi genel olarak reaktiftir. STATCOM ve AC sistem arasındaki reaktif güç alış verışı konverter çıkış geriliminin büyüklüğünü düzenleyerek kontrol edilir. Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünü geçerse I akımı transformatör reaktansı yolu ile STATCOM'dan AC sisteme akar ve cihaz iletim hattı için reaktif güç üretir. Konverter çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° ileridedir. Bu durumda cihaz kapasitif modda çalışmış olur. Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünden küçük olursa akım transformatör reaktansı yolu ile AC sistemden STATCOM'a akar ve cihaz iletim hattından reaktif güç tüketir. Konverter akımı iletim hattı geriliminden 90° geridedir. Bu durumda cihaz indüktif modda çalışmış olur. Eğer konverter çıkış gerilimi ile iletim hattı gerilimlerinin büyüklükleri eşit ise AC sistem ile cihaz arasında herhangi bir reaktif güç alışverişi olmaz. Sistemden çekilen reaktif güç Eşitlik 3.14'deki gibi hesaplanır [44,45].

$$Q_{vR} = \frac{|V_l|^2 - |V_l||V_{vR}|}{X_{vR}} \quad (3.14)$$

Kapasitör, konverter için gerekli DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Konverterin çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Sürekli durumda konverterin çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç ile transformatör ve konverter kayıpları karşılanmaktadır.

3.3. GÜÇ AKIŞI

Güç akışı için literatürde kabul gören ve sıkça kullanılan bir yöntem olan Newton-Raphson metodu kullanılmıştır. Newton metodu, güç akışı denklemlerinin çözümü için diğer iteratif metotlara göre kuadratik yakınsama karakteristiğine sahiptir. Özellikle çalışılan sistem hakkında anlık bilgi sahibi olmak ve bunun sonucunda iyi başlangıç tahminleri yapmak iterasyon bitiminde daha iyi sonuç verir [46]. Bir çözüm elde etmek için gerekli iterasyon sayısı sistemin boyutundan

farklıdır, fakat her iterasyonda daha fonksiyonel değerlendirmeler gereklidir. Bir güç sisteminde i. baraya giren akım aşağıdaki gibi yazılabilir. Örnek olarak Şekil 3.2’de verilen sistemde göz önüne alınırsa,

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (3.15)$$

eşitliği elde edilir. Burada Y_{ij} ve V_j sırasıyla hattın admitansı ve j barasının gerilimini göstermektedir. Bu eşitliğin içerisinde bara admiantans matrisi konularak düzenlenirse, i. bara için aktif ve reaktif güç eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$P_j - jQ_j = |V_i| \angle \theta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.16 gerçek ve sanal kısımları ayrılırsa,

$$P_i = \sum_{j \neq 1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.17)$$

$$Q_i = \sum_{j \neq 1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.18)$$

olarak elde edilir [47].

Verilen aktif ve reaktif güç eşitlikleri Taylor serisine açılır ve yüksek mertebeden olan terimler ihmal edilirse, aşağıdaki lineer denklem takımı elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2|^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Yukarıdaki eşitlikte 1 numaralı bara salınım barası olarak farz edilir. Jacobian matrisi aktif ve reaktif güçteki küçük değişimler ile gerilimin açısı ve büyüklüğü arasındaki değişimleri verir. Jacobian matrisinin elemanları aktif ve reaktif güçlerin $\Delta\delta_i^{(k)}$ ve $\Delta|V_i^{(k)}|$ 'deki değişimlerinin kısmi türevleridir. Kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Gerilim kontrollü baralar için gerilimin büyüklüğü bilinmektedir. Böylece n baralı bir sistemde gerilim kontrollü bara sayısı m ise (n-1) adet aktif güç ve (n-1-m) adet reaktif güç eşitliği yazılabilir. Buna göre jacobian matrisi $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$ boyutundadır. J_1 $(n-1) \times (n-1)$, J_2 $(n-1) \times (n-1-m)$, J_3 $(n-1-m) \times (n-1)$ ve J_4 ise $(n-1-m) \times (n-1-m)$ boyutludur. $\Delta P_i^{(k)}$ ve $\Delta Q_i^{(k)}$ terimleri hesaplanan değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki farktır.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{(tahmin)} - P_i^{(k)} \quad (3.21)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{(tahmin)} - Q_i^{(k)} \quad (3.22)$$

Baralardaki gerilimlerin yeni değerleri de aşağıdaki gibi olur.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} - \Delta\delta_i^{(k)} \quad (3.23)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (3.24)$$

Güç akışı çalışmalarında her analiz için daima çalışma şartları belirlenerek, bir bara hariç diğer bütün baralarda şebekeye giren aktif güç tarif edilmelidir. Ayrıca bu baraların her birinde sisteme akan reaktif güç veya gerilimin genliği de tarif edilmelidir. Yani, her barada reaktif güç akışı veya gerilimin genliğinden hangisinin sabit tutulacağına karar verilir. Bazen generatörler için reaktif güç tarif edilse bile, genel olarak yük baralarında reaktif güç ve generatör baralarında da gerilimin genliği tarif edilmektedir [47].

Pratikte çok yakın tahmin edilebilse de, şebekedeki bütün santrallerin aktif üretimlerini kesin olarak bilmek imkansızdır. Bunun sebebi hat kayıplarının

bilinmemesidir. Bundan dolayı sistemdeki baralardan birinde aktif güç bilinmeyen seçilerek, bunu çözümün sonunda elde etmek gerekir. Bu yüzden üretim baralarından birinde aktif güç bilinmeyen seçilir ki bu baraya salınım barası denir. Salınım barası olarak üretim baralarından birinin seçilmesi mecburi olmamakla beraber çözüm için kolaylık sağlar [48,49]. Bu bölümde güç akışı algoritmasında seçilecek salınım baralarının farklı olması durumlarında Jacobian matrisinin sınırlarında ne tür değişimler olacağı formülize edilmiştir.

Bara sayısı n olan bir güç sisteminde 1 numaralı baranın salınım barası seçilmesi durumunda aktif ve reaktif güçlere ait denklem setinin matrisel formunun 3.25’de verilmiş olduğunu farz edelim. Buna göre 1 numaralı seçilen salınım barasının (n-1) numaralı bara olması durumunda güçlere ait denklem setinin matrisel ifadesi 3.26’da görüldüğü gibi olacaktır. Bu iki ifadede sınırlardaki değişikliklere dikkat edilmesi gerekmektedir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (i \neq 1) \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (i \neq n - 1) \quad (3.26)$$

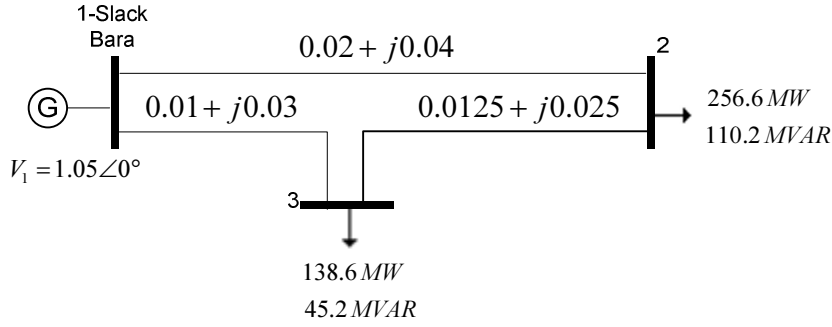
Sistemin güç akışına dahil edilebilmesi için öncelikle bara admitans matrisini elde edilmesi gereklidir. Bara admitans matrisi iki yöntemle gösterilebilir. Bunlardan ilki ilkel model, ikincisi düğüm admitans matrisi modelidir. İlkel model devre elemanlarının elektriksel özelliklerini gösterir Düğüm admitans matris modeli ise düğüm analizine dayalı bir yöntem olmakla birlikte düğümler yani baralar arasındaki admitans değerlerini gösterir. Bara sayısı N olan bir sistemin bara admitans matrisi aşağıdaki gibi gösterilir.

$$Y_{Bara} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Bara admitans matrisinin elemanlarını hesaplayabilmek için her bara arasındaki R, X ve B değerleri kullanılarak, o baraya değen tüm hatların hat değerleri bulunur ve matriste yerine yazılır [47].

3.3.1. Güç Akışının Üç Baralı Örnek Bir Güç Sistemine Uygulanması

Newton Raphson güç akışı yöntemi Şekil 3.7'de verilen 3 baralı örnek güç sistemine uygulanmış ve iterasyon sonuçlar verilmiştir. Uygulanan Newton Raphson metodunun durma kriteri için hata değeri, $e = 10^{-9}$ olarak seçilmiştir.



Şekil 3.7. 3 baralı örnek güç sistemi modeli

Güç sisteminin 1 numaralı salınım barası gerilimi 1.05 p.u. ve baz güç değeri 100-MVA olarak seçilmiştir. Ayrıca iletim hattının p.u. cinsinden empedansları ile yük baralarından çekilen gerçek ve sanal güç değerleri şekil üzerinde gösterilmiştir. Bara gerilim ve açılarının başlangıç değerleri Çizelge 3.1'de, bara admitans matrisi Eşitlik 3.28'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. 3 baralı örnek güç sisteminin başlangıç parametreleri

Parametre	V_2	δ_2	V_3	δ_3
Başlangıç Değeri (p.u.)	1	0	1	0

$$\begin{bmatrix} 20 - 50j & -10 + 20j & -10 + 32j \\ -10 + 20j & 26 - 32j & -16 + 32j \\ -10 + 30j & -16 + 32j & 26 - 62j \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Çizelge 3.2. 3 baralı örnek güç sisteminin iterasyona göre parametre değerleri

İterasyon No	Parametre			
	V_2	δ_2	V_3	δ_3
1	0.98419	-3.46017	1.00318	-2.84464
2	0.98184	-3.50338	1.00125	-2.86236
3	0.98183	-3.50353	1.00124	-2.86240
4	0.98183	-3.50353	1.00124	-2.86240

Newton Raphson çözüm metodu, 4. iterasyon sonunda bulunan değerlere yakınsamakta ve sonuca ulaşmaktadır. Çizelge 3.2'te sistemin yük barlarının gerilim ve açı değerlerinin iterasyona göre değişimleri verilmiştir. Bu sayede 1 numaralı salınım barasından çekilen güç, $S = 4.095 MW + 1.089 MVAR$ olarak hesaplanmıştır.

3.3.2. FACTS Cihazlarının Güç Akışı Denklemlerine Eklenmesi

AC güç sistemleri için güç akışı problemi diferansiyel cebirsel eşitliklerinin (DCE) denge noktalarının bulunmasıdır. Problem lineer olmayan cebirsel eşitliklerin çözümüne şekline formüle edilebilir.

$$f(x_{AC}) = 0 \quad (3.29)$$

Güç akışı için Newton gibi iteratif metotlarda kullanılan Jacobian matrisinin genel formu Eşitlik 3.30'da verildiği gibi ise FACTS cihazlarının güç akışı denklemlerine katılması sonucu oluşacak olan Jacobian matrisinin genel yapısı Eşitlik 3.31'de olduğu gibidir. Buna göre Jacobian matrisinin boyutları kullanılan FACTS cihazındaki durum değişkenlerin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Burada r tüm FACTS elemanlarına ait değişkenler vektörü F ise FACTS cihazlarına ait eşitliklerin vektörüdür [33].

$$\begin{bmatrix} \dots \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \dots \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\left[\begin{array}{c} \dots \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \dots \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} & \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \hline F_1, \dots, F_n \end{array} \right]_{r_1, \dots, r_n} \quad (3.31)$$

3.3.2.1. Statik var kompanzator cihazının güç akışında modellenmesi

İdeal bir SVC modelinde rezistif elemanların bulunmadığı varsayılarak sadece reaktif gücü kontrol ederek bara gerilimini ayarlanması gerçekleştirilir. BSVC cihazın şönt admitansı ve V_l ise bara gerilimi olmak üzere, sistemden çekilen reaktif güç eşitlik 3.32 ile hesaplanır. SVC cihazının güç akışı matrisine eklenmiş hali eşitlik 3.33'de verilmiştir.

$$Q_{SVC} = -|V_l|^2 B_{SVC} \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q^{svc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial a} \\ \frac{\partial Q^{svc}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q^{svc}}{\partial |V|} & \frac{\partial Q^{svc}}{\partial B_{svc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta B_{svc} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Her güç akışı iterasyonu sonucunda SVC şönt admitans parametresi güncellenerek iterasyona devam edilir. Aşağıdaki denklemde k, iterasyonu ifade etmektedir [50].

$$B_{SVC}^{(k+1)} = B_{SVC}^k + \Delta B_{SVC}^k \quad (3.34)$$

3.3.2.2. Statik senkron kompanzatör cihazının güç akışında modellenmesi

STATCOM, SVC'nin aksine kontrol edilecek bara gerilimini çözüm matrisi içinde durum değişkeni olarak kullanır. B_{vR} , V_{vR} ve V_l sırasıyla STATCOM şönt admitansı, değişken STATCOM gerilimi ve bara gerilimi olmak üzere, sistemden çektiği reaktif güç ve güç akışı matrisine eklemesi aşağıdaki gibi olur.

$$Q_{vR} = -|V_{vR}|^2 B_{vR} + |V_{vR}| |V_l| B_{vR} \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q_{vR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial P}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial |V|} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial |V_{vR}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta |V_{vR}| \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Her güç akışı iterasyonu sonucunda STATCOM değişken gerilim parametresi güncellenerek iterasyona devam edilir. k numaralı iterasyona ait denklem Eşitlik 3.37'de verilmiştir [50].

$$|V_{vR}|^{(k+1)} = |V_{vR}|^k + \Delta |V_{vR}|^k \quad (3.37)$$

3.4. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Hesaplama ile ilgili konularda çeşitli arasında en önemli olanlar algoritma doğrulama, karmaşıklık tahmini ve optimizasyondur [51]. Verilen bir problemi belli sınırlar içerisinde çözmek, değişken parametrelere ve problemin derecesine bağlı olarak çok zaman alabilen ve karmaşık bir iştir.

