

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE
AKILLI GERİLİM KONTROL YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Merve GÜLERYÜZ HALAÇLI

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

NİSAN 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE
AKILLI GERİLİM KONTROL YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Merve GÜLERYÜZ HALAÇLI
(504102007)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN

NİSAN 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504102007 numaralı Doktora Öğrencisi Merve GÜLERYÜZ HALAÇLI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE AKILLI GERİLİM KONTROL YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan HOCAOĞLU
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Prof. Dr. Murtaza FARSADI
İstanbul Aydın Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi H. Lale ZEYNELGİL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 11 Şubat 2021
Savunma Tarihi : 21 Nisan 2021



Sevgili aileme ve değerli hocam Prof.Dr. Ayşen DEMİRÖREN'e,



ÖNSÖZ

Lisans bitirme tezimden itibaren tüm akademik çalışmalarımı yöneten ve çalışmalarım sırasında bana her türlü desteği veren değerli hocam Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca bana duyduğu güven ve pozitif yaklaşımı ile cesaretimi arttıran, hayatımdaki yeri farklı olan sevgili hocama, bana gösterdiği engin hoşgörüsü için de ayrıca teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca beni sabırla dinleyip, vizyon ve tecrübeleriyle ile tezimin gelişmesini sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK'a ve Prof. Dr. Hakan HOCAOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamı destekledikleri ve gerekli sistem verilerini bizimle paylaştıkları için Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş. eski Genel Müdürü Mehmet İSLAMOĞLU'na, Yük Tevzi Müdürü Mehmet GÖNEN ve Elk. Müh. Mesut Can KÖROĞLU'na teşekkürü borç bilirim. Sarıyer ilçesine ait ısıtım ve sıcaklık değerlerini Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin etmemi sağlayan Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN'e ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Beni mutlu bir aile ortamında yetiştiren, eğitimim için her türlü özveride bulunan ve akademik çalışmaya en başından beri teşvik eden anneme ve babama; çalışmama manevi desteği ile katkıda bulunan kardeşlerime ve son olarak da, akademik hedeflerimi her koşulda destekleyen ve bu çalışma ile birlikte hayatın her alanında yanımda olan eşime ve tezimle birlikte büyüyen, süreci birlikte tecrübe ettiğimiz oğluma ve kızıma en içten teşekkür ve minnet duygularıyla...

Şubat 2021

Merve GÜLERYÜZ HALAÇLI
(Elektrik Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xii
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bakış	1
1.2 Tezin Kapsamı ve Amacı	2
1.3 Literatür Araştırması	6
1.4 Tezin İçeriği	9
2. DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMİ İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE GERİLİM KONTROLU	11
2.1 Dağıtım Şebekelerinde Gerilim Kontrolü	11
2.1.1 Bölgesel reaktif güç kontrolü	12
2.1.2 Üretim kısıtlaması	12
2.1.3 Aktif gerilim kontrolü	13
2.2 Dağıtık Üretim Sistemlerinin Dağıtım Şebekelerinde Gerilim Profiline Etkisi	14
2.3 Dağıtık Üretim Sistemi İçeren Şebekelerde Gerilim Profilini Etkileyen Faktörler	15
2.3.1 Yük profili	16
2.3.2 Fiderin iletken karakteristikleri	17
2.3.3 Kaynak gerilim seviyesi	18
2.3.4 DÜS'ün konumu	19
2.3.5 DÜS'ün çıkış gücü	20
2.3.6 DÜS'lerin dağılımı	21
3. FOTOVOLTAİK SİSTEM EVİRİCİLERİNİN STATCOM OLARAK KONTROLÜ	23
3.1 Fotovoltaik Hücre Elektriksel Modeli	23
3.2 OpenDSS PV Sistem modeli	25
3.3 Statik Senkron Kompanzator	26
3.3 Fotovoltaik Sistem Eviricilerinin STATCOM olarak kontrolü (PV-STATCOM)	27
3.4.1 PV-STATCOM'un işletme modeli	28
4. PV-STATCOM İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE VOLT/VAR OPTİMİZASYON PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ	31

4.1 Çoklu-Amaç Fonksiyonu.....	31
4.2 İşletme Sınırları.....	33
5. OPTİMİZASYON PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR.....	35
5.1 Ateş Böceği Algoritması.....	35
5.1.1 Ateş Böceklerinin davranışı.....	35
5.1.2 Ateş Böceği algoritması.....	36
5.1.3 Işık yoğunluğu ve çekicilik.....	36
5.2 Lévy Ateş Böceği Algoritması.....	38
5.3 Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritması.....	38
5.3.1 Mutasyon stratejisi.....	39
5.3.2 Parametrelerde yapılan değişiklikler.....	39
5.3.2.1 α 'nın adaptif olarak ayarlanması.....	39
5.3.2.2 Çekiciliğin modifikasyonu.....	40
5.3.3 Güncellenmiş formül modifikasyonu.....	40
5.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu.....	41
6. VOLT/VAR KONTROL PROBLEMİNİN MLAA İLE ÇÖZÜMÜ.....	45
7. UYGULAMA ÇALIŞMALARI.....	49
7.1 Örnek Dağıtım Şebekesinin Tanıtımı.....	49
7.2 1 MW'lık Fotovoltaik Güneş Santralinin Maliyeti.....	51
7.3 İncelenen 3 Senaryo.....	52
7.4 Simülasyon Sonuçları.....	53
7.4.1 Yüklenme faktörünün etkisinin araştırılması.....	60
7.4.2 Ağırlıklandırma katsayılarının etkilerinin araştırılması.....	67
7.4.3 MLAA'nın etkinliğinin diğer algoritmalarinkine ile karşılaştırılması.....	67
7.4.4 Bulutlanma etkisinin araştırılması.....	69
7.4.5 Işınım etkisinin araştırılması.....	70
8. SONUÇLAR.....	73
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	85

KISALTMALAR

AA	: Ateş Böceği Algoritması
AG	: Alçak Gerilim
BEDAŞ	: Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş.
DA	: Doğru Akım
DÜS	: Dağıtık Üretim Sistemi
EPIAŞ	: Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
GF	: Güç Faktörü
MLAA	: Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritması
MPP	: Maksimum Güç Noktası
OG	: Orta Gerilim
OLTC	: Yük Altında Kademe Değiştirici Transformatör
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
PV	: Fotovoltaik
SVC	: Statik VAr Kompanzatör
SKF	: Sermaye Koruma Faktörü
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyon
YG	: Yüksek Gerilim



SEMBOLLER

A	: Diyot idealitesi
c₁, c₂	: Öğrenme faktörleri
f	: Faiz oranı
Fiyat p	: Birim aktif enerji bedeli
Fiyat q	: Birim reaktif enerji bedeli
gbest	: bütünsel en iyi konum
I_{maks}	: Kablonun akım taşıma kapasitesi
I_{ph}	: Güneş ışığı tarafından üretilen elektrik akımı
I_{t,i}	: i. hattan t. saatte akan akım
Iter_{maks}	: Maksimum iterasyon sayısı
I₀	: Diyotun doyma akımı
I₀	: Ateş böceğinin orijinal ışık yoğunluğu
İŞL&BAK_{FV}	: Santralin kW başına düşen senelik işletme bakım maliyeti
J	: Hurda oranı
k	: Boltzmann sabiti (1.381×10^{-23} J/K)
L	: İletkenin uzunluğu
M_{EN}	: İndirici merkezden çekilen enerjinin masrafı
MİŞL-BAK	: Fotovoltaik güneş santralının işletme ve bakım masrafı
M_{HUR}	: Fotovoltaik güneş santral ekipmanlarının hurda bedeli
M_{YAT-PV}	: Fotovoltaik güneş santrali kurulum maliyeti
M_{YAT-PVSTATCOM}	: PV-STATCOM kontrolör maliyeti
M_x, M_y, M_{xy}	: Moment Bileşenleri
N_A	: Ateş böceği sayısı
N_B	: Bara sayısı
N_K	: Kablo sayısı
N_{PV-STATCOM}	: PV-STATCOM sayısı
Ö	: Fotovoltaik güneş santralının ömrü
pbest_i	: i. parçacığın en iyi konumu
P_g	: DÜS'ün aktif gücü
P_{mpp}	: Maksimum güç noktasındaki güç
P_{S-PV}	: Fotovoltaik güneş santrallerinin toplam kurulu gücü
P_{tr}	: İndirici merkezden çekilen aktif güç
P_{yük}	: Yükün aktif gücü
P_z	: Kayıp güç
q	: İletken kesiti
q	: Elektron yükü ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
Q_g	: DÜS'ün reaktif gücü
Q_{tr}	: İndirici merkezden çekilen reaktif güç
Q_{yük}	: Yükün reaktif gücü
r_{ij}	: i. ve j. ateş böceği arasındaki mesafe
R	: İletken direnci
T	: Santralin bir yıllık çalışma süresi (8760 saat)

T_c	: Fotovoltaik hücre sıcaklığı Kelvin cinsinden (0K)
t_{maks}	: Maksimum iterasyon sayısı
V^{min}, V^{maks}	: Bara gerilim genliklerinin alt ve üst sınırları
Y_{PV}	: Fotovoltaik güneş santralının kW başına düşen kurulum maliyeti
Z	: İletken empedansı
w_1, w_2	: Amaç fonksiyonlarının ağırlık katsayıları
w_{min}, w_{maks}	: Atalet ağırlığının minimum ve maksimum değeri
x_{best}^t	: t. iterasyonda en iyi ateş böceğinin konumu
x_{mi}^t	: i. ateş böceğinin mutantı olan ateşböceğinin, t. iterasyondaki konumu
x_i^t	: i. ateş böceğinin, t. iterasyondaki konumu
X	: İletken reaktansı
x_0	: İletkenin birim reaktansı
α	: Rastgeleleştirme parametresi
β	: Çekicilik parametresi
γ	: Ortamın soğurma parametresi
$\varnothing$	: Yük empedansının açısı
χ	: İletkenin öz iletkenlik katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : 12 baralı test sistemi verileri	16
Çizelge 2.2 : Farklı yük yoğunluklarında toplam hat kayıpları.....	17
Çizelge 2.3 : Farklı direnç değerleri için kayıplar	18
Çizelge 2.4 : DÜS'ün farklı konumları için toplam hat kayıpları	19
Çizelge 2.5 : DÜS'lerin çıkış gücü	20
Çizelge 2.6 : Farklı DÜS güçleri için kayıplar	21
Çizelge 2.7 : Farklı DÜS dağılımları için hat kayıpları	21
Çizelge 7.1 : Yük karakteristikleri.	50
Çizelge 7.2 : Kabloların direnç, reaktans ve kapasitans değerleri.	50
Çizelge 7.3 : PV santrallerin kurulu güçleri ve bağlandığı bara numaraları.....	51
Çizelge 7.4 : 1 MW kurulu güce sahip PV santralin toplam yatırım maliyeti	51
Çizelge 7.5 : MLAA'nın parametre değerleri	57
Çizelge 7.6 : Üç senaryo için günlük toplam dağıtım kayıpları ve maliyet	59
Çizelge 7.7 : Temel duruma göre Senaryo 2 ve Senaryo 3'teki kayıp ve maliyetlerdeki iyileşme miktarı	60
Çizelge 7.8 : Tüm durumlar için günlük toplam kayıplar, maliyetler ve iyileşme miktarı.....	62
Çizelge 7.9 : Kayıp ve maliyet amaç fonksiyonları için ağırlık katsayılarının farklı kombinasyonları ile edinilen sonuçlar	67
Çizelge 7.10 : Farklı algoritmalar için 20 deneme ile elde edilen sonuçlar.....	68
Çizelge 7.11 : Algoritmaların 20 deneme ile elde edilen başarı yüzdeleri.....	69
Çizelge 7.12 : Hava bulutsuz ve bulutlu iken günlük toplam kayıp ve maliyet	70