Modern problemlerin birçoğu çok karmaşık olma eğilimindedir ve her ne kadar probleme uygun olacak bir sayısal çözüm algoritması geliştirilse de çok bilinmeyenli problemler için birbirinden bağımsız ve cebirsel sonuçlar bulmak mümkün olmayabilir. Fakat gerçekte böyle bir problem için çok küçük bir sapmayla da olsa sonuca ulaşmak amacıyla yaklaşık sonuçlar kümesinin var olduğu kabul edilmektedir. Bu tür problemler için genellikle verilen parametreleri göz önüne alarak maksimum veya minimum sonuca ulaşmayı hedefleyen amaç fonksiyonları elde edilir. Gerçekte görebileceğimiz birçok sistem amaç fonksiyonları olarak düşünülebilir ve optimize edilebilir.

Lineer olmayan problemlerin tanımlanması ve matematiksel olarak modellenmesi ile birlikte, genellikle iteratif olan klasik optimizasyon yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Başlangıç kümesinin kullanıcı tarafından belirlenmesi, tek bir popülasyon içermesi yani tek bir başlangıç kümesinden sonuca ulaşmayı amaçlaması sebebiyle problemin lokal minimum noktasında takılması kuvvetle muhtemeldir. Bu nedenle son zamanlarda birçok rastgele çözüm kümesini işleyebilen ve global minimuma erişebilen sezgisel algoritmalar kullanılmaya başlamıştır.

3.4.1. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması

$f(x)$ amaç fonksiyonunun, x ile herhangi bir sınırlama olmaksızın minimizasyonu veya maksimizasyonu sınırlamasız optimizasyon, x ile ilgili sınırlamanın veya sınırlamaların bulunduğu problemi ise sınırlamalı optimizasyon problemi olarak isimlendirilir.

Optimizasyon problemlerinin diğer bir sınıflandırılması ise amaç fonksiyonunun ve sınırlamalarla ilgili fonksiyonların lineer olup olmama durumlarına göre yapılır. Bir optimizasyon problemi, doğrusal amaç ve sınırlama fonksiyonlarına sahip ise bu probleme doğrusal programlama problemi, bu fonksiyonlardan herhangi biri doğrusal olmayan ise buna da doğrusal olmayan programlama problemi denir. Değişkenleri negatif olmayan tamsayı değerleri alan bir doğrusal programlama problemi tamsayı programlama problemi olarak adlandırılır.

Diğer bir sınıflandırma şekli de sürekli ve ayrık optimizasyon problemi şeklindedir. Ayrık niceliklerin optimal olarak düzenlenmesi, gruplanması, sıraya konması ve seçilmesi problemi ayrık optimizasyon problemi olarak adlandırılır. Tasarım değişkenlerinin veya parametrelerinin alacağı değerler sürekli değerler ise bu tür problemlere sürekli optimizasyon problemi denir.

3.4.2. Optimizasyon Metotlarının Sınıflandırılması

Optimizasyon problemlerinde olduğu gibi, bu problemleri çözmek için geliştirilen metotlar da çeşitli kriterlere göre sınıflandırılırlar. Genel olarak klasik optimizasyon metotları doğrudan ve optimalite kriterine dayalı olan dolaylı metotlar

olmak üzere iki gruba ayrılır. Optimallik kriterine göre çözüm arayan optimizasyon metotları genellikle dolaylı metotlar olarak adlandırılırlar. Önce gerek be yeter şartlar yazılır, daha sonra da bu şartlar bölgesel minimumluğa aday noktalar için çözülür.

Arama metotları, farklı bir yönteme dayanır. Tahmini bir başlangıç noktasının çözümü ile araştırmaya başlanır ve başlangıç çözümü genellikle optimallik şartlarını sağlamadığından, uygun çözüm bulunana kadar iteratif yöntemler ile çözüme devam edilir [34].

3.4.3. Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu kullanıcı tarafından problemin yapısına ve çözüm kümesinin sınırlarına göre tanımlanan, maliyet ve penaltı faktörlerinden oluşan matematiksel bir denklemdir. Amaç fonksiyonu optimizasyon metodunun en uygun yani optimal değere doğru sürüklemeye çalıştığı fonksiyonu temsil eder. Bir güç sisteminde generatör ünitelerinin maliyet optimizasyonu yapılırken, amaç fonksiyonu genellikle ikinci dereceden bir denklem olarak belirlenir.

3.4.4. Sezgisel Yöntemler

Sezgisel yöntemler, herhangi bir amacı gerçekleştirmek veya hedefe varmak için çeşitli alternatif hareketlerden etkili olanlara karar vermek amacı ile tanımlanan kriterler ve bilgisayar metotlarıdır. Bu algoritmalar, çözüm uzayında optimal çözüme yakınsaması ispat edilemeyen ve temel hedefi matematiksel olarak modellenmiş çok bilinmeyenli sistemlerin kontrol edilebilir parametrelerini en optimal sonucu elde edecek biçimde ayarlamaktır.

Sezgisel yöntemlere gerek duyulmasının sebebi; problemin kesin çözüme ulaşabilecek bir yapıya sahip olmaması, anlaşılabilirlik açısından sezgisel algoritmaların kolay olması ve en önemlisi çok parametreliliği bir gerçek hayat probleminin cebirsel yöntemlerde ihmal edilen en küçük detay parametrelerinin bile ihmal edilmeden optimal çözüme ulaştırılabilmesidir.

Sezgisel yöntemlerin, kullanılacak işe göre seçilebilmesi için genel çerçevedeki kalite kriterleri açısından belirli sınıflandırmaları mevcuttur. Bu kriterler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

-Çözüm Kalitesi ve Hesaplama Zamanı

-Kod Basitliği ve Gerçeklenebilirlik

-Esneklik

-Dinçlik

-Basitlik ve Analiz Edilebilirlik

Çözüm kalitesi ve hesaplama zamanı özellikle dinamik çalışan sistemlere anlık müdahaleler edebilmek amacıyla kullanılan algoritmalarda önem arz etmektedir. Kod basitliği ve gerçeklenebilirlik yöntemin bilgisayar ortamında kodlama ve uygulamaya uygun olmasını ve esneklik ise algoritmanın amaç fonksiyonuna kolayca adapte olabilme özelliğini gösterir. Basitlik ve analiz edilebilirlik kullanılacak algoritmanın kullanıcı tarafından kolayca analiz edilmesi ve değiştirilebilmesini, dinçlik ise rastgele arama yönteminde başlangıç koşulu ne olursa olsun optimal sonuca ulaşabilme özelliğini ifade eder [34].

Bu çalışmada, sezgisel algoritmaların içinde en çok kullanılan algoritmalar olan; yapay arı kolonisi algoritması, diferansiyel gelişim algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması güç sistemlerinin optimal çözümü amacıyla kullanılmıştır.

3.4.4.1. Yapay arı kolonisi algoritması

Yapay arı kolonisi algoritması son yıllarda ortaya atılan, bal arılarının yiyecek bulma davranışlarından esinlenerek oluşturulmuş sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Sürü zekasını kullanan bu yöntemde, gruplara ayrılarak iş bölümü yapmak ve kendi kendine organizasyon en temel iki özelliğidir. Matematiksel bir sisteme uygulanırken, sistemin değişken parametreleri yani çözüm kümesi yiyecek kaynakları olarak; optimal çözüm ise mevcut yiyecek kaynağının kalitesi olarak tanımlanır. YAK algoritmasında yapılacak iş kaşif, gözcü ve işçi arılara paylaştırılmak üzere 3'e ayrılır.

Bu yöntemde, kaşif arılar tarafından rastgele atanan başlangıç yiyecek kaynaklarının optimallik kalitesi işçi arılar tarafından hesaplanmaktadır. Hesaplanan

bu kalite değerlerine bağlı olarak, yeni yiyecek kaynakları belirlenir ve tüm yiyecek kaynağı popülasyonunun kalitesi hesaplanır. Mevcut iterasyonda elde edilen sonuç, bir önceki iterasyondaki sonuçtan iyi ise, bu kaynak hafızaya alınır ve işlem kullanıcının belirlediği limitlere kadar devam eder. YAK algoritmasına ait süreç adımları aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Algoritmada ilk önce parametre ve başlangıç değerlerinin belirlenir, yiyecek arama sürecinin başlaması ile kaşif arılar rastgele kaynakları ararlar. Yiyecek kaynakları bulunduğunda, kaşif arılar işçi arı olarak bu kaynaktaki yiyeceği kovana taşır yani çözüm kalitesini tanımlar, daha sonra tekrar kaşif arı şekline gelerek yeni kaynaklar ararlar. İşçi ve kaşif arıları izleyen gözcü arılar, yiyecek kaynağının kalitesine göre seçim yaparak en kaliteli kaynağı hafızaya alırlar [37].

Başlangıç Kaynakları

Başlangıç yiyecek kaynakları, x^{min} ve x^{max} yiyecek kaynaklarının sınır koşullarını; i ve j ise sırasıyla popülasyon sayısı ve problemin boyutu ($i=1, \dots, NP$ ve $j=1, \dots, D$) olmak üzere aşağıdaki eşitlik kullanılarak üretilir. Başlangıç yiyecek kaynakları problemin çözüm süresi ve sonuca en düşük iterasyon sayısında yakınsayabilmesi için önemlidir. Yöntemin, sonuca daha hızlı yakınsayabilmesi isteniyorsa çözüm kümesinin maksimum ve minimum sınır değerleri daraltılarak arama bölgesi küçültülebilmekte; en kaliteli ve optimal sonuca yakınsanması isteniyorsa bu sınır değerleri mümkün olduğunca genişletilebilmektedir.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand[0,1](x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.38)$$

Yeni Kaynaklar

İşçi arıların çalışarak kovana nektar taşıyacağı yeni yiyecek kaynakları mevcut yiyecek kaynakları kullanılarak ise aşağıdaki biçimde belirlenir.

$$v_{ij} = x_j + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3.39)$$

Burada v yeni yiyecek kaynağını temsil ederken, i ve k , birbirinden farklı olmak kaydıyla, sırasıyla mevcut yiyecek kaynağı ve rastgele seçilen bir yiyecek kaynağı; ϕ_{ij} ise -0.5 ve 0.5 arasında rastgele bir sayıdır. ϕ_{ij} sayısının her kaynak seçiminde farklı değerde atanması, çözüm yönteminin belli matematiksel kurallarla birlikte

rastgele seçim yaptığının göstergesidir. Üretilen yeni yiyecek kaynağı problemin tanımında belirtilen sınır koşullar içerisinde olmalıdır. Eğer yeni kaynak belirlenen sınır koşullarının dışında ise bu kaynağın sistem sınırları içine alınması Eşitlik 3.40 ile yapılır.