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Önerilen yöntemin genel yapısı.....	5
Şekil 2.1 : İki baralı test sistemi.....	14
Şekil 2.2 : Çalışılan IEEE 12-baralı radyal test sistemi.....	16
Şekil 2.3 : Farklı yüklenme durumlarındaki gerilim profilleri.....	16
Şekil 2.4 : Farklı direnç değerleri için gerilim profilleri	18
Şekil 2.5 : Farklı kaynak gerilim seviyeleri için gerilim profilleri	18
Şekil 2.6 : DÜS'ün farklı konumları için gerilim profilleri	19
Şekil 2.7 : Farklı DÜS güçleri için gerilim profilleri	20
Şekil 2.8 : Farklı DÜS dağılımları için gerilim profilleri	21
Şekil 3.1 : Fotovoltaik hücreye ait eşdeğer devre	23
Şekil 3.2 : PV sistemin OpenDSS'teki blok diyagram modeli	25
Şekil 3.3 : STATCOM'un genel yapısı	26
Şekil 3.4 : STATCOM'a ait V-I karakteristiği	27
Şekil 3.5 : STATCOM olarak kontrol edilen akıllı PV eviricinin işletme şekilleri	29
Şekil 3.6 : 10 kVA'lık bir PV-STATCOM'a ait aktif güç üretimi ve reaktif güç kapasitesi.....	29
Şekil 6.1 : Önerilen yöntemin akış şeması	45
Şekil 7.1 : İstanbul-Sarıyer ilçesine ait örnek dağıtım şebekesinin tek kutuplu bağlama şeması	49
Şekil 7.2 : Farklı tüketici türleri için günlük yük talepleri. (a) Aktif güç (b) Reaktif güç	53
Şekil 7.3 : Sarıyer'e ait 12.06.2018 tarihli güneş ışınımı ve sıcaklık verileri	54
Şekil 7.4 : 12.06.2018 tarihinde, farklı kurulu güçlerdeki PV-STATCOM'lara ait aktif güç üretimleri ve reaktif güç enjeksiyon/emilim kapasiteleri	55
Şekil 7.5 : 12.06.2018 tarihi için gün öncesi market fiyatları	56
Şekil 7.6 : 12.06.2018 günü için PV-STATCOM'lara ait saatlik optimal reaktif güç çizelgelemesi	57
Şekil 7.7 : Değişik senaryoların gün boyunca aktif güç kayıplarına etkisi	58
Şekil 7.8 : Değişik senaryoların maliyete etkisi	59
Şekil 7.9 : En kritik baranın üç farklı senaryo altındaki gerilim profili	60
Şekil 7.10 : Durum 1 ($\lambda=1.2$) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi	63
Şekil 7.11 : Durum 2 ($\lambda=0.8$) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi	63
Şekil 7.12 : Durum 3 ($\lambda=0.5$) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi	64
Şekil 7.13 : Durum 4 (GF=0,98) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi.....	65
Şekil 7.14 : Aşırı yüklenme koşulları altında ($\lambda=1.2$) Bara-34'ün gerilim profili ...	66
Şekil 7.15 : Çok hafif yüklenme koşulları altında ($\lambda=0.5$) Bara-34'ün gerilim profili	66
Şekil 7.16 : Tamamen güneşli (bulutsuz) ve bulutlu hava koşullarında normalize edilmiş fotovoltaik üretimi	69
Şekil 7.17 : Bulutlanma etkisinde Bara-34'ün gerilim profili	70
Şekil 7.18 : Farklı ışınım düzeylerinde günlük toplam kayıp değerleri	71

Şekil 7.19 : Farklı ışınlm düzeylerinde günlük toplam maliyet değerleri	71
Şekil 7.20 : Farklı ışınlm düzeylerinde Bara 34'ün gerilim profili	72



DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE AKILLI GERİLİM KONTROL YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Nüfus artışı, sanayileşme ve ekonomik büyüme nedeniyle dünya genelinde elektrik enerjisine olan gereksinim her geçen gün giderek artmaktadır. Fosil yakıtların arzının sınırlı olması ve bu yakıtların kullanımından doğan küresel iklim değişikliği problemi, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminin yaygınlaşmasının önünü açmıştır. Artan teşvik politikaları ve giderek düşen fotovoltaik panel maliyetleri ile birlikte; fotovoltaik güneş sistemleri, son yıllarda ülkemiz de dahil pek çok ülkede hızla yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur.

Sayıları hızla artan fotovoltaik güneş sistemlerinin de diğer dağıtık üretim sistemleri gibi dağıtım şebekelerine katılımının; gerilim regülasyonu, güç kayıpları, kısa devre akımları, güvenilirlik ve kararlılık gibi başlıklara etkisini anlamak en önemli konulardan biri olmuştur. Fotovoltaik güneş sistemlerinin şebekeye entegrasyonunun gerilim profilleri üzerindeki etkileri; fotovoltaik güneş sisteminin gücü, konumu, yerleştirildikleri alanlardaki ışınlam ve sıcaklık durumları, şebekedeki iletkenlerin ve yüklerin karakteristikleri gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişir. Enerjiyi temiz ve çevre dostu teknolojilerle üretmek önemli olduğu kadar, üretilen enerjinin verimli kullanılması ve şebeke ile uyumlu çalışması da önemlidir. Bu hedefe ulaşmak, ancak elektrik şebekelerinin daha akıllı hale getirilmesi ile mümkündür. Enerji sürekliliği ve kalitesinin sağlanması ve işleme girecek olan yeni üretim birimlerinin şebeke üzerindeki olası etkilerinin incelenmesi dağıtım sistem işletmecilerinin temel sorumlulukları arasındadır. Dağıtım sistem işletmecilerinin tüketiciye sunacağı elektrik enerjisinin gerilim genliğinin belirli sınırlar içerisinde olması gerekmektedir. Yüksek güçlü veya çok sayıda fotovoltaik güneş çiftliklerinin dağıtım şebekesine bağlanmasıyla ortaya çıkan gerilim yükselmesi problemi, şebeke yüklerini güvenli sınırlar içerisinde besleyebilmek için, yeni gerilim kontrol yöntemlerinin geliştirilmesini önemli bir gereksinim haline getirmiştir. Bu nedenle, bu tez kapsamında, dağıtım şebekelerine yerleştirilen büyük ölçekteki fotovoltaik güneş sistemlerinin, nihai tüketicilere teslim noktasındaki gerilime olası etkilerinin yönetilmesi gerektiğinden; dağıtım sistem işletmecilerinin karşılaması gereken şebeke işletme yükümlülüklerini yerine getirebilecekleri şekilde akıllı bir gerilim/reaktif güç kontrol yöntemi geliştirme düşüncesi doğmuştur.

Dağıtım şebekelerindeki statik senkron kompanzatör (STATCOM) uygulamalarının gerilim ve reaktif güç kontrolünde önemli bir yere sahip olduğu bilinen bir gerçektir. Hem sistemin sürekli durum işletme koşullarını iyileştirdiğinden hem de geçici durum sistem arızalarının giderilmesine yönelik hızlı cevap verme kabiliyetinden dolayı STATCOM uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. Rajiv K. Varma tarafından, fotovoltaik güneş sistemlerinin bulunduğu şebekelerde; geleneksel STATCOM'ların fiziksel olarak tesis edilmesi yerine, fotovoltaik sistem eviricilerinin STATCOM olarak işletilmesine olanak tanıyan ve PV-STATCOM olarak adlandırılan akıllı bir

evirici kontrolör tasarımı önerilmiştir. Bu öneri, dağıtım sistem işletmecileri için ekonomik olarak büyük bir tasarruf imkanını beraberinde getirmektedir. Dağıtım şebekelerindeki yük altında kademe değiştirici transformatör ve şönt kapasitör gibi geleneksel gerilim kontrol ekipmanlarının nipten yavaş tepkilerinin aksine; fotovoltaik güneş sistemlerindeki doğadan kaynaklı ani üretim değişimlerine ve şebekede oluşabilecek geçici arıza durumlarında gerilimdeki ani dalgalanmalara da hızlı cevap verme kabiliyetinden dolayı yenilikçi PV-STATCOM fikrinin uygulamasının ele alınan bu gerilim/reaktif güç kontrol problemine uygun olacağı düşünülmüştür.

Bu tez çalışmasında, dağınık olarak ve çok sayıda fotovoltaik güneş sistemi barındıran dağıtım şebekelerinde, tüketicilere güvenli ve kesintisiz enerji tedarikini garanti ederken aynı zamanda ertesi gün için enerji maliyetini (ki burada literatürdeki yaygın eğilimden farklı olarak tüketilen reaktif enerji bedeli de fiyatlandırılmıştır) ve dağıtım kayıplarını azaltmaya odaklanan akıllı bir gerilim/reaktif güç kontrol yöntemi önerilmiştir. Çalışma kapsamında şebekedeki tüm fotovoltaik güneş sistemlerinin PV-STATCOM olarak işletildiği düşünülmüştür. Bu çoklu amacı sağlamak için şebekeye bağlı tüm PV-STATCOM'ların 24 saat boyunca optimal olarak işletilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında değişen hava koşulları ve yüklenme şartları için tüm PV-STATCOM'ların optimal reaktif güç çizelgelemesinin belirlenmesi; doğadan esinlenen algoritmalarından biri olan Ateş Böceği Algoritmasında yapılan düzenlemelerle geliştirilen Modifiye Lévy-uçuşlu Ateş Böceği Algoritmasının, ilk defa gerilim/reaktif güç kontrol problemine uygulanmasıyla elde edilmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliği ve uygulanabilirliği, Sarıyer ilçesine ait 10,5 kV'luk bir dağıtım şebekesinde test edilmiştir.

Simulasyon sonuçları, Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritmasının karşılaştırılan diğer algoritma olan Parçacık Sürü Optimizasyonuna üstünlüğünü ortaya koymuştur. Farklı ışınım düzeyleri, çeşitli yüklenme koşulları ve bulutlanma durumları için gerçekleştirilen uygulamalarda tatmin edici sonuçlar elde edilerek; şebekedeki tüm baraların gerilimleri izin verilen aralıkta tutulurken, dağıtım kayıpları ve enerji maliyetinin büyük ölçüde azaltıldığı işletim durumlarına ulaşılmıştır. Tez çalışmasında önerilen yeni gerilim/reaktif güç kontrol yaklaşımının dağıtım şebekesi işletmecilerine örnek olacağı ve karşılaştıkları sorunlarda yol gösterici nitelikte olacağı düşünülmektedir. Önerilen yöntem dağıtım şirketlerine büyük ekonomik yarar sağlarken, farklı koşullar altında teknik olarak şebekeyi işletme kolaylığı sunacaktır. Ayrıca, bu tez çalışmasında önerilen şekliyle işletilen 5 MW ve altında kurulu güçlerdeki lisanssız fotovoltaik güneş sistemlerinin dağıtım sistem işletmecilerine reaktif güç kontrolüne ilişkin yan hizmetler sağlama noktasındaki katkısının da dikkate değer olduğu düşünülmektedir. Orta gerilim dağıtım şebekelerinin modernizasyonunda –akıllandırılmasında lisanssız olsalar da fotovoltaik güneş sistemlerinin (5 MW a kadar) gerekli tesis yatırımını yaptıkları takdirde gerilim kontrolüne bu çalışmadaki öneriler doğrultusunda katkı sunacakları gösterilmiştir.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT VOLTAGE CONTROL METHOD IN DISTRIBUTION NETWORKS INCLUDING DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

SUMMARY

Due to the rising population, industrialization and economic growth, the demand for electrical energy continues to increase day by day. The limited supply of fossil fuels and the global climate change problem arising from the use of these fuels have paved the way for the widespread production of electrical energy from renewable energy sources. With the increasing incentive policies and decreasing capital cost of photovoltaic panels; photovoltaic solar systems have become one of the rapidly spreading renewable energy sources in many countries, including our country.

With the rapidly increasing number of photovoltaic solar systems penetrating in the distribution networks; understanding the effects of them on voltage regulation, power losses, short circuit currents, reliability and stability has been one of the most important issues. Effect of photovoltaic solar system integration on voltage profiles varies depending on many factors such as its location and installed capacity, the characteristics of the branches and loads in the grid. It is important to use energy efficiently as well as to produce clean energy. To meet these expectations, electricity networks need to be made smarter. The main responsibilities of distribution system operators are to ensure energy continuity and quality and to examine the possible effects of new generation units to be put into operation on the network. The voltage level of the electrical energy to be presented to the consumer by the distribution system operators must be within certain limits. The problem of voltage rise caused by the connection of high power or many photovoltaic solar farms to the distribution network has made it an important requirement to develop new voltage control methods in order to feed the grid loads within safe limits. The possible effects of large-scale photovoltaic solar systems integrated into distribution networks on the voltage at receiving end must be managed. Hence, within the scope of this thesis, the idea of developing an intelligent voltage/reactive power control method has arisen in a way that the distribution system operators can fulfill their network operation obligations.

Distribution networks of radial structure are widely and voltage is controlled by utility using on-load tap changing transformers (OLTC) and reactive power support devices (i.e. switched capacitor banks). Although switched capacitor banks are commonly utilized to control voltage in distribution networks, they are not a continuous variable real-time source of reactive power because they are switched on or off. Furthermore, reactive power supplied by switched capacitors reduces as the system voltage decreases (by voltage squared) when reactive power is most needed. Solar PV generation depends on environmental conditions and can change rapidly as clouds pass over, creating voltage fluctuations. If on-load tap changing transformers which are one of the most expensive devices in system and reactive power support devices attempt to control the rapid fluctuations in voltage, the devices will require much more

maintenance and have a shorter life-time. However, these devices are not fast enough to regulate rapid voltage variations resulting from solar PV generation transients.

It is a known fact that static synchronous compensator (STATCOM) applications in distribution networks have an important role in voltage and reactive power control. STATCOM applications are becoming increasingly common, both because improves the steady- state operating conditions of the network and because of its ability to respond quickly to eliminate transient network faults. Instead of physically connection of traditional STATCOMs, a smart inverter controller design called PV-STATCOM that allows photovoltaic system inverters to be operated as STATCOM has been proposed by Rajiv K. Varma. This proposal brings along a great economic savings opportunity for distribution system operators. Unlike the slow response of conventional voltage control equipments such as on-load tap-changer transformers and shunt capacitors in distribution networks; it is thought that the application of the innovative PV-STATCOM idea will be suitable for this voltage/reactive power control problem, due to its ability to respond quickly to sudden fluctuations in voltage in case of sudden production changes caused by nature in photovoltaic solar systems and to sudden fluctuations in voltage in case of temporary faults that may occur in the grid.

In this thesis, a smart voltage / reactive power control method is proposed that focuses on reducing energy cost (unlike the common trend in the literature, the cost of reactive energy consumed is also priced) and distribution losses for the next day while ensuring safe and uninterrupted energy supply to consumers in distribution grids with dispersed and multiple photovoltaic solar systems. Within the scope of the study, it is considered that all photovoltaic solar systems in the grid are operated as PV-STATCOM. In order to achieve this multiple objectives, all PV-STATCOMs connected to the grid must be operated optimally for 24 hours. In this thesis, determining the optimal reactive power scheduling of all PV-STATCOMs for changing weather conditions and loading conditions has been achieved by applying the Modified Lévy flight-based Firefly Algorithm, which was developed with the modifications made in the Firefly Algorithm, one of the algorithms inspired by nature, to the voltage/reactive power control problem for the first time.

Structure of proposed method is briefly summarized as follows: Firstly, based on the temperature and radiation values, the active power amount that the PV-STATCOMs can produce throughout the day is calculated. Accordingly, the reactive power capability ranges of PV-STATCOMs are calculated. Furthermore, cost data of solar PV system, day-ahead market prices per hour, load flow data and voltage allowable limits are used as input values by the optimization algorithm. The optimization algorithm decides the amount of reactive power exchange between the grid and PV-STATCOMs, which minimizes distribution losses and energy cost. Available maximum active power that PV-STATCOMs can produce depending on the solar radiation and temperature are injected into the network without any curtailments during the day-time.

The validity and applicability of the proposed method has been tested in a 10.5 kV distribution network in İstanbul/Sarıyer. The simulation results confirm the superiority of Modified Lévy Firefly Algorithm over other compared algorithm. Simulation results also show that for cloudy weather condition, different loading conditions and solar radiation levels, satisfactory operating conditions have been achieved where distribution losses and energy cost are greatly reduced while the voltages of all buses in the network are kept within the permissible range. It is considered that the new

voltage/reactive power control approach proposed in the thesis will serve as an example for distribution network operators. While the proposed method will provide great economic benefits to the distribution companies, it will provide technical operation convenience under different conditions. In addition, the contribution of unlicensed photovoltaic solar systems with installed power of 5 MW and below, operated as suggested in this thesis, in providing ancillary services related to reactive power control to distribution system operators is considered to be remarkable. It has been shown that photovoltaic solar systems (up to 5 MW), even if they are unlicensed, will contribute to voltage control in the modernization of medium voltage distribution networks, in line with the recommendations in this study, if they make the necessary facility investment.





1. GİRİŞ

1.1 Genel Bakış

Elektrik enerjisi, kuşkusuz insan hayatının en önemli gereksinimlerindenidir. Dünya nüfusunun hızla artmasının yanı sıra, gelişen teknoloji ile birlikte elektrik enerjisine talep artarken, bunun aksine fosil yakıtları hızla azalmaktadır. Küresel ısınma problemi ve fosil yakıtların tükenmeye yüz tutması ile birlikte çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde etmek, en etkin çözüm olarak görülmektedir [1,2].

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğası gereği coğrafi olarak dağınıktır ve enerjiyi en etkin şekilde taşıyan yüksek gerilim-iletim sistemine genellikle uzak konumdadır. Potansiyel yenilenebilir enerji kaynakları daha çok dağıtım sistemine bağlı alçak gerilim hatlarına yakındır. Dağıtık üretim ise, yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan enerji üretimini kapsamakla birlikte, tanım olarak küçük-ölçekli elektrik üretimi veya dağıtım sistemine bağlı elektrik üretim olarak ifade edilir. Dağıtık üretim teknolojisi fotovoltaikler, rüzgar türbinleri, yakıt hücreleri, mikro-türbinler, jeotermal üretim, bioenerji kaynakları, trigenerasyon sistemleri, kojenerasyon sistemleri ve küçük-ölçekli gaz türbinleri vb. kapsamaktadır [3-5].

Enerjiyi temiz ve çevre dostu teknolojilerle üretmek önemli olduğu kadar, üretilen enerjinin verimli kullanılması ve şebeke ile uyumlu çalışması da önemlidir. Bu hedefe ulaşmak, ancak elektrik şebekelerinin daha akıllı hale getirilmesi ile mümkündür. Akıllı şebekeler basit olarak, elektrik şebekesine çift yönlü etkin bir iletişim altyapısı ekleyen şebeke güncellemesi olarak tanımlanabilir. Son zamanlarda önem kazanan konulardan olan akıllı şebekeler, çevre dostu bir teknoloji olmasının yanı sıra dağıtık üretim sistemlerinde aktif rol alır [2].

Türkiye’de, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin ve alt düzenleyici mevzuat olan Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğin 2011 yılında yürürlüğe girmesiyle birlikte, dağıtım şirketlerine yoğun bir biçimde dağıtık üretim sistemi bağlantı talebi

gelerek, elektrik enerjisi üretiminde yeni bir döneme girilmiştir. Dağıtık üretim sistemi kurulu gücünün 11 kW'ın altında olması halinde, alçak gerilim (AG) seviyesinden dağıtım şebekesinde bağlanır. 10 MW'ın altında olan sistemler, hattın kapasitesine bağlı olarak orta gerilim (OG) dağıtım şebekesine gömülü olarak bağlanırlar. Kurulu gücü 10 MW ile 50 MW arasında olan sistemler, ayrı hat ve fiderle YG/OG trafo merkezlerinin OG kısmına bağlanır. Kurulu gücü 50 MW'tan fazla olan sistemler ise yüksek gerilim (YG) seviyesinden direkt bağlanır [6,7].

Elektrik güç sistemine dağıtım seviyesinden entegre edilen dağıtık üretim birimlerinin artışıyla birlikte şebekeye etkileri yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Dağıtık üretim sistemlerinin entegrasyonu ile birlikte, talebin yakın yerine üretimin yerleşmiş olmasından dolayı iletim ve dağıtım kayıpları azalacaktır. Dağıtık üretimin sağladığı avantajlarla birlikte, kararlılık, gerilim kontrolü, güç kalitesi gibi güç sistemlerinin bazı parametreleri üzerinde olumsuz etkisi de söz konusudur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtım seviyesinden şebekeye bağlanmasının en önemli sakıncalarından biri, bölgesel gerilim profillerini yükseltici etkisidir. Gerilim kontrolü, dağıtım sistemlerinde güç kalitesinin önemli parametrelerinden biridir. Dağıtık üretim giderek artan yenilenebilir enerji sistemlerinin de kullanımıyla, geleceğin enerji kaynakları arasında önemli bir yer alacağından, tüketiciye kaliteli enerji sunabilmek için dağıtım sistemi ile uyumlu çalışmak zorundadır [3,8-10]. Bu nedenle, dağıtık üretimin özellikle gerilim kontrolüne katkısının nasıl geliştirilebileceğini inceleyen çalışmalara gerek duyulmaktadır.

1.2 Tezin Kapsamı ve Amacı

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmesine yönelik dünya çapında yürütülen teşvik politikaları ve düşen fotovoltaik (PV) panel maliyetlerinin etkisiyle; fotovoltaik güneş santralleri, son on yılda hızla yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur. Büyük ölçekli PV üretimi, 21. yüzyıl elektrik sistemleri yapısında geleneksel fosil yakıt üretimine alternatif bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir [11-13].

Fotovoltaik güneş sistemleri teknolojisi, son yıllarda küçük ölçekli çatı-üstü uygulamalardan büyük ölçekli şebeke entegreli uygulamalara taşınmıştır. Fotovoltaik güneş tarlaları; yalnızca hat kayıplarında azalma ve yakıt maliyetinden tasarruf gibi

teknolojik-ekonomik faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda hava kirliliği ve gürültü kirliliğinde azalma gibi çevresel avantajlar da sağlar [13].