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max}, & v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (3.40)$$

Uygunluk Değeri

Yiyecek kaynaklarının nektar kalitesi yani matematiksel problemdeki sonuç değeri, çözüm kümesi elemanlarının amaç fonksiyonuna uygulanması ile bulunur ve f_i ile gösterilir. Bu kaynağın çözüme istenilen minimum veya maksimum değere en yakın olması da uygunluk değerinin hesaplanması ile gösterilir. i yiyecek kaynağının uygunluk değeri hesabı Eşitlik 3.41'de verilmiştir.

$$fitness_i = \begin{cases} 1/(1 + f_i), & f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i|, & f_i < 0 \end{cases} \quad (3.41)$$

Olasılıksal Seçme

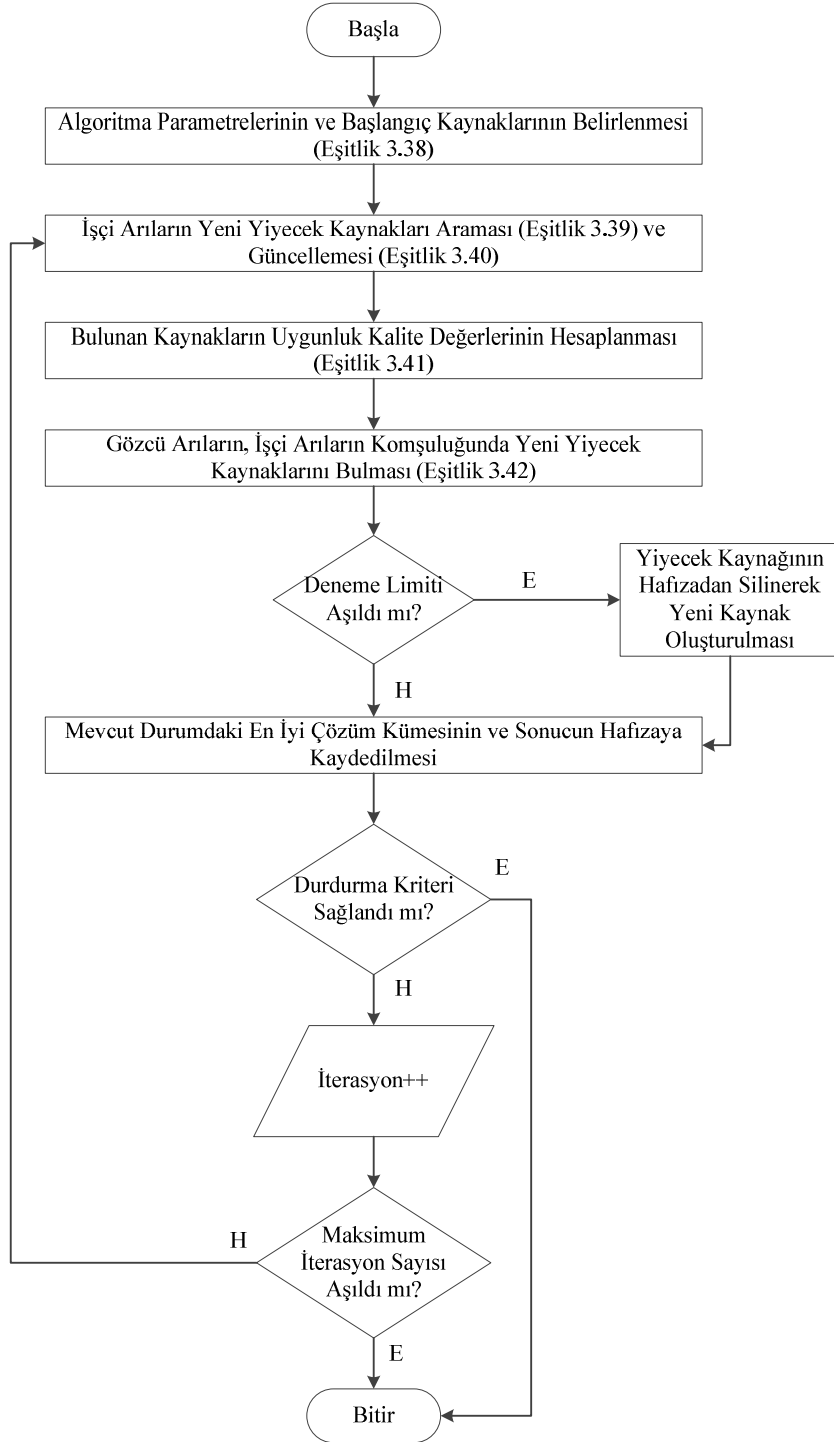
Her kaynağın uygunluk değeri kullanılarak olasılıksal seçme metodu ile yeni kaynaklar oluşturulur. Buradaki en önemli nokta, tüm yiyecek kaynaklarından oluşan seçme havuzunda kaliteli sonuç veren kaynakların diğer kaynaklara nispeten daha büyük seçilme olasılığına sahip olmasıdır. Bu yöntem ile Eşitlik 3.42 kullanılarak yeni kaynaklar üretilir. Her kaynağın olasılık değeri ρ ise her kaynağın 0 ile 1 arasında seçilme olasılığı olmak üzere aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$\rho_i = \frac{fitness_i}{\sum_{j=1}^{SN} fitness_j} \quad (3.42)$$

Deneme Sınırı

Algoritmada tüm kaynaklar geliştirilmekte ve iterasyonlar sonunda bir sonuca yakınsamaktadırlar. Fakat belli bir noktada takılı kalan herhangi bir kaynak geliştirilemez ve algoritmanın sonuca daha fazla iterasyon sayısı ile ulaşmasına neden olmaktadır. Bu sebeple kullanıcı tarafından belirlenen bir deneme limiti

sayısında geliştirilemeyen kaynaklar terk edilerek Eşitlik 3.38 ile yeni kaynaklar oluşturulur ve algoritmaya dahil edilir. Bu sayede hem arama bölgesi genişlemekte, hem de algoritma belli bir lokal minimum değerde takılı kalmamaktadır [52].



Şekil 3.8. Yapay arı kolonisi algoritması akış diyagramı

3.4.4.2. Diferansiyel gelişim algoritması

Evrimsel algoritmalar uzun yıllar önce teknolojiye gelişmelerle birlikte bilgisayar programları aracılığıyla matematiksel sistemlerin çözümlerinin hızlı biçimde yapılmasının başlaması ile sezgisel çözüm yöntemleri arasında yerini almıştır. Evrimsel algoritmalar doğal seleksiyon ilkesinden yola çıkarak en uygun çözüm kümesinin diğer bütün çözümleri elimine ederek önce çıkmasını prensibini temel almaktadır [53].

Diferansiyel gelişim algoritması diğer sezgisel yöntemlere kıyasla yeni sayılabilecek evrimsel bir çözüm yöntemidir. Bu yöntem canlı hücrelerin veya bir bütünün gelişerek yaşadığı ortama adapte olmasını, bu süreçte diğer canlıların özelliklerini çaprazlayarak yeni kombinasyonlar üretmesi, kendi genetik özelliklerini kullanarak mutasyona uğraması ve en uygun özelliğin seçilmesi aşamalarını örnek olarak oluşturulmuş bir sezgisel algoritmadır. Diferansiyel gelişim yöntemi başlangıç popülasyonu üretimi, mutasyon, kombinasyon ve seleksiyon olmak üzere 4 temel adımda incelenebilir [35].

Başlangıç Popülasyonu

x^{min} ve x^{max} bireyler için dağılım yapılabilecek sınır koşulları; i ve j ise sırasıyla popülasyon sayısı ve problemin boyutu ($i=1, \dots, NP$ ve $j=1, \dots, D$) olmak üzere, başlangıç popülasyonu aşağıdaki eşitlik kullanılarak üretilir.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand[0,1](x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.43)$$

Mutasyon

Mutasyon operatörü algoritmanın popülasyon yoğunluğunu ve optimizasyon için gerekli gelişme ve yakınsamayı sağlayabilmek amacıyla kullanılır. Diferansiyel gelişim algoritmasında kullanılan tipik bir mutasyon operatörü Eşitlik 3.44'de verilmiştir. Burada v yeni bireyi ve i mevcut bireyi temsil ederken, $r1$ ve $r2$ i 'den ve birbirlerinden farklı olmak koşuluyla rastgele seçilen popülasyonları göstermektedir. F katsayısı 0 ile 1 arasında, her iterasyon için sabit kalan ve mutasyonun iraksama oranını etkileyen dağılım sabitidir. Üretilen yeni popülasyon sınır değerlerinin dışında ise düzenlenir ve arama bölgesi içinde kalması sağlanır.

$$v_i = x_i + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (3.44)$$

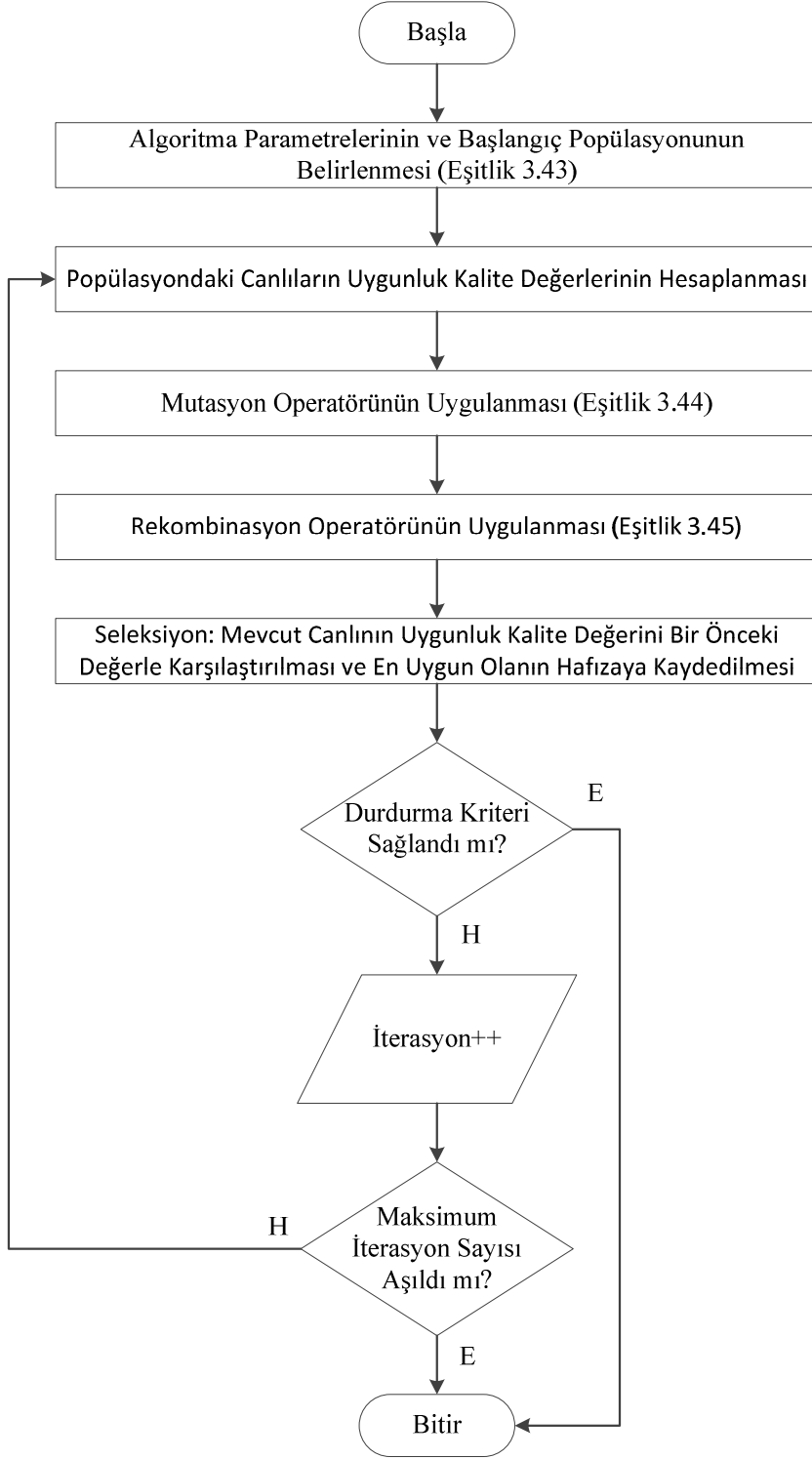
Rekombinasyon

Birçok sezgisel algortmada kullanılan rekombinasyon operatörü temel anlamda yeni bir birey oluşup oluşmadığını kontrol etmek amaçlamaktadır. Fakat diferansiyel gelişim algoritmasında kullanılan operatör daha çok mutasyon operatörü ile birleşmiş ve yeni bir birey oluşturmaya çalışan farklı bir eşitlikle ifade edilir. Rekombinasyon operatörü popülasyondaki bireylerin geniş çerçevede birbirleriyle çaprazlanarak yeni ve daha değişik bireyler üretilmesi için kullanılmaktadır. Bu algortmada kullanılan rekombinasyon operatörü Eşitlik 3.45'de verilmiştir. v yeni bireyi ve x mevcut bireyi göstermekte, $r1$, $r2$ ve $r3$, i 'den ve birbirlerinden farklı olmak koşuluyla rastgele seçilen popülasyonları göstermektedir. G katsayısı ise kullanıcı tartanından seçilen rekombinasyon sabitidir.

$$v_i = x_i + G(x_{r3} - x_i) + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (3.45)$$

Seleksiyon

Diferansiyel gelişim algoritması basit bir seleksiyon operatörü kullanarak jenerasyonun uygunluğunu kontrol etmektedir. Çözüm parametrelerinin amaç fonksiyonuna girilmesi ile, problem sonucu elde edilir. Rekombinasyon sonucunda üretilen v bireyi mevcut durumdaki x bireyi ile karşılaştırılır. Eğer yeni birey daha kaliteli sonuç veriyor ise mevcut birey hafızadan silinerek daha uygun olan yeni birey hafızaya kaydedilir.