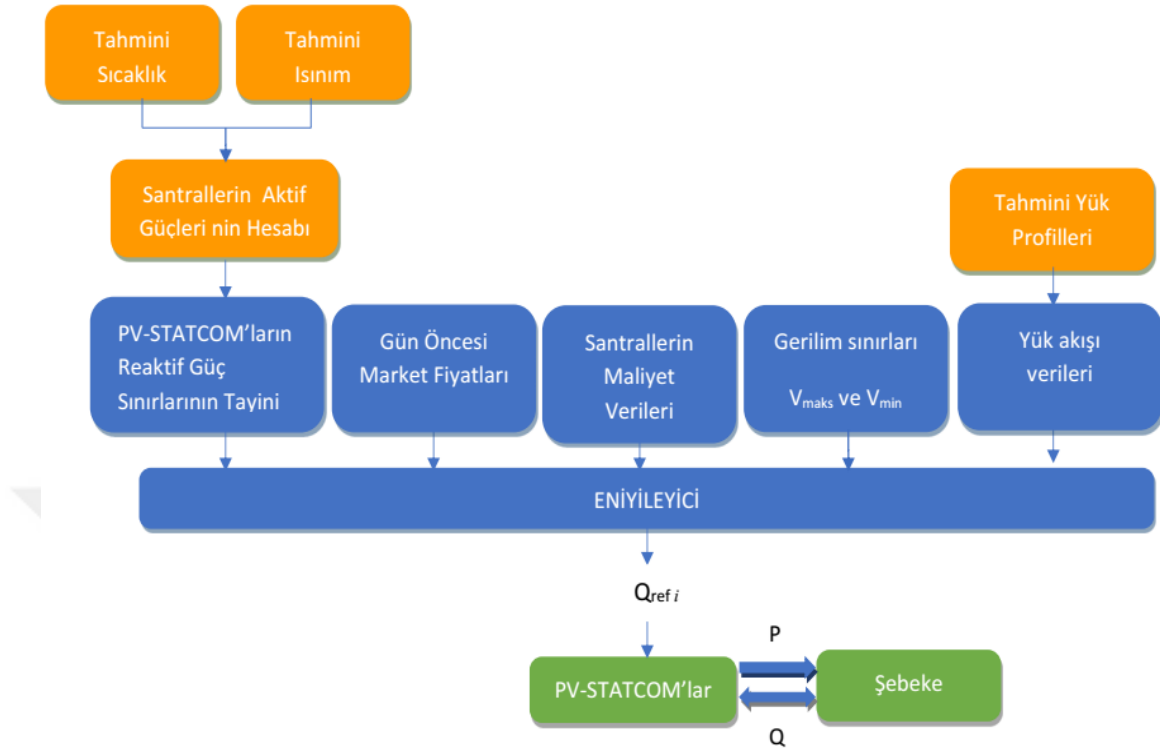
Fotovoltaik panellerin maliyetinin düşmesiyle birlikte, dünyanın pek çok yerinde, çok sayıda ve büyük ölçekte fotovoltaik güneş santrallerinin elektrik şebekelerine bağlandığı görülmüştür. Mevcut güneş santrallerinin toplam kurulu gücü en yüksek olan ülkeler sırasıyla, Çin, ABD, Japonya ve Almanya'dır [13]. Güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkemizde son zamanlarda güneş enerji santrali kurulumu güçlü bir büyüme göstermiştir. 2017 yılında önemli bir atılım yaparak Avrupa'nın güneş enerjisi pazarına en büyük katkıyı yapan ülkesi, 1,79 GW'lık güçlü PV santrali şebekeye bağlayan Türkiye, ardından 1,75 GW'lık santrali ekleyen Almanya olmuştur [14].

Güneş enerji santrallerinin şebekeye katılımı hızla yükselirken, bu santrallerin dağıtım şebekelerinde gerilim profili, güç kayıpları, kısa devre akımları, güvenilirlik ve kararlılık gibi başlıklara etkisini anlamak en önemli konulardan biri olmuştur [11-15,16]. Nihai tüketiciye teslim noktasındaki gerilimin genliği, kaliteli enerji tedarigini ve tüketicilerin ekipmanlarının ömrünü garanti altına almak için, dağıtım şirketleri tarafından günün 24 saati izin verilen sınırlar ($\pm 5\%$) dahilinde tutulur. Dağıtım şebekelerinde radyal yapı oldukça yaygındır ve gerilim, yük altında kademe değiştiren transformatörler (OLTC) ve reaktif güç destek cihazları (yani anahtarlama kapasitör grupları) kullanılarak kontrol edilir. Anahtarlama kapasitör grupları, dağıtım şebekelerinde gerilim kontrol etmek için yaygın olarak kullanılsa da, açılıp kapatıldıkları için sürekli değişken gerçek zamanlı bir reaktif güç kaynağı değildirler. Ayrıca, anahtarlama kapasitörler tarafından sağlanan reaktif güç, reaktif güce en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda şebeke gerilimi düştükçe (gerilimin karesi ile) azalır. Fotovoltaik güneş santrallerindeki üretim, çevresel koşullara bağlıdır ve bulutlar geçerken hızla değişebilir ve gerilim dalgalanmaları yaratabilir. Sistemdeki en pahalı cihazlardan biri olan OLTC'ler ve reaktif güç destek cihazları, gerilimdeki hızlı dalgalanmaları kontrol etmeye çalışırsa, cihazlar çok daha fazla bakım gerektirecek ve nispeten daha kısa bir ömre sahip olacaktır. Bununla birlikte, bu cihazlar, fotovoltaik üretimindeki geçişlerinden kaynaklanan hızlı gerilim değişimlerini düzenlemek için yeterince hızlı değildir. Bu nedenle, fotovoltaik teknolojisi, gerilimi güvenli sınırlar içinde tutmak için aktif gücün yanı sıra reaktif güç üretme kapasitesine de sahip olmalıdır [11,12].

Fotovoltaik güneş sistemlerin şebekeye entegrasyon çalışmaları genel olarak, merkezi ve merkezi olmayan (yerel) kontrol stratejileri olarak sınıflandırılabilir. Merkezi kontrol stratejilerinin güç sistemlerinde pratik uygulaması, dağıtım şirketleri aracılığıyla yapılır ve güvenilir bir iletişim kanalının gerekliliği nedeniyle cihazlar ve kontrol sistemleri için ağır yatırım maliyetleri gerektirir. Sonuç olarak, merkezi olmayan kontrol yaklaşımı son birkaç yıldır daha fazla ilgi görmüştür. Merkezi olmayan kontrol stratejilerinin uygulanması dağıtım şirketlerine; fotovoltaik sistemleri ile gerilim ve reaktif güç desteği, kaybın en aza indirilmesi ve fotovoltaik üretim kapasitesinin artırılması için gerekli yan hizmetlerin sağlamasını mümkün kılar [17].

Fotovoltaik sistemler sadece gün içerisinde aktif güç üretirken, gece tamamen boştaadır. Bu ölçüde pahalı bir yatırımın gece saatlerinde tamamen kullanılmaz bir durumda olması yatırımcısı adına hiçbir kazanç sağlamaz. Fotovoltaik sistemlerdeki anahtar eleman olan gerilim kaynaklı evirici (VSI), aynı zamanda Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazlarından biri olan statik senkron kompanzatorün (STATCOM) de ana elemanıdır [18-19]. Fotovoltaik sistemlerdeki eviricilerin ısıtım olmadığından doğaları gereği geceleri kullanılmayan kapasitelerinin STATCOM olarak kullanılmasını öneren ve “PV-STATCOM” olarak isimlendirilen yenilikçi bir evirici kontrolör tasarımı Rajiv K. Varma tarafından [18-20] önerilmiştir. Önerilen PV-STATCOM tasarımı; gece boyunca eviricinin tam kapasitesi ile, gündüz saatlerinde ise aktif güç üretiminden arta kalan kapasitesi ile, fotovoltaik güneş santralinin şebekeye bağlantı noktası (PCC: point of common coupling) gerilimini regüle eder. PV-STATCOM’ların kullanımı, geleneksel STATCOM’ların şebekede fiziksel bağlantısının gereğini ortadan kaldırırken, sürekli-durum gerilim kontrolünü sağlar ve arızalardan doğan geçici aşırı gerilimleri önler. Böyle bir kontrol aynı zamanda dağıtım şebekelerinin gerilim sorunları nedeniyle kısıtlanan güneş tarlası barındırma kapasitesinin (hosting capacity) artırılmasına yardımcı olabilir. PV-STATCOM olarak isimlendirilen evirici kontrolör tasarımı, aynı gerilim kontrol fonksiyonlarını gerçekleştirmek için kullanılabilecek eşdeğer bir geleneksel STATCOM’dan 50 ila 100 kat daha ucuzdur [21]. Bu nedenle, yenilikçi PV-STATCOM fikrinin kullanımı dağıtım şirketlerine büyük ölçüde maliyet tasarrufu

sağlarken dağıtım şebekelerinde gerilim ve reaktif güç kontrolüne da (Volt/VAr) önemli bir katkı sunacaktır.



Şekil 1.1 : Önerilen yöntemin genel yapısı.

Bu tez çalışmasında, çok sayıda fotovoltaik güneş santrali barındıran bir dağıtım sisteminde, işletme sınırlarına bağlı kalarak ertesi gün boyunca enerjinin toplam maliyetini ve dağıtım kayıplarını azaltmayı hedefleyen merkezi olmayan bir gerilim/reaktif güç kontrol optimizasyonu önerilmiştir. Çalışma kapsamında şebekedeki tüm fotovoltaik güneş sistemlerinin PV-STATCOM olarak işletildiği varsayılmıştır. Bu tez çalışmasında önerilen yöntem; şebekede çok sayıda ve dağınık olarak bulunduğu varsayılan PV-STATCOM'ların şebeke ile olan reaktif güç alış-verişlerinin 24 saat boyunca kontrol edilmesine dayanır. Önerilen yöntemin genel yapısı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Öncelikle tahmini sıcaklık ve ısınım değerlerine bağlı olarak PV-STATCOM'ların ertesi gün boyunca üretebileceği aktif güç miktarı hesaplanır. Buna göre günlük reaktif güç kapasite aralığı hesaplanır. Ayrıca gün öncesi piyasa fiyatları, fotovoltaik güneş sistemine ait maliyet verileri, güvenli gerilim sınırları ve tahmini yük profilleri ile elde edilen yük akışı verileri optimizasyon (eniyeleme) algoritmasına girdi verileri olarak kullanılmaktadır. Optimizasyon algoritması şebeke ile her bir PV-STATCOM arasındaki reaktif güç alışveriş miktarına karar vererek; tüm bara gerilimlerini her koşulda güvenli sınırlar içerisinde tutarken,

şebeke kayıplarını ve enerji maliyetini en aza indirir. Bu hedefe, PV-STATCOM'ların hava koşullarına bağlı olarak üretebileceği maksimum aktif güç miktarında herhangi bir kısıtlamaya gidilmeden ulaşılması önerilmektedir.

Bu tez çalışması ile geliştirilen akıllı gerilim/reaktif güç kontrol uygulaması, dağıtım şebekelerinde katılım oranları hızla artan fotovoltaik güneş sistemlerinin, enerji maliyetini ve kayıpları azaltarak aynı zamanda akım- gerilim sınırlamaları gibi mevcut işletme koşullarına bağlı kalarak, ertesi gün için optimum reaktif güç paylaşımının bulunmasını hedeflemiştir. Bu sistemin anında veriler elde edilirse aynı gün için de geliştirilebileceği açıktır, bu akıllı şebekelerin gelişmesiyle mümkün kılınabilir. Bu çalışmayı literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı kılan diğer bir özelliği, Volt/VAr optimizasyon probleminin çözümü için Ateş Böceği Algoritmasının (AA) iyileştirilmesiyle elde edilen Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritmasının (MLAA) kullanımını önermesidir. Yöntemin üstünlüğü tez kapsamında bir başka sezgisel yöntemle de karşılaştırılarak ispatlanmıştır. Önerilen yöntemin etkinliği, gerçek bir dağıtım şebekesinde; Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş. (BEDAŞ)'den alınan veriler ile İstanbul'un Sarıyer ilçesindeki 10,5 kV seviyesinde, 34-baradan oluşan gerçek bir dağıtım şebekesine uygulanarak incelenmiştir.

1.3 Literatür Araştırması

Geleneksel dağıtım şebekelerinde gerilim ve reaktif güç kontrolü nispeten basittir ve genellikle yükaltında kademe değiştiren transformatörün (OLTC) ve anahtarlama şönt kapasitörlerin katılımıyla, bölgesel kontrol komutları ile gerçekleştirilir. OLTC, kademe ayarını yaparak transformatörün sekonder kısmında gerilimi sabit tutar. Anahtarlama şönt kapasitör ise reaktif güç talebini karşılayarak gerilim düşümünü azaltır [22-23].

Geleneksel dağıtım şebekelerinde gerilim ve reaktif güç kontrolü, planlı merkezi üretime ve akımın iletim seviyesinden, yüksek gerilim/orta gerilim (YG/OG) indirici merkezine ve oradan da OG fiderlerine doğru tek yönlü olması kabulüne göre tasarlanmıştır. Dağıtım Üretim Sistemlerinin (DÜS) dağıtım şebekelerine katılımıyla bu kabul geçerliliğini kaybetmektedir. DÜS, şebekedeki güç akışının yönünü ve/veya hacmini değiştireceğinden, fider gerilim profili ve reaktif güç kontrolü üzerinde de etkili olmaktadır [23-24]. DÜS'ün çıkış gücü aktif olarak kontrol edildiği takdirde, DÜS katılımının şebekedeki gerilim regülasyonuna olası negatif etkileri önlenmiş

olur. İleri düzeyde geliştirilmiş kontrol mekanizmalarının, her bir dağıtık üretim biriminin reaktif güç çıkışını optimum bir şekilde belirlemesiyle, yalnız gerilim profili değil tüm sistem performansı iyileştirilerek tüketiciye sunulan enerjinin kalite standardı korunur. Aktif dağıtım şebekelerinde, DÜS'ün dinamik olarak reaktif güç desteği üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır [22,25]. DÜS'lerin şebekeye entegrasyon çalışmaları genel olarak, merkezi ve merkezi olmayan (yerel) kontrol stratejileri olarak kategorize edilir.

Bazı çalışmalarda [26]-[29], indirici trafo merkezinin geriliminin ve dağıtık üretimin reaktif gücünün birlikte koordineli olarak kontrol edildiği merkezi kontrol yöntemleri sunulmuştur. [23], DÜS içeren dağıtım şebekesinde güç kaybını minimize etmek amacıyla OLTC ve kapasitörlerin koordinasyonunu incelemiştir. DÜS'lerin senkron makinalı olup çıkış güçlerinin kontrol edilebildiği varsayılmıştır. [30]'da, ertesı günün enerji maliyetini, enerji kayıplarını ve gerilim sapmasını minimize etmek için çok sayıdaki DÜS'ün, kapasitörlerin ve OLTC'nin kademe durumunun koordineli olarak kontrol edildiği yeni bir algoritma tanıtılmıştır. [31] ise, yüksek fotovoltaik katılımlı bir dağıtım şebekesinde, gerilim regülatörlerinin kademe ayarında işlem sayısını minimize ederek optimal reaktif güç koordinasyon stratejisi önermiştir. [32], rüzgar tarlası ve fotovoltaik panellerin tahmini çıkış gücüne göre yük altında kademe değiştirici transformatörün kademe durumunu ve kapasitör gruplarının anahtar durumunu optimize etmiştir. Gerilim/reaktif güç kontrolü üzerine yapılan çalışmalarda genellikle sabit güç yük modeli kullanılmışken, çeşitli yük davranışlarını incelemek ve gerilim-yük hassasiyetini göstermek için bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak üstel yük modeli kullanılmıştır. [33], DÜS'ler içeren dağıtım şebekelerinin kullanımına uygun iki farklı gerilim kontrol algoritması önermiştir. İlk algoritma, kontrol eylemlerini kararlaştırmak için basit kontrol kuralları kullanırken; ikinci algoritma optimizasyona dayandırılmıştır. Bu çalışmada literatürdeki pek çok çalışmadan farklı olarak, algoritmaların işleyişi zaman-domeni simülasyonları üzerinden test edilmiştir. [34]'te ise, literatürdeki birçok çalışmadan farklı olarak, OLTC, şönt kapasitör ve dağıtık üretimin çıkış gücüne ek olarak SVC (Statik VAR Kompanzatör) kullanılmıştır. Burada bu aygıtlar arasındaki koordineli gerilim kontrolü için genetik algoritma ve tabu araştırmasının kombinasyonu kullanılmıştır. Ayrıca OLTC anahtarlama işlemine sınır getirmenin etkilerini incelemiştir. Gerilim ve

reaktif güç kontrolü genel olarak güç kayıplarını azaltmak için ve dağıtım sistemi çalışma sınırlamalarını sağlamak için yapılır.

Merkezi kontrol stratejilerinin güç sistemlerinde pratik uygulaması, dağıtım şirketleri aracılığıyla yapılır ve güvenilir bir iletişim kanalının gerekliliği nedeniyle cihazlar ve kontrol sistemleri için ağır yatırım maliyetleri gerektirir. Sonuç olarak, merkezi olmayan kontrol yaklaşımı son zamanlarda daha fazla ilgi görmüştür. Merkezi olmayan kontrol stratejilerinin uygulanması dağıtım şirketlerine; DÜS'lerin gerilim ve reaktif güç desteği, kaybın en aza indirilmesi ve dağıtık üretim kapasitesinin artırılması için yan hizmetler sağlamasına olanak sağlar [17]. DÜS'lerin reaktif güç kapasitesi yerel olarak reaktif güç sağlamak için literatürde yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. [35], şebekede sadece mevcut dağıtık üretim sistemlerinin reaktif güç çıkışı kontrol ederek gerilim regülasyonunu sağlamaya çalışmıştır. [36], dağıtık üretim sisteminin şebekeye bağlantı barasındaki gerilim kontrol probleminin çözümü için yerel gerilim kontrol yöntemi olarak dağıtık üretim sisteminin reaktif çıkış gücünü ve bunun tek başına yeterli olmadığı durumlarda ise dağıtık üretimin aktif çıkış gücünü de bulanık mantıkla kontrol etmiştir. [17] ise, şebekede bulunan çok sayıdaki dağıtık fotovoltaik güneş ve rüzgar santralinin optimal aktif/reaktif güç kontrolü ile sağlanan duyarlılık analizine dayalı bir gerilim regülasyonu önermiştir. Bu çalışma; şebekedeki çok sayıda DÜS varlığından kaynaklanan gerilim yükselmelerini kontrol ederken, aktif güç kayıplarını ve indirici trafo merkezinden çekilen reaktif gücü minimize etmiştir.

Gerilim/reaktif güç kontrol problemleri genellikle çok sayıda kontrol değişkeni ve amaç fonksiyonu içerdiğinden dolayı, bu problemin çözümünde optimizasyon algoritmalarının kullanımı uygundur [33]. Bununla birlikte, doğrusal olmayan programlama yöntemi [37] ve gradyan-tabanlı optimizasyon algoritmaları [38] gibi geleneksel optimizasyon yöntemleri büyük ölçekli sistem uygulamalarında yetersiz kalmaktadır [39]. Bu nedenle, Volt/VAr kontrol probleminin çözümü için literatürdeki çalışmalarda daha çok sezgisel algoritmalar önerilmiştir. Farklı amaç fonksiyonlarına değişik optimizasyon algoritmalarını uygulayarak Volt/VAr kontrolünü inceleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. [40]'da önerilen gerilim/VAr/THD (Toplam Harmonik Distorsiyon) kontrolunda; fotovoltaik sistemler barındıran bir şebekedeki optimizasyon problemi bir çok- amaçlı optimizasyon problemine dayandırılan bulanık üyelik fonksiyonları için formülize edilerek genetik algoritma ile çözülmüştür.

[41]'de, çok sayıda dağıtık üretim sistemleri içeren bir dağıtım şebekesinde, günlük Volt/VAr kontrolü için bulanık parçacık sürü optimizasyonuna dayanan yeni bir algortima uygulanarak, enerji maliyeti minimize edilecek şekilde DÜS'lerin optimum aktif ve reaktif güç paylaşımı, kapasitörlerin ve OLTC'nin kademe durumu tayin edilmiştir. [42]'de ise, günlük Volt/VAr kontrolünü rüzgar santrali, fotovoltaiik, yakıt hücresi ve hidrotürbin içeren dağıtım şebekesinde; enerji kayıplarını, gerilim sapmalarını, emisyonu ve enerji maliyetini minimize etmek amacıyla, çok-amaçlı Θ -akıllı bakteriyel besin arama algoritması (Θ - smart bacterial foraging) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. [43], günlük Volt/VAr kontrolünü, rüzgar santrali ve yakıt hücresi içeren şebekede; enerji kayıplarını, toplam enerji maliyetini ve emisyonu minimize etmek amacıyla modifiye-sıçrayan kurbağa algoritmasını kullanarak sağlamıştır. [44]'te, diğer çalışmalardan farklı olarak amaç fonksiyonu indirici trafo merkezinden çekilen aktif güç olarak seçilmiş, optimizasyon probleminin çözümü için karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında ele alınan gerilim kontrol problemi, sezgisel algoritmalarından biri olan ve Xin She Yang tarafından geliştirilen Ateş Böceği Algoritması (AA) uygulanarak çözülmüştür [45-47]. Ateş Böceği Algoritması, şimdiye kadar DÜS'lerin optimal boyutlandırılması ve konumlandırılması [48], güç sistemlerinde yük-frekans kontrol problemi [49], ekonomik dağıtım [50], optimal güç akışı problemi [51], optimal PID kontrollör tasarımı [52] gibi pek çok karmaşık optimizasyon problemine uygulanmıştır. [50] ve [51]'deki çalışmalarda, geleneksel Ateş Böceği Algoritmasının performansının geliştirilmesi amacıyla bazı parametre ve formüller modifiye edilmiş ve algoritmaya mutasyon stratejisi uygulanmıştır. Mutasyon stratejisi, yerel (lokal) optimal çözümlere takılmadan bütünsel (global) optimal çözümü bulmayı sağlamıştır. Algoritmanın daha hızlı yakınsaması için ise, formülde düzeltme yapılmıştır. Bu değişiklik; optimizasyon sürecinin erken aşamasında daha hızlı keşif sağlarken, optimizasyon sürecinin son aşamasında ise isabetli bir çözüm arayışına imkan tanır [50-51].

1.4 Tezin İçeriği

Bu tez çalışması sekiz ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tez çalışmasının ana motivasyonu vurgulanmış ve literatürdeki çalışmalardan bahsedilmiştir. İkinci bölümde, dağıtım şebekelerindeki gerilim kontrol yöntemlerine değinilmiş ve

DÜS'lerin bağılı olduğu şebekelerde gerilim profiline etki eden faktörler örnek bir şebeke üzerinde araştırılmıştır. Üçüncü bölümde ise, yenilikçi ve akıllı bir fotovoltaiik evirici kontrolör tasarımı olan PV-STATCOM tanıtılmıştır. Ele alınan Volt/VAr kontrol probleminin matematiksel modeli dördüncü bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Beşinci bölümde, problemin eniyilenmesinde kullanılan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Ateş Böceği Algoritması (AA) ve AA'nın üzerinde yapılan formül ve parametre değışiklikleri ve mutasyon stratejisi ile elde edilen Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritması tanıtılmıştır. Altıncı bölümde önerilen yaklaşımın akış şeması açıklanmıştır. Yedinci bölümde, önerilen yaklaşımın İstanbul'un Sarıyer ilçesindeki örnek bir OG dağıtım şebekesine uygulanışı anlatılmıştır. Son bölümde ise, bu uygulamadan elde edilmiş sonuçlar ve değerlendirmeler verilmiştir.



2. DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMİ İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE GERİLİM KONTROLU

2.1 Dağıtım Şebekelerinde Gerilim Kontrolü

Geleneksel orta gerilim-dağıtım şebekelerinin pasif ve radyal yapıda olması, yüksek-gerilimden düşük-gerilime doğru tek yönlü güç akışını gerektirir. Bunun sonucu olarak, gerilim profili hat karakteristiği ve çekilen güce bağlı olarak hat boyunca düşer [8]. Bir fiderdeki gerilim düşümünün ifadesi aşağıda verilmiştir [8].

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times (R_L \cos(\varphi) + X_L \sin(\varphi)) \quad (2.1)$$

Burada,

R_L : Fider direnci

X_L : Fider reaktansı

φ : Yük empedansının açısı

I : Faz akımının genliği

Yukarıda verilen eşitlik göstermektedir ki, havai hat için yükün güç faktörü iletkendeki gerilim düşümünü etkileyen önemli bir büyüklüktür. Yer altı kablosu kullanımı söz konusuysa, kablonun direnci daha küçük olduğundan güç faktörü daha az önemlidir [8].