Şekil 3.9. Diferansiyel gelişim algoritması akış diyagramı

3.4.4.3. Parçacık sürü optimizasyon algoritması

Parçacık sürü optimizasyonu sosyal olarak organize olan toplulukların, sosyal dinamiklerinden ve göç etme davranışlarından esinlenen sezgisel bir çözüm yöntemidir. Bireylerden oluşan bir popülasyonun elemanlarını kullanarak, belirlenmiş bir bölge içinde istenilen en uygun pozisyonu elde eder. Bu bağlamda popülasyon sürü, bireysel elemanlar ise parçacık olarak adlandırılır [36].

Parçacık sürü optimizasyonunda her parçacık belirlenen bölgede uygun bir hızla hareket ederek, o ana kadar karşılaştığı en uygun pozisyonu hafızasına kaydetmektedir. Her parçacığın ulaştığı en uygun pozisyon diğer bireylerin de hızlarını ve durumlarını etkileyecek şekilde kullanılır, yani her parçacık kendisinin ve komşusunun en uygun pozisyonunu göz önüne alarak en iyi çözüm kümesine ulaşmayı amaçlar [54]. Parçacık sürü algoritmasında kullanılan tanımlamalar aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Başlangıç pozisyonları diğer sezgisel algoritmalarda olduğu gibi x^{min} ve x^{max} bireyler için dağılım yapılabilecek sınır koşulları; i ve j ise sırasıyla parçacık sayısı ve problemin boyutu ($i=1,\dots,SN$ ve $j=1,\dots,D$) olmak üzere, başlangıç pozisyonları popülasyonu aşağıdaki eşitlik kullanılarak üretilir.

$$S_{ij} = x_j^{min} + rand[0,1](x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.46)$$

Parçacıkların Konum ve Hız Durumlarının Tanımlanması

Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasında temel işlem, tüm parçacıkların aranan en optimal konuma yani sonuca ulaşmalarıdır. Bir t zamanında n boyutlu i parçacığının konumu, hızı ve bir önceki iterasyondaki en iyi konumu sırası ile Eşitlik 3.47, 3.48 ve 3.49'de verilmiştir.

$$S_i(t) = (s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,n}) \quad (3.47)$$

$$V_i(t) = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}) \quad (3.48)$$

$$P_i(t) = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n}) \quad (3.49)$$

Mevcut iterasyona kadar her paçacığın elde edilmiş en iyi konumu ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_{gb}(t) = (p_{gb,1}, p_{gb,2}, \dots, p_{gb,n}) \quad (3.50)$$

Yeni Konum ve Hız Değerlerinin Üretilmesi

Algoritmada bir önceki iterasyondaki konum kullanılarak, o iterasyondaki hız değeri dolayısıyla yer değiştirmesi hesaplanmaktadır. Yer değiştirmesi mevcut konum bilgisine eklenerek paçacığın yeni konum değeri elde edilir. Yeni bir konum üretmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılır [54].

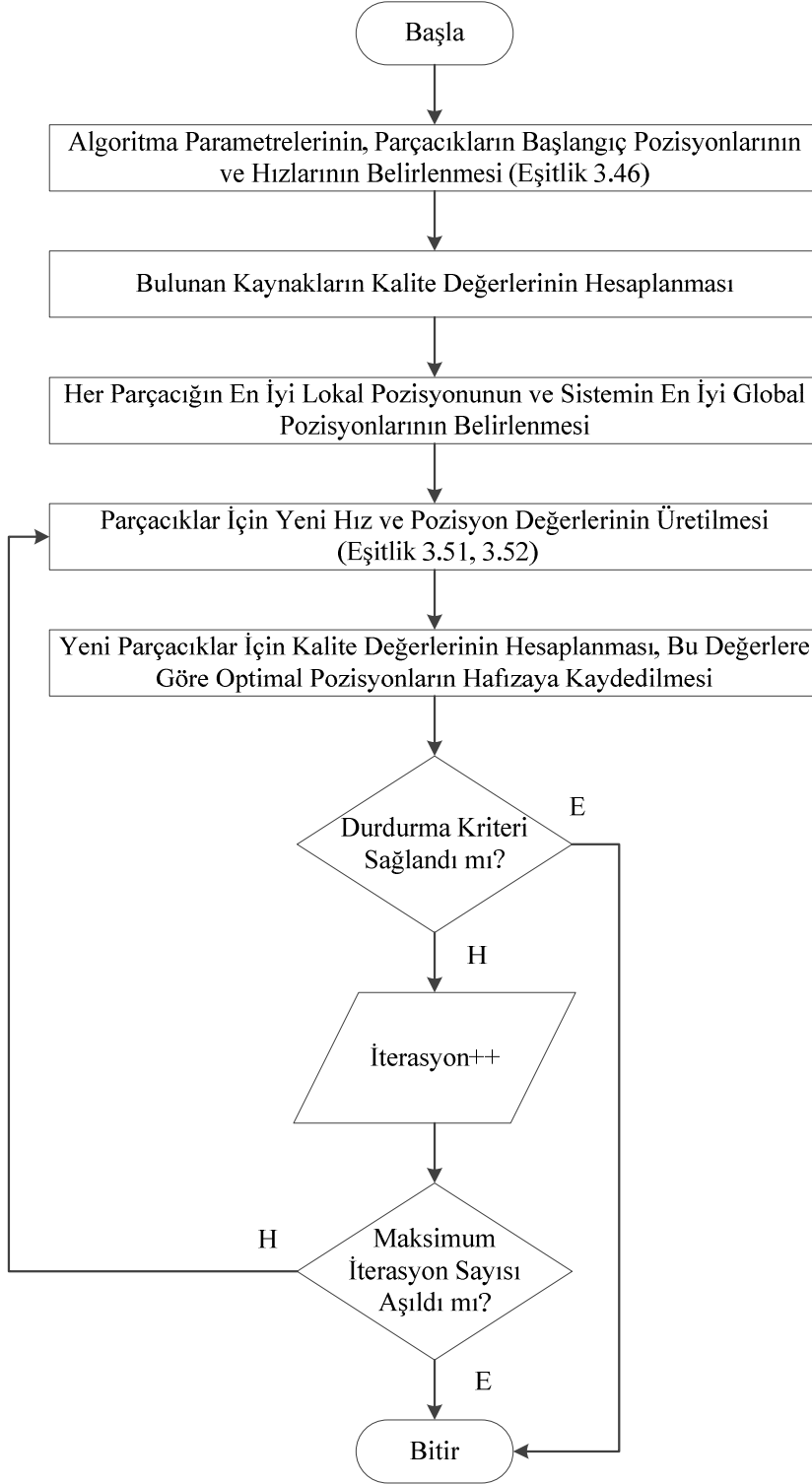
$$V_i(t+1) = k(w(t)V_i(t) + c_1r_1(P - S(t)) + c_2r_2(P - S(t))) \quad (3.51)$$

$$S_i(t+1) = S_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.52)$$

Burada c_1 ve c_2 kullanıcı tarafından seçilen sosyal ve bilişsel parametreler; r_1 ve r_2 ise 0 ile 1 arasında rastgele atanan sayıları belirtir. w ve k ise sırasıyla atalet ağırlığını ve kısıtlama katsayısını temsil eder. Atalet ağırlığı her iterasyonda değişirken, kısıtlama katsayısı c_1 ve c_2 değerlerine bağlı olarak sabittir. w_{max} ve w_{min} atalet ağırlığının sınırlarını, t_{max} maksimum iterasyon sayısını ve t ise mevcut iterasyon sayısını göstermekte olup, Eşitlik 3.53 ve 3.54'de verilmiştir.

$$w(t) = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{t_{max}} t \quad (3.53)$$

$$k = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2 \quad (3.54)$$



Şekil 3.10. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması akış diyagramı

3.5. SEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI

Temel anlamda optimal güç akışı fonksiyonu olarak tanımlanan $f(x,u)$ 'nin bileşenleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır,

$$x = [P_{GStack} \ V_L \ Q_{in}], u = [P_{Gen} \ V_{Gen}] \quad (3.55)$$

burada x çıkış, u ise giriş vektörünü belirtir. Yani optimal güç akışında generatörlerin aktif güç üretim miktarı ve gerilimleri güç akışı denkleminin giriş vektörünü; salınım barasının aktif güç üretimi, yük baralarının gerilimleri ve enjekte reaktif güçler ise çıkış vektörünü oluşturur. Optimal aktif güç üretimi için verilen generatör üretim toplam maliyet fonksiyonu ise,

$$f = \sum_{i=1}^{N_g} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (\$/h) \quad (3.56)$$

olarak tanımlanır. Burada N_g generatör sayısını; P_{Gi} i . generatörün aktif güç üretim miktarını; a_i , b_i ve c_i ise i . generatörün sabit maliyet katsayılarını belirtir.

Klasik bir üç akışı denklemindeki eşitlik sınırları,

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + P_{in} = 0 \quad (3.57)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + Q_{in} = 0 \quad (3.58)$$

bununla birlikte parametre sınır değerleri ise,

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (3.59)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (3.60)$$

$$Q_{in}^{min} \leq Q_{in} \leq Q_{in}^{max} \quad i = 1, \dots, N_{FACTS} \quad (3.61)$$

biçiminde tanımlanır [47]. N_g ve N_{FACTS} , generatör ve FACTS cihazlarının sayısıdır.