Mevcut pasif dağıtım şebekelerinde pasif gerilim kontrol stratejileri kullanılmaktadır. Dağıtım şebekelerinde en yaygın gerilim kontrol yöntemi yük altında kademe değiştirici transformatörlerin (OLTC) kullanımıdır. Kademe ayarı, otomatik gerilim kontrol rölesiyle kontrol edilir. Burada, trafo ile yük barası arasındaki fider empedansı röleye girilir. Akımın ölçülmesiyle birlikte gerilim düşümü hesaplanarak hattın uzak ucundaki gerilim değeri tahmin edilir. Bu fikir, radyal sistemler için ideal olmakla birlikte, şebekeye transformatörün yük tarafından dağıtık üretim bağlanmasıyla birlikte durum karmaşık bir hal alır. Birden fazla dağıtık üretim sisteminin şebekeye alınmasıyla birlikte yük altında kademe değiştiren transformatörün gerilim kontrolündeki etkisi azalır [8].

2.1.1 Bölgesel reaktif güç kontrolü

Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle iletim şebekesine ve yük bölgesine (yerleşime) uzak alanlarda bulunduğundan (maksimum üretim, minimum yük) ve bu alanlarda dağıtım şebekesi de zayıf olduğundan; dağıtık üretim daha çok gerilim yükselmesine neden olur. Şebekedeki gerilim profillerinin dağıtık üretim entegrasyonu ile yükselmesi sorunu, dağıtık üretim sistemlerinin şebekeden reaktif güç çekmesine izin verilmesiyle önlenir. Ancak günümüzde dağıtık üretim sistemleri çoğunlukla birim güç faktöründe işletilmekle birlikte dağıtım şebekesinin gerilim kontrolüne katılımına izin verilmemektedir. Oysa, dağıtık üretim kendi uç gerilimine göre reaktif gücünü kontrol etse diğer bir deyişle gerilim kontrol modunda (PV barası olarak) işletilse, dağıtım şebekesi gerilim seviyesi değişik yüklenme koşullarında daha az değişime uğrar ve gerilim yükselme problemi azalacağından daha fazla dağıtık üretim sistemi şebekeye entegre edilebilir. Güç faktörü kontrolü tercih edilirse, uç gerilimi güvenli sınırlar içindeyken dağıtık üretim sistemi güç faktörü kontrolü modunda (PQ barası) çalışır, gerilim sınır değerlerin dışına çıktığında sistem gerilim kontrol moduna dönüşür. Dağıtık üretim sistemi PV modunda çalıştırıldığında, PQ modundaki duruma göre daha iyi bir gerilim işletim imkanı vermektedir [4,53].

Dağıtık üretim sisteminin reaktif güç kontrol kabiliyeti kendi şebeke arayüzüne bağlıdır. Senkron generatörlü üretim sistemleri veya modern güç elektroniği arayüzü kendi işletme sınırları elverdiği ölçüde aktif ve reaktif gücü kontrol etme kabiliyetindedirler. Ancak asenkron generatörler kullanılıyorsa, reaktif güç aktif güce bağlı olduğundan bazı kontrollü reaktif güç kompanzasyon aygıtları kullanılmadan kontrol edilemezler. Bu üretim sistemleri genellikle güç faktörü düzeltici kapasitörler içerirler. Uç gerilimi yükseldiğinde reaktif güç tüketimi basit olarak kapasitörlerin devredışı kalmasıyla kontrol edilir. Reaktif gücün sürekli kontrolü gerekli ise makine uçlarına güç elektroniği tabanlı bir reaktif güç kompanzatörü (STATCOM gibi) bağlanabilir. Bölgesel reaktif güç kontrolü yapılması durumunda şebeke kayıpları üzerindeki etkisi düşünülmelidir [4,53].

2.1.2 Üretim kısıtlaması

Gerilim yükselmesi, dağıtık üretim sisteminin aktif güç çıkışını azaltmakla da düşürülebilir. Gerilim sınırları nadiren aşılyorsa, dağıtık üretim sisteminin işleticisi gerilimin yükseldiği zamanlarda üretiminin bir kısmını kısıtlamayı daha uygun

bulabilir. Bu kontrol türü, çıkış gücü, rüzgar hızı, ısıtım değeri, sıcaklık gibi dış faktörlere bağlı olan dağıtık üretim sistemleri için özellikle uygun olabilir [53].

Üretim kısıtlamasını sağlamanın en kolay yolu, gerilim yükselmesi olduğunda yeterli sayıdaki generatörün devre dışı bırakılmasıdır. Dağıtık üretimin aktif güç kontrolünün sürekli olarak yapıldığı kanat açısı kontrollu rüzgar generatörleri gibi sistemlerde, aktif güç kısıtlaması için devredışı bırakmaya gerek duyulmaz [53].

2.1.3 Aktif gerilim kontrolü

Dağıtık üretimin dağıtım şebekesine katılımının arttırılması ve gerilim kontrolünün iyileştirilmesi için, literatürde çok sayıda aktif gerilim işletme tekniği önerilmektedir [8,24,54,55].

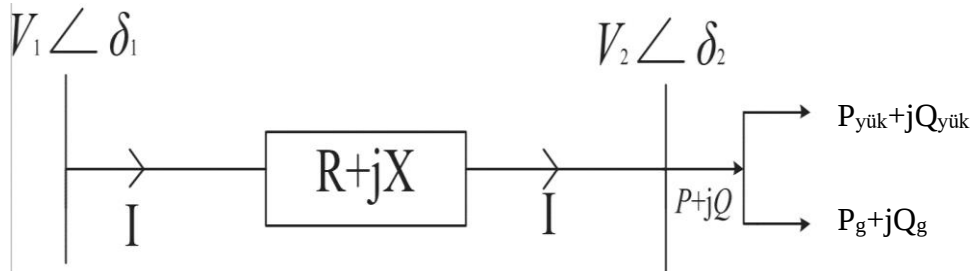
Bazı gerilim kontrol yöntemleri şöyledir: En basit yöntem, fiderdeki hatları değiştirerek iletken kesidini arttırıp empedansı düşürmek olsa da bu yöntem çok maliyetli olduğundan uygulaması pek mümkün değildir. İkinci yöntem ise anahtarlama işlemleri ile şebeke topolojisini yeniden düzenlemek olabilir ki, bu da gün içerisindeki üretim ve tüketimde büyük çaplı değişime neden olacağından uygun bir çözüm değildir. Diğer bir yaklaşım ise gerilim altında-yük atmadır ki, bu durum da tüketici kaybını gerektirdiğinden sürekli-hal gerilim probleminin çözümünden çok acil durum önlemi olarak değerlendirilir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan gerilim kontrol yöntemi ise yükün güç faktörünü iyileştirmektir. (2.1) eşitliğinde görüldüğü gibi yükün güç faktörü birim değerden uzaklaştıkça fider empedansının reaktif kısmından dolayı gerilim düşümü hızla artar. Mevcut şebekelerde genellikle güç faktörünü düzeltmek için anahtarlama kapasitörler kullanılarak bu kayıplar azaltılır. Bu kontrol yönteminde karşılaşılan problem, anahtarlama olaylarının bara geriliminde kademeli değişimlerle sonuçlanmasıdır. Bu da tüketiciye sunulan enerjinin kalite standartlarını düşürmek anlamına gelmektedir. Bu açıdan en iyi çözüm, statik senkron kompanzatörünün (STATCOM) kullanılmasıdır [8,53,55].

Etkili ve aynı zamanda en yüksek maliyetli çözüm ise şebekeyi güçlendirmek olabilir [8,56]. Mevcut dağıtım şebekelerinde gerilim yükselmesi problemi çoğunlukla şebeke güçlendirme gibi pasif yöntemlerle giderilmeye çalışılmaktadır. Oysa bu, dağıtık üretimin bağlantı maliyetini çok arttırmaktadır [33].

Yukarıda bahsedilen yöntemlere iyi bir alternatif olarak gerilim yükselmesi, aktif gerilim kontrol yöntemleriyle düşürülebilmektedir. Aktif gerilim kontrolü, şebekeye entegre edilecek dağıtık üretim sayısını arttırmakla birlikte çoğu durumda, dağıtım şebekesinin toplam maliyetini belirgin bir şekilde azaltmaktadır. Aktif gerilim kontrolü, dağıtım şebekesinden alınan bölgesel (yerel) ölçümlerin koordineli kullanılmasına dayanır. Dağıtık üretim sisteminin çıkış gücünün bölgesel kontroluyla gerilim yükselmesi problemi önlenabilir. Ayrıca, dağıtık üretim sisteminde üretim kısıtlaması da bölgesel ölçümlere dayanmaktadır. Bu iki bölgesel yöntem, şebekenin tüm kontrol olanaklarını kullanmadığından, şebekenin dağıtık üretim entegre kapasitesini koordineli gerilim yöntemleri kadar etkili bir şekilde arttıramazlar [33,53, 56,57].

Koordineli gerilim kontrol yöntemlerinin kontrol eylemleri basit kontrol kurallarına veya çeşitli optimizasyon algoritmalarına dayanır. Kontrol edilebilir elemanların sayısı arttıkça veya kontrol birkaç farklı amaç içeriyorsa kontrol kurallarının tayini karmaşık bir hal alacağından optimizasyon algoritmalarının kullanımı uygun olur. Koordineli gerilim kontrolünün uygulandığı elemanlar daha çok yük altında kademe değiştiren transformatörler (OLTC), şönt kapasitörler ve dağıtık üretim sistemleridir [33,53, 56,57].

2.2 Dağıtık Üretim Sistemlerinin Dağıtım Şebekelerinde Gerilim Profiline Etkisi



Şekil 2.1 : İki baralı test sistemi [41].

Bir dağıtık üretim sisteminin dağıtım şebekesine bağlanması, dağıtım şebekesindeki güç akışını ve gerilim profilini etkilemektedir. DÜS entegrasyonu, ters yönde güç akışına neden olduğundan, DÜS bağlantı noktasında gerilim profilini arttırıcı yönde etki etmektedir. Bu etki, dağıtım şebekelerinde hatların X/R oranları küçük olduğundan daha belirgindir [23,41,57]. Şekil 2.1’de verilen 2-baralı test sisteminde bu etki aşağıda verilen gerilim düşümü ifadesindeki gibi gösterilebilir [41]:

$$\Delta V = V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2 = (R + jX)I \quad (2.2)$$

$$I = \frac{P - jQ}{V_2^*} \quad (2.3)$$

$$P = P_g + P_{yük} \quad (2.4)$$

$$Q = Q_g + Q_{yük} \quad (2.5)$$

$$|\Delta V|^2 = \frac{(RP + XQ)^2 + (XP - RQ)^2}{V_2^2} \approx \frac{(RP + XQ)^2}{V_2^2} \quad (2.6)$$

Burada V_i ve δ_i , i . Baranın gerilim genliği ve açısını; P_g , Q_g , $P_{yük}$ ve $Q_{yük}$ sırasıyla DÜS ve yükün aktif ve reaktif güçlerini ifade etmektedir. $R+jX$ ise hat empedansdır. Eşitlik (2.6)'daki ifadeden görüldüğü üzere, hem RP ve hem de XQ ihmal edilmemiştir. Ayrıca X/R oranı küçük olduğu ve Q , P 'den küçük olduğu için, DÜS'ün aktif gücünün gerilim profili üzerindeki etkisi reaktif gücüne göre daha fazladır [23,41].