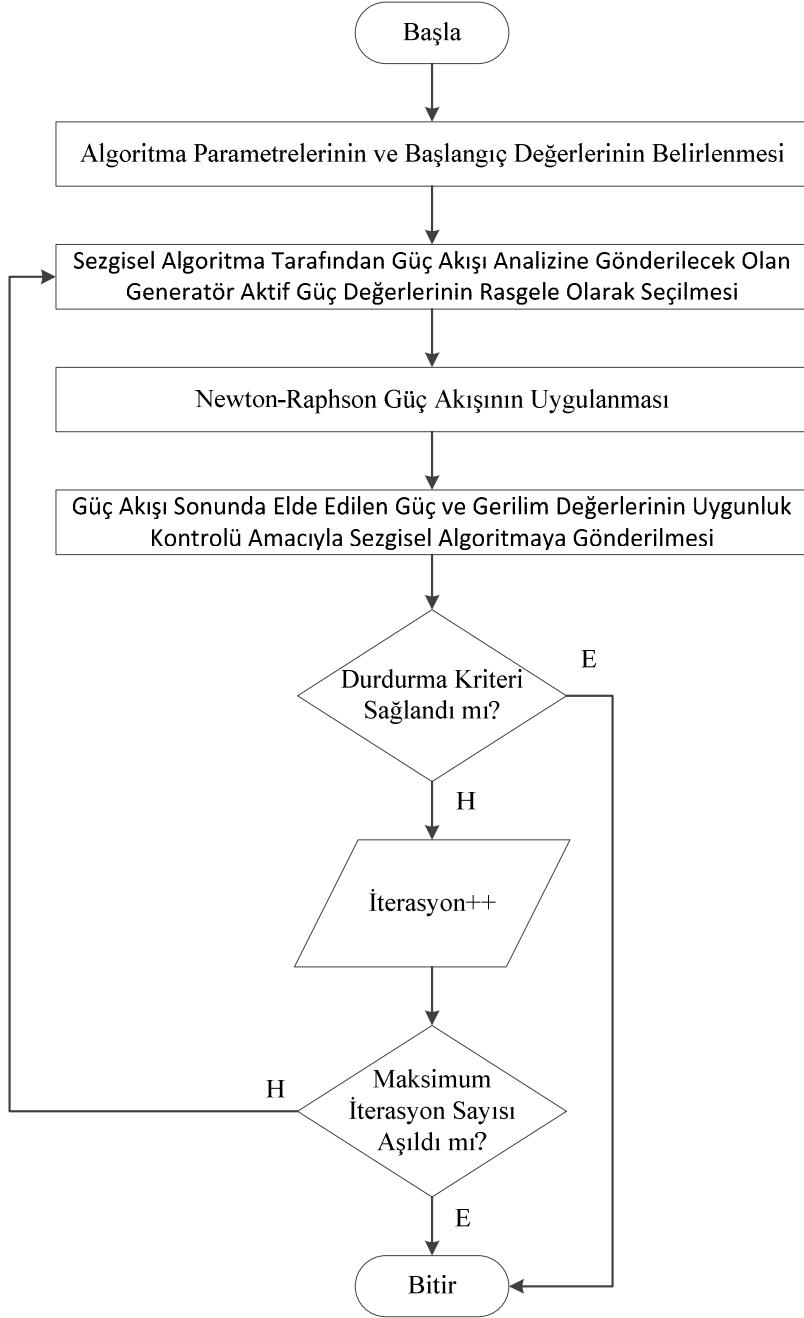
Optimal güç akışının hedefi, giriş ve çıkış parametrelerini sınır koşulları içinde tutarak amaç fonksiyonunu minimize etmektir.

Bu çalışmada IEEE 30 baralı elektrik güç sistemi literatürde kabul görmüş olması ve güç akışı çözüm yöntemlerinin kalitesini ve verimliliğini test etmek

amacıyla kullanılan yüksek güçlü bir sistem olması sebebiyle test sistemi olarak seçilmiştir. Bu sistem 6 generatör barası ve 24 yük barası olmak üzere 30 bara ve bu baraları birbirine bağlayan 41 adet iletim hattından oluşmaktadır [37]. Test sistemi üzerine kademe değiştirici transformatör, statik var kompanzatör ve statik senkron kompanzatör cihazları eklenerek generatör üretim maliyeti optimize edilmiştir.

Sisteme ait hat, generatör ve yük bilgileri Ek 1'de verilmiştir. Bu bilgiler incelendiğinde güç sisteminin çektiği toplam aktif ve reaktif güç miktarlarının sırasıyla 283.40 MW ve 126.20 MVAR olduğu görülmektedir. Ayrıca sistemin generatör aktif güç ve gerilim sınır koşulları ile birlikte yakıt maliyet katsayıları da bu tez çalışmasında kullanıldığı şekliyle Ek 1'de verilmiştir. Sistemdeki her bir generatör için yakıt maliyeti denklemi ikinci dereceden bir denklem olarak ifade edilmektedir. Sistemin toplam yakıt maliyeti tüm generatörlerin yakıt maliyetlerinin toplamı olarak hesaplanmaktadır.

Generatör maliyeti optimizasyonu amacıyla yapılan çalışmalarda, Newton-Raphson güç akışı metodu sezgisel optimizasyon algoritmasında amaç fonksiyonuna katılacak olan generatör aktif güç üretim değerlerini hesaplayarak algoritmaya göndermektedir. Güç akışı işlemini içeren sezgisel algoritmaya dair genel akış şeması Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Güç akışının sezgisel algoritmalarla kullanılması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

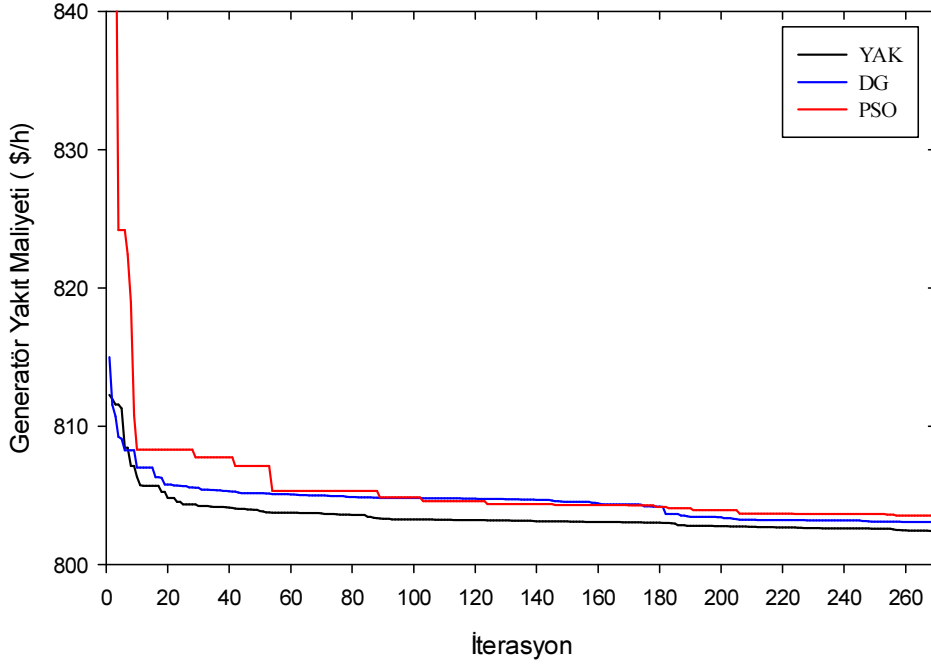
Bu bölümde, IEEE 30 baralı güç sistemi üzerine kademe değiştirici transformatörler ve FACTS cihazlarının, SVC ve STATCOM, eklenerek güç akışının dahil edildiği sezgisel algoritmalar ile gerçekleştirilen generatör yakıt maliyeti optimizasyon çalışmasının sonuçları verilmiştir.

4.1. IEEE 30 BARALI GÜÇ SİSTEMİNİN MALİYET OPTİMİZASYONU

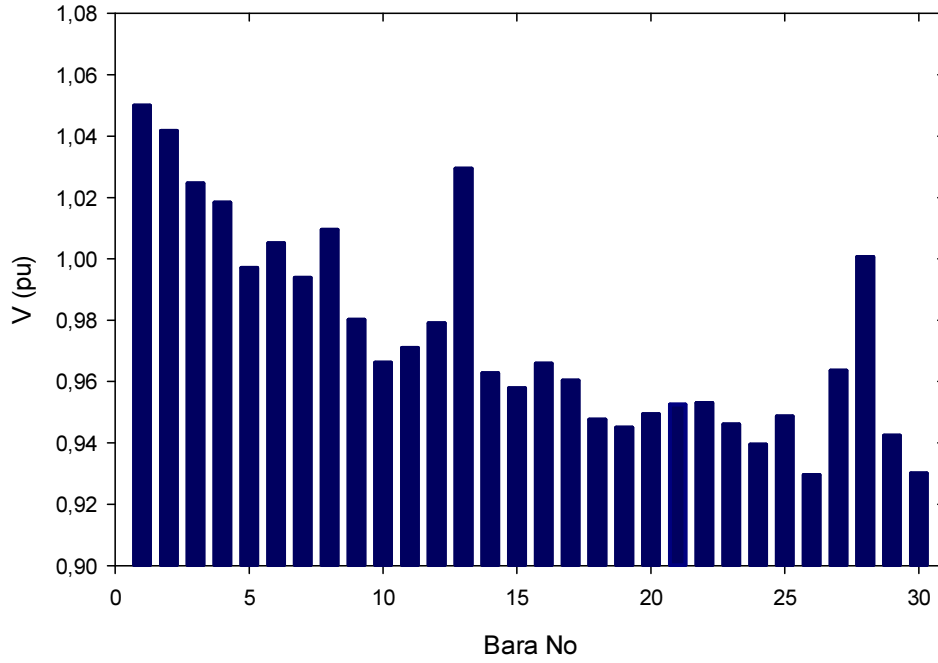
IEEE 30 baralı güç sistemin generatör maliyet fonksiyonu herhangi bir FACTS cihazı eklenmeden optimize edilmiştir. Optimizasyon sonuçları p.u. cinsinden Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayrıca optimizasyon metotlarının iterasyon grafikleri ve optimizasyon sonrası bara gerilimleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. IEEE 30 baralı güç sisteminin generatör maliyet optimizasyonu

Sistem Değişkeni	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Diferansiyel Gelişim	Yapay Arı Kolonisi
P_{gen1}	1.7616	1.7695	1.7610
P_{gen2}	0.4885	0.4888	0.4890
P_{gen3}	0.2152	0.2107	0.2091
P_{gen4}	0.2225	0.2085	0.2200
P_{gen5}	0.1226	0.1332	0.1291
P_{gen6}	0.1200	0.1200	0.1200
V_{gen1}	1.0499	1.0475	1.0499
V_{gen2}	1.0382	1.0313	1.0416
V_{gen3}	1.0111	0.9977	0.9970
V_{gen4}	1.0198	1.0129	1.0095
V_{gen5}	1.0499	1.0499	0.9710
V_{gen6}	1.0499	1.0489	1.0294
Maliyet (\$/h)	803.0349	803.0141	802.3187



Şekil 4.1. IEEE 30 baralı güç sisteminin maliyet optimizasyonu



Şekil 4.2. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri

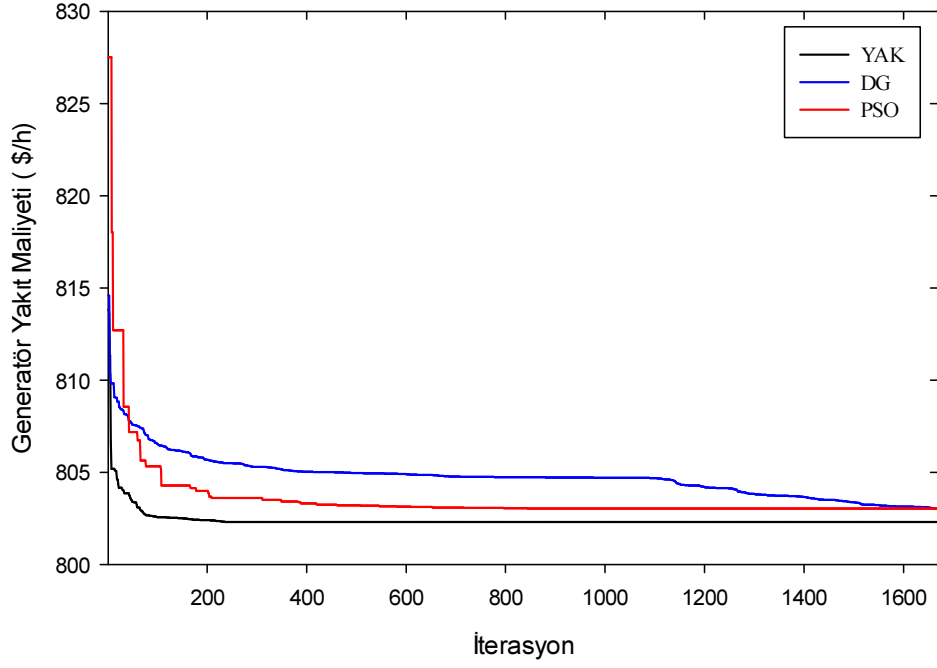
4.2. SİSTEME KDT CİHAZININ EKLENMESİ

IEEE 30 baralı güç sistemine sırasıyla 6-9, 6-10, 4-12, 28-27 numaralı baralar arasına 0.9 - 1.1 p.u. gerilim aralığında çalışabilen 4 adet kademe değiştirici transformatör eklenmiştir. Optimizasyon sonuçları p.u. cinsinden Çizelge 4.2'de verilmiştir.

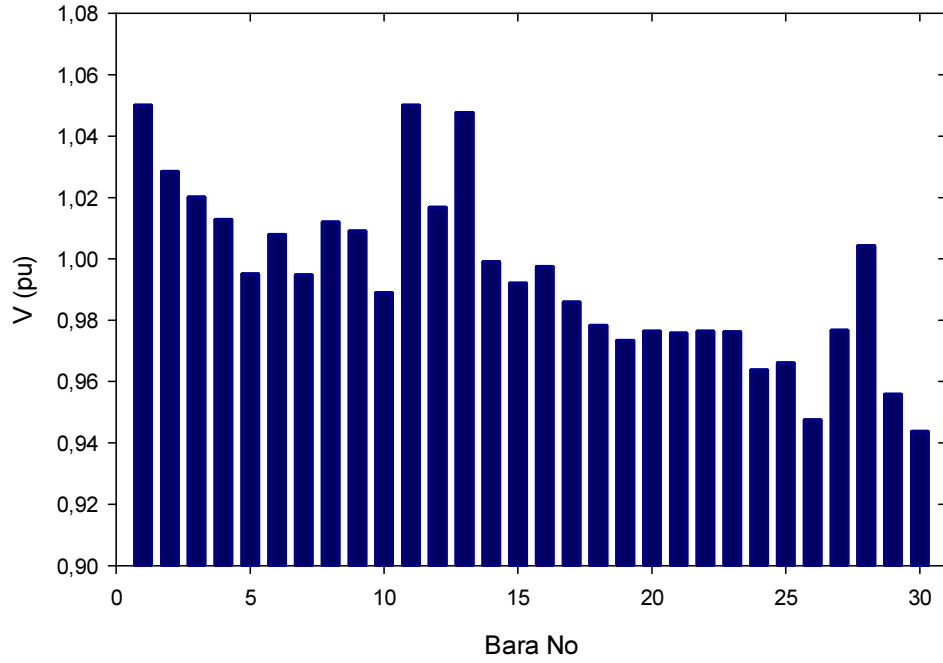
Sistemin optimizasyon sonrası bara gerilimleri incelediğinde en düşük gerilime sahip iki yük barasının 26 ve 30 numaralı baralar oldukları görülmektedir. Dolayısıyla bu baralara SVC ve STATCOM cihazları eklenerek gerilimlerinin 1 p.u değerine getirilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.2. IEEE 30 baralı test sistemine KDT eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları

Sistem Değişkeni	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Diferansiyel Gelişim	Yapay Arı Kolonisi
P_{gen1}	1.7614	1.7550	1.7528
P_{gen2}	0.4886	0.5013	0.4877
P_{gen3}	0.2153	0.2036	0.2066
P_{gen4}	0.2232	0.2258	0.2205
P_{gen5}	0.1229	0.1243	0.1262
P_{gen6}	0.1200	0.1201	0.1331
V_{gen1}	1.0500	1.0498	1.0500
V_{gen2}	1.0386	1.0367	1.0283
V_{gen3}	1.0122	1.0136	0.9950
V_{gen4}	1.0218	1.0224	1.0119
V_{gen5}	1.0500	1.0453	1.0499
V_{gen6}	1.0332	1.0314	1.0476
KDT_{6-9}	1.0314	0.9503	0.9871
KDT_{6-10}	0.9000	1.0642	0.9625
KDT_{4-12}	1.0417	1.0637	1.1000
KDT_{28-27}	0.9670	0.9470	1.0026
Maliyet (\$/h)	803.0340	802.9995	802.1399



Şekil 4.3. IEEE 30 baralı güç sisteminin KDT cihazı ile maliyet optimizasyonu



Şekil 4.4. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak KDT cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri

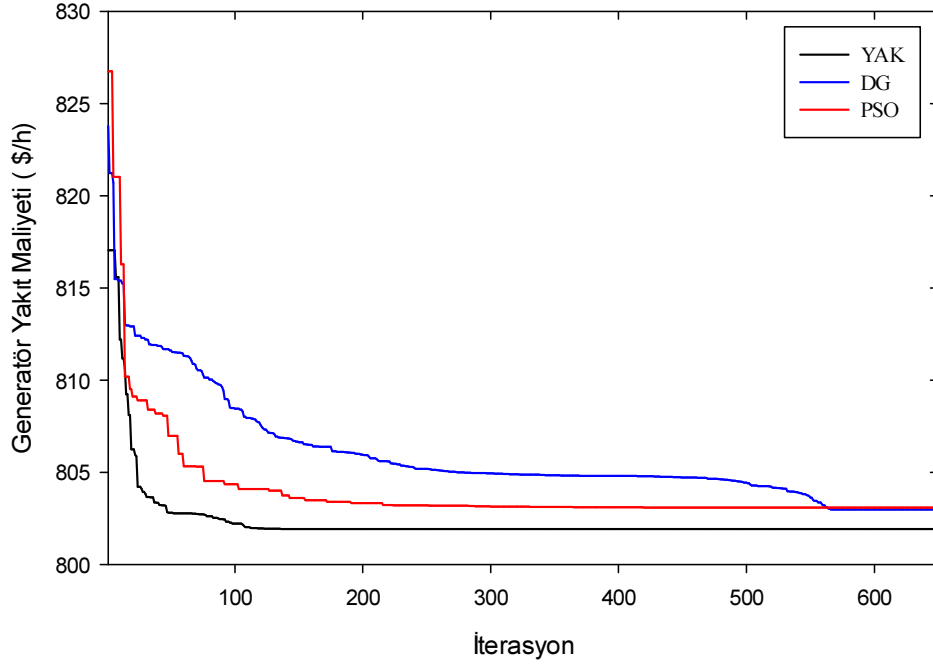
4.3. SİSTEME SVC CİHAZININ EKLENMESİ

IEEE 30 baralı güç sisteminde 26 ve 30 numaralı baralara SVC cihazı eklenmiş ve maliyet optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonuçları p.u. cinsinden Çizelge 4.3'te verilmiştir.

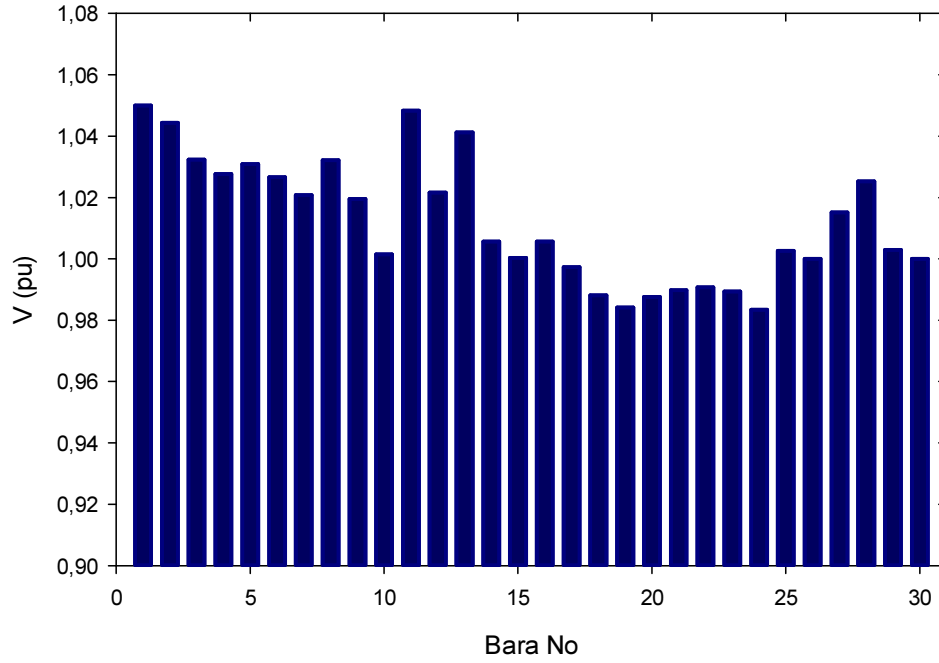
Şekil 4.5 ve 4.6'da görüldüğü üzere, FACTS cihazı olmayan sistemlere sisteme göre tüm baraların gerilim seviyeleri iyileştirilmiştir.

Çizelge 4.3. IEEE 30 baralı test sistemine SVC eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları

Sistem Değişkeni	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Diferansiyel Gelişim	Yapay Arı Kolonisi
P_{gen1}	1.7610	1.7771	1.7046
P_{gen2}	0.4886	0.5018	0.4931
P_{gen3}	0.2152	0.2160	0.2243
P_{gen4}	0.2230	0.2013	0.2612
P_{gen5}	0.1227	0.1082	0.1186
P_{gen6}	0.1200	0.1273	0.1200
V_{gen1}	1.0500	1.0499	1.0499
V_{gen2}	1.0393	1.0452	1.0443
V_{gen3}	1.0136	1.0206	1.0309
V_{gen4}	1.0233	1.0305	1.0321
V_{gen5}	1.0500	1.0310	1.0483
V_{gen6}	1.0471	1.0313	1.0411
B_{SVC26}	0.0442	0.0466	0.0398
B_{SVC30}	0.0533	0.0510	0.0458
Maliyet (\$/h)	803.0886	802.9840	801.9279



Şekil 4.5. IEEE 30 baralı güç sisteminin SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu



Şekil 4.6. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri

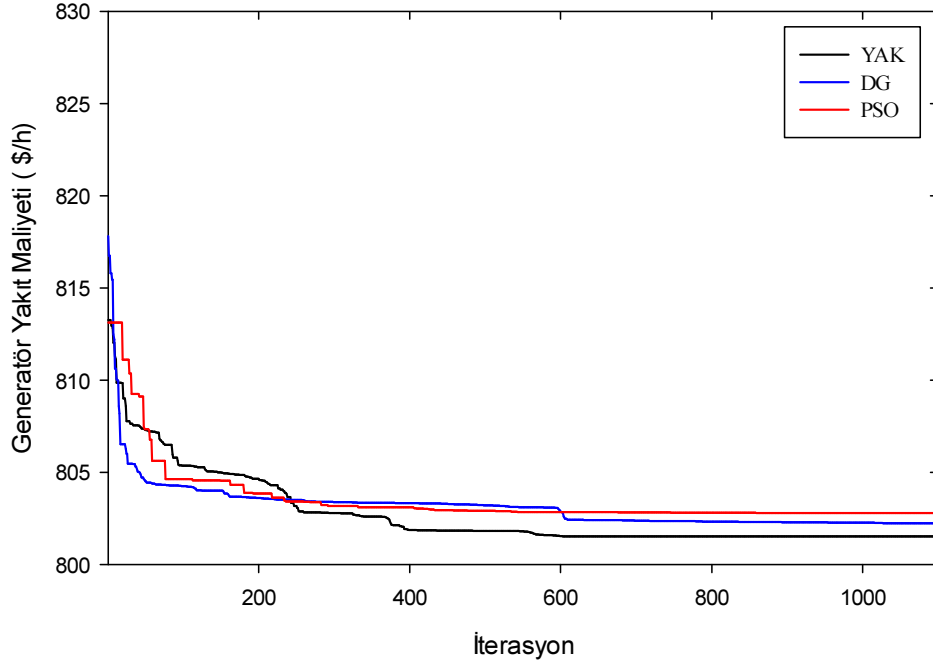
4.4. SİSTEME STATCOM CİHAZININ EKLENMESİ

IEEE 30 baralı güç sisteminde 26 ve 30 numaralı baralara STATCOM cihazı eklenmiş ve maliyet optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonuçları p.u. cinsinden Çizelge 4.4'de verilmiştir.

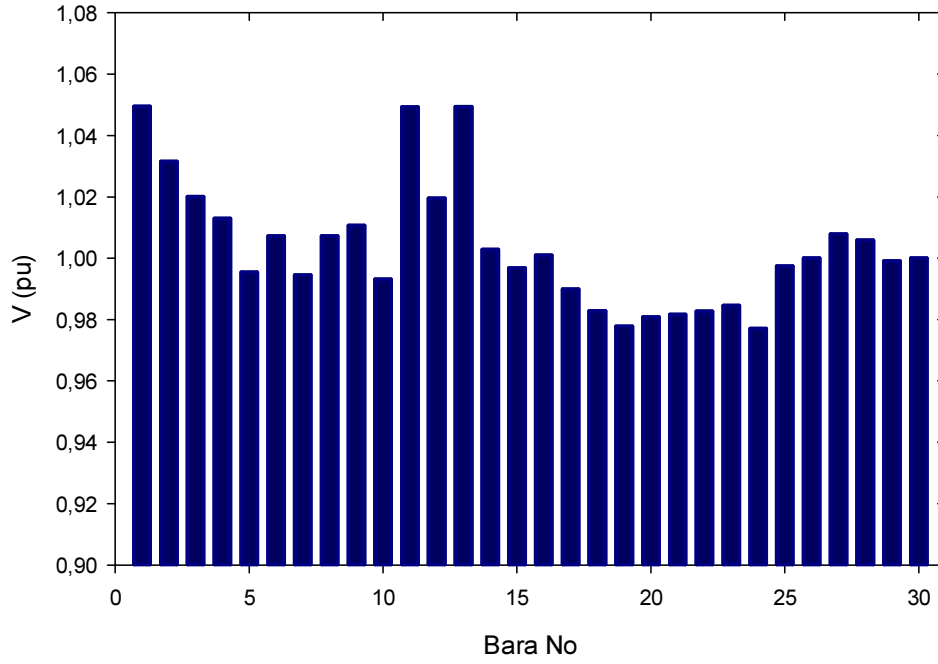
Şekil 4.7 ve 4.8'de görüldüğü üzere, FACTS cihazı olmayan sistemlere sisteme göre tüm baraların gerilim seviyeleri iyileştirilmiştir.