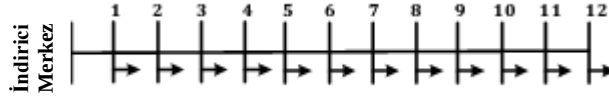
Eğer DÜS gücü sabit iken, yük $P_{yük,1}$ ve $Q_{yük,1}$ 'den $P_{yük,2}$ ve $Q_{yük,2}$ 'ye yükselirse; $V_{2,1}$ 'den $V_{2,2}$ 'ye düşen gerilim aşağıdaki gibi hesaplanır [23]:

$$V_{2,1} - V_{2,2} \approx \frac{R(P_{yük,2} - P_g) + X(Q_{yük,2} - Q_g)}{V_{2,2}} - \frac{R(P_{yük,1} - P_g) + X(Q_{yük,1} - Q_g)}{V_{2,1}} \quad (2.7)$$

Yukarıda verilen ifade, DÜS'ün gücü sabitken; DÜS'ün varlığının, yük değişiminin gerilim profili üzerindeki etkisini azalttığını göstermektedir [23].

2.3 Dağıtık Üretim Sistemi İçeren Şebekelerde Gerilim Profilini Etkileyen Faktörler

Bu bölümde gerilim profiline etki eden altı faktör irdelenmiştir. Bunlar, DÜS tarafında DÜS'ün konumu, dağılımı ve çıkış gücü ile fider tarafında yük dağılımı, iletken karakteristikleri ve indirici transformatör merkezindeki gerilim seviyesidir. Bu parametrelerin etkileri, Şekil 2.2'de gösterilen 11 kV'luk radyal 12-baralı test sistemi üzerinde yapılan simülasyonlar ile gösterilmiştir. Bu çalışmada, 6. ve 12. baralara, çıkış güçleri 0,04350 MW, 0,02835MVAr olan dağıtılmış üretim sistemlerinin bağlı olduğu varsayılmıştır. Bu sisteme ait veriler Çizelge 2.1'de verilmiştir.



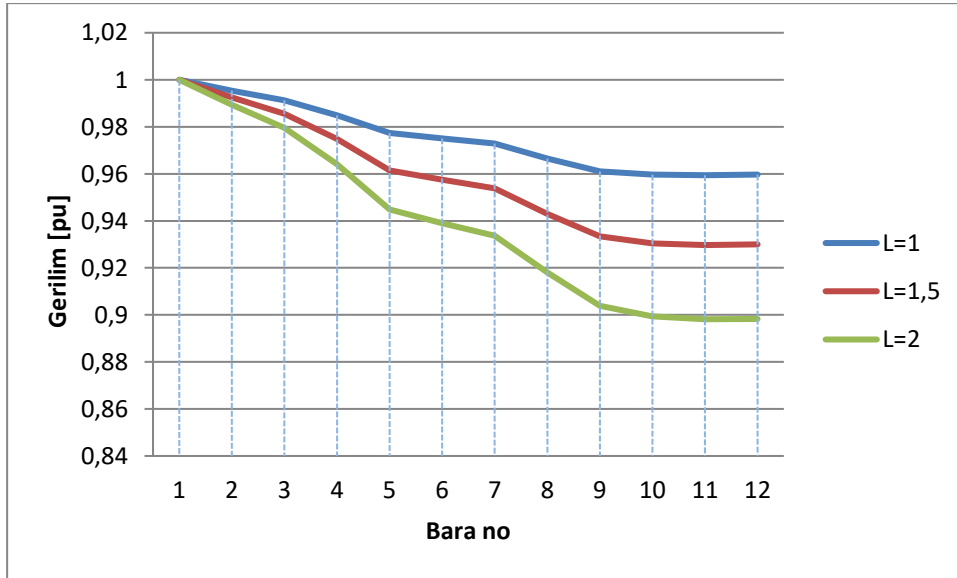
Şekil 2.2 : Çalışılan IEEE 12-baralı radyal test sistemi [58].

Çizelge 2.1 12-baralı sistem verileri [58].

Hat no	Bara no	Bara no	R(pu)	X(pu)	P _L (kW)	Q _L (kW)
1	1	2	0.00009	0.000038	0.06	0.06
2	2	3	0.000098	0.000041	0.04	0.03
3	3	4	0.000173	0.000072	0.055	0.055
4	4	5	0.000263	0.00011	0.03	0.03
5	5	6	0.00009	0.000038	0.02	0.015
6	6	7	0.000083	0.000034	0.055	0.055
7	7	8	0.000364	0.0001	0.045	0.045
8	8	9	0.000466	0.000132	0.04	0.04
9	9	10	0.000239	0.000068	0.035	0.03
10	10	11	0.000125	0.000035	0.04	0.03
11	11	12	0.000102	0.000029	0.015	0.015

2.3.1 Yük profili

Yük profilinin etkisini gözlemlemek için mevcut yükler bir L ($L=1, 1.5, 2$) katsayısı ile çarpılarak ($S' = L \times S$), bu koşullar için güç akışı analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Farklı yüklenme durumlarındaki gerilim profilleri.

Yukarıda verilen şekilden ve (2.8) eşitliğinden görüldüğü üzere, yüklenme arttıkça gerilim düşümü de artacağından gerilim fider boyunca düşmektedir. Hat uzunluğu arttıkça gerilim düşümü de artacağından, trafo merkezine en uzak baraların, gerilimleri

en düşük baralar olduğu görülmektedir. Yük yoğunluğunun fazla olduğu ve dolayısıyla bara gerilim değerlerinin alt sınır civarında olduğu bu gibi şebekelerde, entegre edilecek DÜS'ün gerilim profil kontroluna pozitif bir katkısı olabilecektir. Diğer taraftan, yük yoğunluğunun az olduğu zayıf şebekelerde DÜS bağlantısı gerilimin üst sınır değerlere ulaşmasına neden olabilmektedir. Bu gibi şebekelerde; aşırı gerilimlerin önlenmesi için, fiderin, ters yönde güç akışını engellemek amacıyla DÜS'e yakın konumda yeteri kadar yükün bulunması gerekir. Yine böyle bir şebekede, aşırı gerilimleri önlemek ve gerilim düşümünü arttırmak için, trafo merkezine uzak konumda yeterince yükün de olması gerekir.

$$\Delta U = (\chi \cdot L/q) \times I_p + L \times x_0 \times I_q \quad (2.8)$$

$$P_z = 3 \times R \times I^2 \quad (2.9)$$

Çizelge 2.2 : Farklı yük yoğunluklarında toplam hat kayıpları.

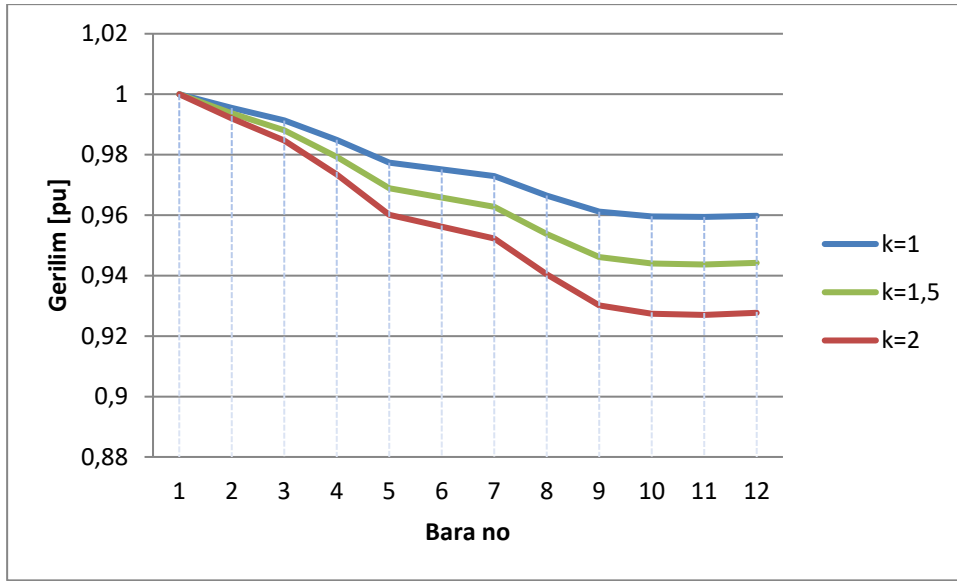
Hat Kaybı	L=1	L=1,5	L=2
$\sum P$ [MW]	0,01199	0,03409	0,06973
$\sum Q$ [MVA _r]	0,0047	0,01333	0,0272

Çizelge 2.2'de görüleceği üzere, yük yoğunluğunun dolayısıyla çekilen akımın artmasıyla hat kayıplarında büyük bir artış söz konusudur.

2.3.2 Fiderin iletken karakteristikleri

Dağıtım şebekelerinde R/X oranının yüksek olduğu bilinir. Direncin değeri, gerilimin genliğini belirler. Fider direncinin yüksek olması; güç akışı ileri yönde olduğunda büyük gerilim düşümlerine, güç akışı ters yönde olduğunda ise büyük gerilim yükselmelerine yol açar [24,59].

Bu çalışmada, farklı direnç değerlerinin etkisini gözlemlemek amacıyla, direnci bir k katsayısı ile çarparak ($Z=k \times R+jX$) yapılan simülasyonda elde edilen sonuçlar Şekil 2.4'te verilmiştir. Şekil 2.4'ten, R/X oranının artmasıyla beraber gerilim seviyesinin büyük ölçüde düştüğü görülmektedir. Çizelge 2.3'te görüldüğü gibi, iletken direncinin artmasıyla birlikte aktif güç kayıplarında büyük artış olmaktadır.

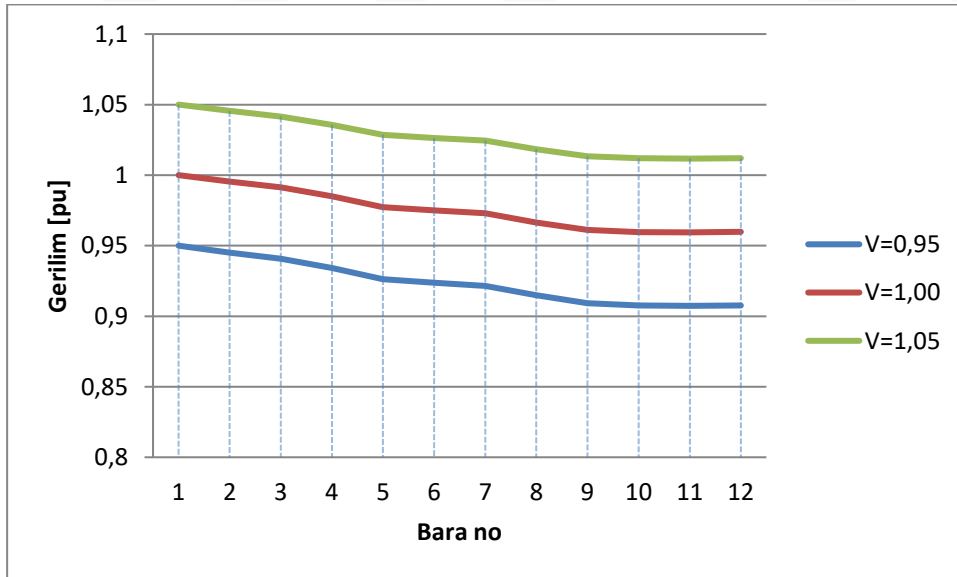


Şekil 2.4 : Farklı direnç değerleri için gerilim profilleri.

Çizelge 2.3 : Farklı direnç değerleri için kayıplar.