Çizelge 4.4. IEEE 30 baralı test sistemine STATCOM eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları

Sistem Değişkeni	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Diferansiyel Gelişim	Yapay Arı Kolonisi
P_{gen1}	1.7610	1.7617	1.7671
P_{gen2}	0.4886	0.4856	0.5006
P_{gen3}	0.2152	0.2145	0.2230
P_{gen4}	0.2230	0.2051	0.2160
P_{gen5}	0.1227	0.1407	0.1006
P_{gen6}	0.1200	0.1222	0.1200
V_{gen1}	1.0500	1.0488	1.0494
V_{gen2}	1.0393	1.0371	1.0315
V_{gen3}	1.0136	1.0079	0.9954
V_{gen4}	1.0233	1.0088	1.0072
V_{gen5}	1.0500	1.0458	1.0492
V_{gen6}	1.0471	1.0240	1.0493
$V_{STATCOM26}$	1.1928	1.1928	1.1928
$V_{STATCOM30}$	1.1633	1.1633	1.1633
Maliyet (\$/h)	803.0886	802.95817	801.86152



Şekil 4.7. IEEE 30 baralı güç sisteminin STATCOM cihazı ile maliyet optimizasyonu



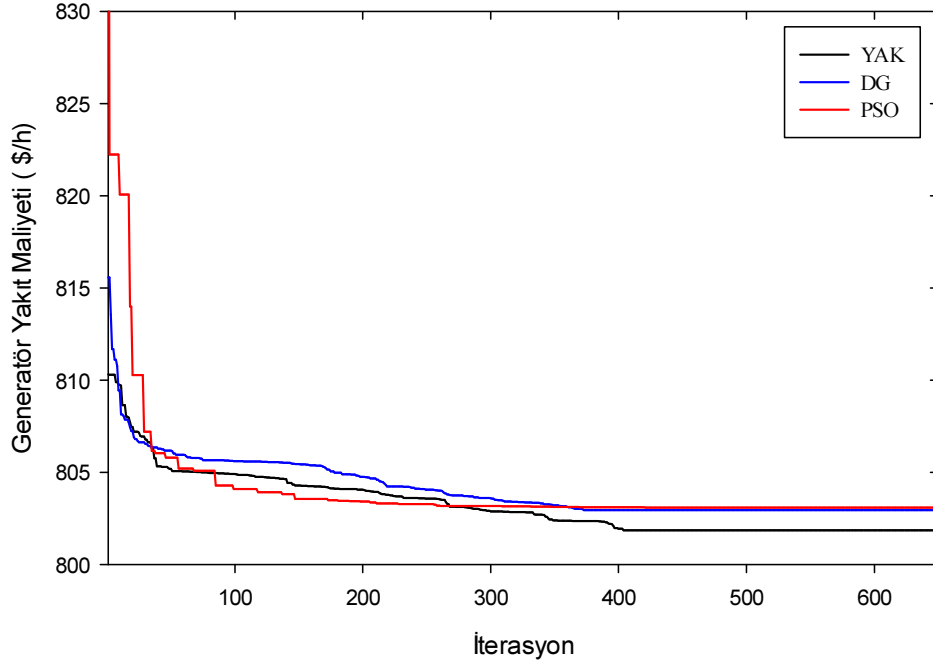
Şekil 4.8. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak STATCOM cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri

4.5. SİSTEME KDT VE SVC CİHAZLARININ EKLENMESİ

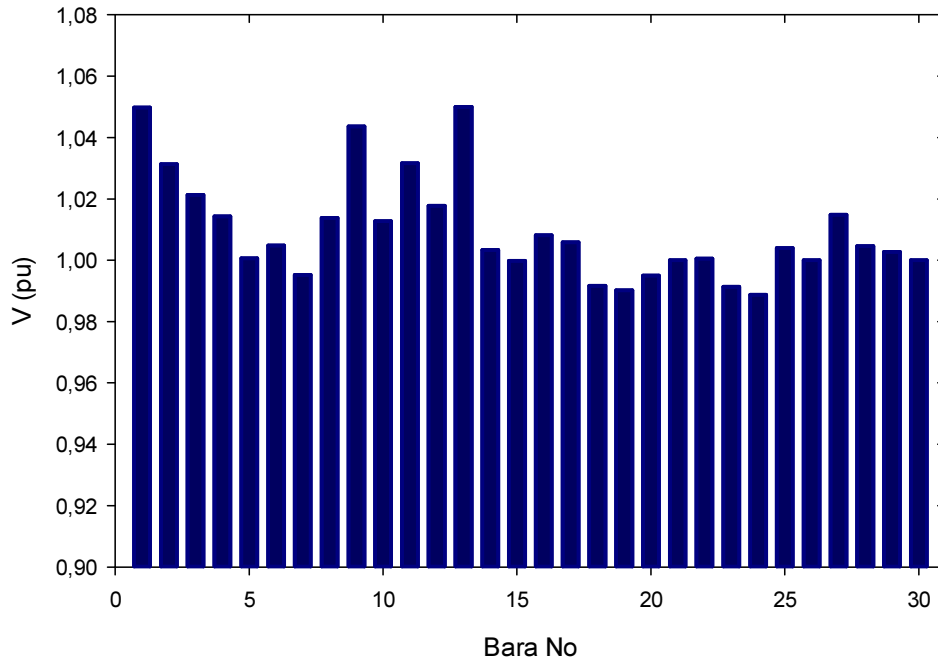
IEEE 30 baralı güç sistemine sırasıyla 6-9, 6-10, 4-12, 28-27 numaralı baralar arasında 4 adet KDT; 26 ve 30 numaralı baralara SVC eklenmiştir. Optimizasyon sonuçları p.u. cinsinden Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. IEEE 30 baralı test sistemine KDT ve SVC eklenerek gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları

Sistem Değişkeni	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Diferansiyel Gelişim	Yapay Arı Kolonisi
P_{gen1}	1.7611	1.7623	1.7785
P_{gen2}	0.4885	0.4877	0.4847
P_{gen3}	0.2152	0.2150	0.2176
P_{gen4}	0.2222	0.2210	0.2027
P_{gen5}	0.1225	0.1220	0.1220
P_{gen6}	0.1200	0.1200	0.1216
V_{gen1}	1.0499	1.0499	1.0497
V_{gen2}	1.0381	1.0381	1.0312
V_{gen3}	1.0111	1.0111	1.0006
V_{gen4}	1.0198	1.0197	1.0138
V_{gen5}	1.0499	1.0499	1.0316
V_{gen6}	1.0499	1.0499	1.0500
KDT_{6-9}	1.0211	1.0212	0.9000
KDT_{6-10}	0.9000	0.9000	0.9976
KDT_{4-12}	1.0311	1.0313	1.0285
KDT_{28-27}	0.9846	0.9845	0.9828
$BSVC_{26}$	0.0330	0.0310	0.0361
$BSVC_{30}$	0.0392	0.0398	0.0468
Maliyet (\$/h)	802.77300	802.17584	801.52397



Şekil 4.9. IEEE 30 baralı güç sisteminin KDT ve SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu



Şekil 4.10. IEEE 30 baralı güç sisteminin YAK algoritması kullanarak KDT ve SVC cihazı ile maliyet optimizasyonu sonrası bara gerilimleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında literatürde kabul görmüş bir test sistemi olan IEEE 30 baralı güç sisteminin generatör üretim maliyeti ve yük baralarının gerilim değerleri gerekli görülen baralara FACTS cihazları eklenerek optimize edilmiştir. Her durum için iterasyon grafikleri ve optimizasyon sonuçları ile birlikte en iyi sonuca ulaşan parametrelere ait optimizasyon sonrası yük baraları gerilim değerleri verilmiştir.

Bulgular incelenirse; kademe değiştirici transformatör, statik var kompanzator ve statik senkron kompanzator cihazlarının sistemin toplam üretim maliyetini önemli ölçüde düşürdüğü ve yük baralarının gerilimlerine olumlu yönde etki ettiği görülebilmektedir.

Optimizasyon sonuçları ve iterasyon grafikleri irdelediğinde optimizasyon metotlarının iterasyon bakımından birbirlerine olan üstünlükleri tartışmaya açıktır. Çünkü başlangıç parametrelerinin rastgele seçilmesi sebebiyle optimal değere yakınsaması için gereken iterasyon sayısı değişebilmektedir. Fakat yapay arı kolonisi algoritmasının yakınsama süresinin daha uygun olduğu ve parametreler durağan duruma geldiği anda optimizasyon sonuçlarının birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Optimizasyon amacıyla kullanılan üç yöntem arasında yapay arı kolonisi algoritmasının en iyi sonuca ulaştığı gözlenebilir. Bununla birlikte diferansiyel gelişim ve parçacık sürü optimizasyonu metotlarının da optimizasyonu başarıyla gerçekleştirdikleri gözlenmiştir.

Ayrıca gerilim grafikleri incelenirse en düşük gerilime sahip iki yük barasına FACTS cihazları eklenmesinin diğer yük bara gerilimlerine de olumlu yönde etki yaptığı izlenebilir. Hem kademe değiştirici transformatör hem de statik var kompanzator cihazı içeren sistemin optimizasyon sonuçlarının, cihaz içermeyen ve tek cihaz içeren sistemin optimizasyon sonuçlarına nazaran daha iyi olduğu açıkça görülebilmektedir.

Bu çalışmada FACTS cihazları ve kademe değiştirici transformatörlerin klasik bir güç sistemi üzerinde seçilen baralara sabit olarak yerleştirilmesi ile generatör maliyeti ve enerji kalitesinin en uygun seviyeye getirilmesi amaçlanmıştır. Yakın gelecekte, gün geçtikçe fosil yakıtların tükenmesi ve yenilenebilir enerji

sistemlerine önem verilmeye başlanması ile, özellikle rüzgar türbini gibi yenilenebilir enerji kaynakları içeren güç sistemlerinde, generatörlerin maliyet optimizasyonunun yanı sıra generatörlerin, kontrolörlerin ve FACTS cihazlarının güç sistemi üzerine optimal biçimde yerleştirilmesini hedefleyen akademik çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Machowski, J, Janusz, W. and Bumby J., "Power Systems Dynamics and Stability", John Wiley and Sons, New York, 512s., (1997).
- [2] Hingorani, N. G., "Flexiable AC Transmission", IEEE Spectrum, 40-45, April 1993.
- [3] Song, Y. H. and Jones, A.T., "Flexiable AC Transmission Systems (FACTS)", IEEE Power and Energy Series, England, 592 s., (1999).
- [4] Hingorani, N. G., "Understanding FACTS", IEEE Press, New York, 432 s., (1999).
- [5] Noroozian, M. and Anderrson, G. "Power flow control by use of controllable series components", IEEE Transactions on Power Delivery, 8(3): 1420-1429, (1993).
- [6] Gotham, D. J. and Heydt, G. T. "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices", IEEE Transactions on Power Systems, 13(1): 60-65, (1998).
- [7] Tjing, T. L. and Wanhong, D. "Optimal flexible AC transmission systems (FACTS) devices allocation", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 19(2): 125-134, (1997).
- [8] Ge, S. Y. and Chung, T. S. "Optimal active power flow incorporating power flow control needs in Flexible AC transmission systems", IEEE Transactions on Power Systems, 14(2): 738-744, (1999).
- [9] Fuerte-Esquivel, C. R. and Acha, E. "A newton type algorthim for the Control of power flow in electrical power networks", IEEE Transactions on Power Systems, 12(4): 1474-1480, (1997).
- [10] Wood, A. J and Wollenberg, B. F., "Power Generation Operation and Control, 2nd ed", John Wiley and Sons, New York, 427 s., (1996).
- [11] Arrillaga, J and Arnold, C. P., "Computer Analysis of Power Systems", John Wiley and Sons, Chichester, 516 s., (1990).
- [12] Dommel, H. W. and Tinney, W. F. "Optimal power flow solutions", IEEE Transactions, PAS-87: 1866-1876, (1968).
- [13] Alsac, O. and Stott, B. "Optimal load flow with steady state security", IEEE Transactions, PAS-93: 745-751, (1974).

- [14] Kalyani, R. P., Crow, M. L., Tauritz, D. R., "Optimal placement and control of unified power flow control devices using evolutionary computing and sequential quadratic programming", Power Systems Conference and Exposition Proceedings, Atlanta Georgia, 959-964, (2006).
- [15] Ching-Tzong, S., Guor-Rung, L. and Tauritz, D. R., "Reliability optimization design of distribution systems via multi-level hierarchical procedures and generalized reduced gradient method", Energy Management and Power Delivery Conference Proceedings, Singapur, 180-185, (1995).
- [16] Rong-Mow, J. and Nanming, C. "Application of the fast Newton-Raphson economic dispatch and reactive power/voltage dispatch by sensitivity factors to optimal power flow", IEEE Transactions on Energy Conversion, 10: 293-301 (1995).
- [17] Kuzle, I., Zdrilic, M. and Pandzic, H., "Virtual power plant dispatch optimization using linear programming", Environment and Electrical Engineering Conference Proceedings, Croatia, 1-4, (2011).
- [18] Shoults, R. R., Sun, D. T. "Optimal power flow based upon p-q decomposition", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 101: 397-405, (1982).
- [19] Karaboğa, D., Baştürk, B. "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm", Applied Software Computing, 8: 687-697 (2008).
- [20] Akay, B. and Karaboğa, D., "Parameter tuning for the artificial bee colony algorithm", International Conference on Computational Collective Intelligence Technologies and Applications Proceedings, Poland, 608-619, (2009).
- [21] Bala, J. L., Thanikachalam, A. "An improved second order method for optimal load flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 97: 1239-1244 (1978).
- [22] Miranda, V., Srinivasan, D. and Proenca, L.M. "Evolutionary computation in power systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 20(2): 89-98, (1998).
- [23] Fogel, D. B., "What is Evolutionary Computation", IEEE Spectrum, 7 s, (2000).

- [24] Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley, Reading, 432 s., (1989).
- [25] Michalewicz, Z., "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer Verlag, New York, 387 s., (1992).
- [26] Fogel, D. B. "Evolutionary computation", IEEE Transactions on Neural Networks, 5(1): 3-14, (1994).
- [27] Philip, R. "Flow of energy", American Institute of Electrical Engineerings Transactions, 1(1): 779-808, (1915).
- [28] McGillis, D. "Nodal iterative solution of power-flow problem using IBM 604 digital computer", Power Apparatus and Systems, 76(3): 803-809, (1957).
- [29] Ness, W. "Convergence of iterative load-flow studies", Power Apparatus and Systems, 78(4): 1590-1595, (1959).
- [30] Peschon, J., Piercy, D. S., Tinney, W. F. "Optimum control of reactive power", Power Apparatus and Systems, 87(1): 40-48, (1968).
- [31] Wasley, R. G., Shlash, M. A. "Newton-Raphson algorithm for 3-phase load flow", Proceedings of the Institution of Electrical Engineers , 121(7): 630-638, (1974).
- [32] Taylor, C. W., "Power System Voltage Stability", McGraw Hill, New York, 273s., (1994).
- [33] Abacı, K., "Gerilim Kararlılığı İyileştiricilerinin Çatallaşma ve Kaotik Analizleri", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 148 s., (2007).
- [34] Karaboğa, D., "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları", Nobel Yayın, Ankara, 231 s., (2011).
- [35] Yang, G. Y., Dong, Z. Y., Wong, K. P. "A modified differential evolution algorithm with fitness sharing for power system planning", IEEE Transactions on Power Systems, 23(2): 514-522, (2008).
- [36] Vlachogiannis, J. G., Lee, K. Y. "A comparative study on particle swarm optimization for optimal steady-state performance of power systems", IEEE Transactions on Power Systems, 21(4): 1718-1728, (2006).
- [37] Abacı, K., Yamaçlı, V., Akdağlı, A. "Optimal power flow with SVC devices by using artificial bee colony algorithm", Turkish Journal of Electrical

- Engineering & Computer Sciences, Accepted DOI: 10.3906/elk-1305-55, (2013).
- [38] Custem, V. T., Vournas, C., "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 378., (1998).
- [39] Wang Y., "Power System Load Modelling", Preliminary report, prepared for Transpower NZ Ltd, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Auckland, (1997).
- [40] Chiou C. Y., Tsang, C. H. and Kao W. S. "Dynamic Load Modelling in Taipower System Stability Studies" IEEE Transaction on Power Systems, 10(2): 907-913, (1995).
- [41] Faur Z. T., "Effects of FACTS devices on Static Voltage Collapse Phenomenon", Waterloo Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ontario, 88 s., (1996).
- [42] Arifoğlu, U., "Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi", Alfa Yayınları, İstanbul, 231 s., (2002).
- [43] Ertay, M. M., Aydoğmuş, Z. "STATCOM ile bir enerji iletim sisteminde gerilim kontrolü" Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21: 91-105, (2010).
- [44] Acha, E., Agelidis, V. G., Anaya-Lara, O., Miller, T. J. E., "Power Electronic Control in Electrical Systems", Newnes Press, Oxford, 443 s., (2002).
- [45] Uzunovic, E., Canizares, C. A., Reeve, J., "Fundamental frequency model of static synchronous compensator", North American Power Symposium Proceedings, Wyoming, 49-54, (1997).
- [46] Glover, J. D. and Sarma, M., "Power System Analysis and Design, 2nd ed.", IEEE Press, New Jersey, 583 s., (2003).
- [47] Saadat, H., "Power System Analysis", McGraw Hill, Milwaukee, 697 s., (1999).
- [48] Yalçın, M., "Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 121 s., (1995).
- [49] Kundur, P., Balu, J. N., Lauby G. M., "Power System Stability and Control", McGraw Hill, New York, 1176 s., (1994).

- [50] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambirez-Perez, H., Angeles-Camacho, C., "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley and Sons, Chicester, 403 s., (2004).
- [51] Cook, S. A. "An overview of computational complexity", *Communication of the ACM*, 26(6): 401-408, (1983).
- [52] Karaboğa, D., Baştürk, B. "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm", *Journal of Global Optimization*, 26: 959-971, (2007).
- [53] Varadarjan, M., Swarup, K. S. "Solving multi-objective optimal power flow using differential evolution", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2(8): 720-730, (2008).
- [54] Zhao, B., Guo, C. X., Cao, Y. J. "A multi-agent based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch", *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2): 1070-1078, (2005).

EKLER

Ek-1 IEEE 30 Baralı Güç Sistemi Bilgileri

Çizelge Ek-1.1. IEEE 30 baralı güç sisteminin hat bilgileri

Hat No	Baradan	Baraya	R (p.u)	X (p.u)	B/2 (p.u)
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0204
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0184
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0102
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0085
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0045
11	6	9	0.0	0.2080	0.0
12	6	10	0.0	0.5560	0.0
13	9	11	0.0	0.2080	0.0
14	9	10	0.0	0.1100	0.0
15	4	12	0.0	0.2560	0.0
16	12	13	0.0	0.1400	0.0
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0
21	16	17	0.0824	0.1932	0.0
22	15	18	0.1073	0.2185	0.0
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0

Çizelge Ek-1.1. (Devam)

26	10	17	0.0324	0.0845	0.0
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0
36	28	27	0.0	0.3960	0.0
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0214
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0065

Çizelge Ek-1.2. IEEE 30 baralı güç sisteminin yük bilgileri

Bara No	Bara Tipi	Yük	
		P (WM)	Q (MVAR)
1	Salınım Barası	0.0	0.00
2	Generatör Barası	21.7	12.70
3	Yük Barası	2.4	1.20
4	Yük Barası	67.6	1.60
5	Generatör Barası	34.2	19.00
6	Yük Barası	0.0	0.00
7	Yük Barası	22.8	10.9

Çizelge Ek-1.2. (Devam)

8	Generatör Barası	30.0	30.0
9	Yük Barası	0.0	0.0
10	Yük Barası	5.8	2.0
11	Generatör Barası	0.0	0
12	Yük Barası	11.2	7.5
13	Generatör Barası	0.0	0.0
14	Yük Barası	6.2	1.6
15	Yük Barası	8.2	2.5
16	Yük Barası	3.5	1.8
17	Yük Barası	9.0	5.8
18	Yük Barası	3.2	0.9
19	Yük Barası	9.5	3.4
20	Yük Barası	2.2	0.7
21	Yük Barası	17.5	11.2
22	Yük Barası	0.0	0.0
23	Yük Barası	3.2	1.6
24	Yük Barası	8.7	6.7
25	Yük Barası	0.0	0.0
26	Yük Barası	3.5	2.3
27	Yük Barası	0.0	0.0
28	Yük Barası	0.0	0.0
29	Yük Barası	2.4	0.9
30	Yük Barası	10.6	1.9

Çizelge Ek-1.3. IEEE 30 baralı güç sistemi generatör aktif güç ve gerilim limitleri ile yakıt maliyeti fonksiyonu katsayıları

Generatör	Bara No	V_G^{\min} (p.u)	V_G^{\max} (p.u)	P_G^{\min} (MW)	P_G^{\max} (MW)	Maliyet Katsayıları		
						a	b	c
1	1	0.95	1.05	50	200	0	2.00	0.00375
2	2	0.95	1.05	20	80	0	1.75	0.01750
3	5	0.95	1.05	15	50	0	1.00	0.06250
4	8	0.95	1.05	10	35	0	3.25	0.00834
5	11	0.95	1.05	10	40	0	3.00	0.02500
6	13	0.95	1.05	12	40	0	3.00	0.02500

ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: Volkan YAMAÇLI

Doğum Tarihi: 31/05/1987

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	Abdulkerim Bengi AL.	2001-2005
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Mersin Üniversitesi	2007-2011
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Mersin Üniversitesi	2011-

Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Arş. Gör.	Mersin Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Elektronik Ana Bilim Dalı	2011-

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Abacı, K., Yamaçlı, V., Akdağlı, A. "Optimal power flow with SVC devices by using artificial bee colony algorithm", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Accepted DOI: 10.3906/elk-1305-55, (2013).
2. Toktaş, A., Akdağlı, A., Biçer, M. B., Özdemir, C ., Yamaçlı, V. "A comparative study for slot-loaded compact microstrip antennas by using methods based on FDTD, FEM and MoM", International Journal of Research in Computer and Communication Technology, 2: 920-924, (2013).
3. Yamaçlı, V., Abacı, K., "İletim sistemlerindeki aktif güç kaybının sezgisel yöntemlerle minimizasyonu", 3. Elektrik Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, İzmir, 242-248, (2013).
4. Abacı, K., Tuğal, M. A., Yamaçlı, V., "AC ve statik tip uyarım sistemlerinde güç sistem stabilizerlerinin kararlılığa etkisinin araştırılması", 3. Elektrik Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, İzmir, 249-256, (2013).

- 5.** Abacı, K., Tuğal, M. A., Yamaçlı, V., "Doğru akım, alternatif akım ve statik tip uyarım sistemlerinin performanslarının analizi", 5. Enerji Verimliliği Sempozyumu Bildiri Kitabı, Kocaeli, 167-170, (2013).
- 6.** Abacı, K., Tuğal, M. A., Yamaçlı, V., "AC2A ve ST1A tipi uyarım sistemi modellerinin gerçekleştirilmesi", 5. Enerji Verimliliği Sempozyumu Bildiri Kitabı, Kocaeli, 266-270, (2013).
- 7.** Yamaçlı, V., Abacı, K., "PIC tabanlı reaktif güç rölesi ve kompanzasyon sisteminin gerçekleştirilmesi ve simülasyonu", 2. Elektrik Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, İzmir, 469-475, (2011).
- 8.** Yamaçlı, V., Abacı, K., Köse, E., "Realization and simulation of Chua's circuit", 6th International Advanced Technologies Symposium Proceedings, Elazığ, 82-86, (2011).