Hat Kaybı	k=1	k=1,5	k=2
$\sum P$ [MW]	0,01199	0,01845	0,02523
$\sum Q$ [MVar]	0,0047	0,00482	0,00494

2.3.3 Kaynak gerilim seviyesi



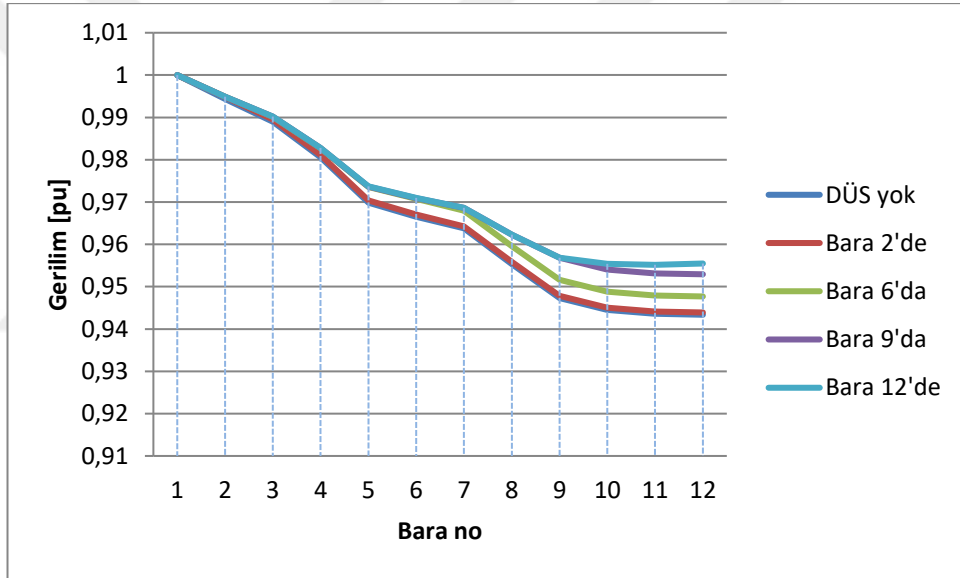
Şekil 2.5 : Farklı kaynak gerilim seviyeleri için gerilim profilleri.

Kademe dönüştürücü trafoların ve gerilim regülatörlerinin ayarı, fiderdeki gerilim profilini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Şekil 2.5’te, farklı kaynak gerilim seviyeleri için elde edilen gerilim profillerinde, kaynak gerilim seviyesinin düşürülmesi ile bütün baraların gerilimlerinin buna paralel olarak düştüğü; kaynak gerilim seviyesinin

yükseltilmesi ile de bütün baraların gerilimlerinin buna paralel olarak yükseldiği görülmektedir.

2.3.4 DÜS'ün konumu

DÜS'ün konumunu değiştirmekle, bir fider üzerindeki gerilim profilini değiştirmek mümkündür. Bu bölümde, çıkış gücü $P=0,04350$ MW $Q=0,02835$ MVar olan bir DÜS'ün sırasıyla Bara 2'den, Bara 6'dan, Bara 9'dan ve Bara 12'den fidere bağlı olduğu varsayılarak yapılan analizlerde elde edilen bara gerilim değerleri Şekil 2.6' da verilmiştir. Buradan gözlemlendiği üzere DÜS, fiderin uç noktalarına ne kadar yakın olursa, diğer bir deyişle ters yönde güç akışı ne kadar fazla olursa, baraların gerilim profillerindeki yükselme de o kadar fazla olur.



Şekil 2.6 : DÜS'ün farklı konumları için gerilim profilleri.

Çizelge 2.4'te, DÜS uç noktalara ne kadar yakınsa hat kaybının da o kadar az olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.4 : DÜS'ün farklı konumları için toplam hat kayıpları.

Hat Kaybı	DÜS yok	Bara 2'de	Bara 6'da	Bara 9'da	Bara 12'de
$\sum P$ [MW]	0,02069	0,02012	0,01729	0,01523	0,01489
$\sum Q$ [MVar]	0,00806	0,00782	0,00664	0,00601	0,00591

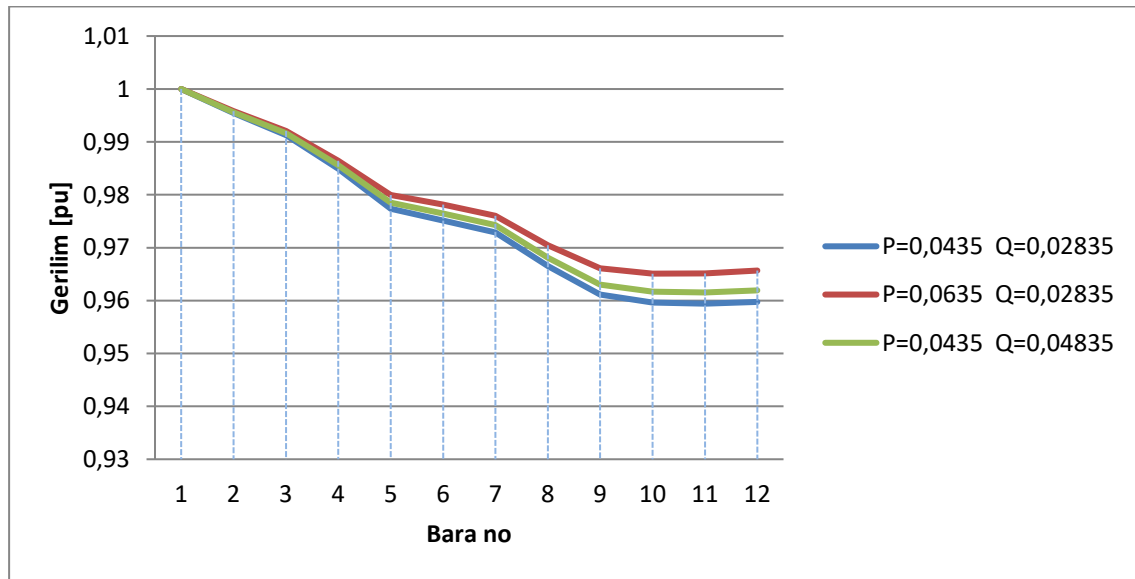
2.3.5 DÜS'ün çıkış gücü

Bu bölümde, Bara 6 ve Bara 12'de DÜS'lerin bağlı olduğu düşünülmüş ve bunların güçleri Çizelge 2.5'te verilen farklı senaryolar için sırasıyla analiz edilmiştir.

Çizelge 2.5 : DÜS'lerin çıkış gücü.

DÜS çıkış gücü	P [MW]	Q [MVA _r]
Koşul a	0,0435	0,02835
Koşul b	0,0635	0,02835
Koşul c	0,0435	0,04835

Koşul b 'de DÜS'lerin aktif gücü 20 kW arttırılmış, Koşul c'de ise reaktif güçleri 20 kVA_r arttırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.7'de çizdirilmiştir. Aşağıda verilen şekile göre, DÜS'ün çıkış gücü arttırıldıkça gerilim seviyeleri de yükselmektedir. Burada dikkat çeken özellik, DÜS'ün aktif gücündeki 20 kW'lık bir artışın, reaktif gücündeki 20 kVA_r'lık bir artıştan daha fazla gerilim yükselmesine sebep olduğudur. Kullanılan 12-baralı test sisteminde, fidere çok düşük güçte DÜS entegre edildiğinden bara gerilimleri müsaade edilen aralıktadır. Ancak yük yoğunluğunun az olduğu şebekelerde yüksek güçlü DÜS entegrasyonu gerilimin üst sınır değerleri aşması gibi bir problemi beraberinde getirecektir.



Şekil 2.7 : Farklı DÜS güçleri için gerilim profilleri.

Çizelge 2.6'da bu üç senaryo için güç kayıpları verilmiştir. DÜS'ün çıkış gücü artırıldığında hat kayıplarının da azaldığı görülmektedir.

Çizelge 2.6 : Farklı DÜS güçleri için kayıplar.

Hat Kaybı	a	b	c
$\sum P$ [MW]	0,01199	0,01018	0,01016
$\sum Q$ [MVar]	0,0047	0,004	0,00399

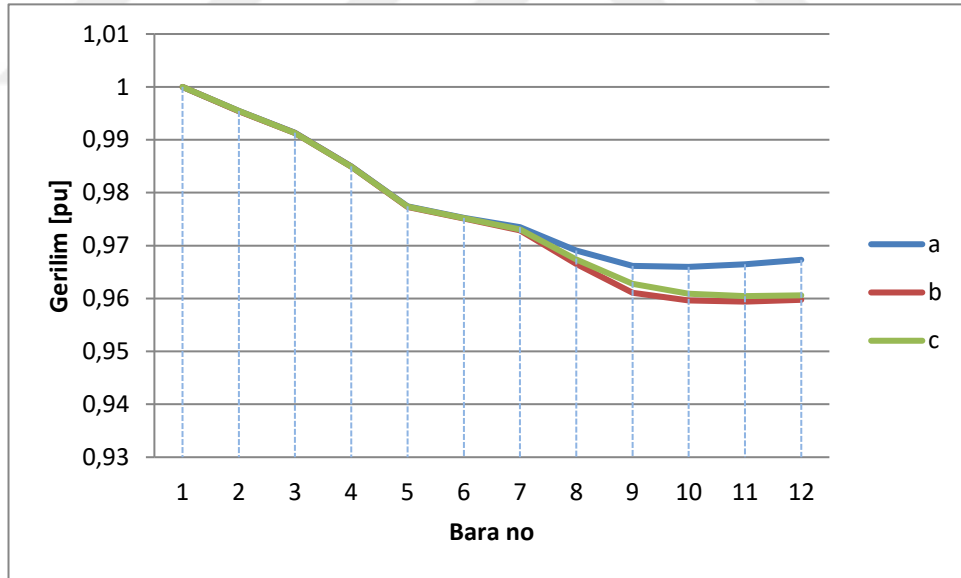
2.3.6 DÜS'lerin dağılımı

Büyük güçlü bir DÜS'ün ve düşük güçlü dağınık birkaç DÜS'ün sisteme entegrasyonu ile gerilim profilinin nasıl değişeceğini incelemek için üç farklı senaryo düşünülmüştür. Bunlar:

a: $P=0,0870$ $Q=0,05670$ DÜS bara 12'de

b: $P=0,0435$ $Q=0,028350$ DÜSler bara 6 ve 12'de

c: $P=0,0290$ $Q=0,01890$ DÜSler bara 6, 9 ve 12'de



Şekil 2.8 : Farklı DÜS dağılımları için gerilim profilleri.

Çizelge 2.7 : Farklı DÜS dağılımları için hat kayıpları.

Hat Kaybı	a	b	c
$\sum P$ [MW]	0,01054	0,01199	0,01153
$\sum Q$ [MVar]	0,00426	0,0047	0,00456

Üç farklı DÜS dağılım senaryosu için elde edilen gerilim profilleri ve hat kayıpları sırasıyla, Şekil 2.8 ve Çizelge 2.7’de verilmiştir. Büyük güçlü bir DÜS’ün, baraların gerilim değerlerinde düşük güçlü ve dağınık konumda birkaç DÜS’ten daha etkili bir yükselmeye neden olduğu Şekil 2.8’de görülmektedir.

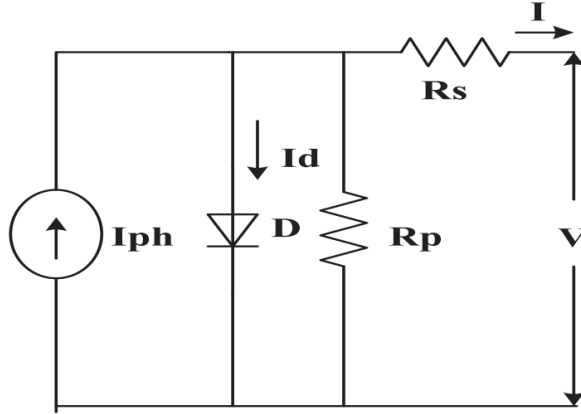
Bir sonraki bölümde, ülkemiz dahil pek çok ülkede şebekeye katılımı hızla yaygınlaşan DÜS’lerden biri olan aynı zamanda bu tezin kapsamına giren fotovoltaik güneş sistemleri hakkında bilgi verilecektir.



3. FOTOVOLTAİK SİSTEM EVİRİCİLERİNİN STATCOM OLARAK KONTROLÜ (PV-STATCOM)

3.1 Fotovoltaik Hücre Elektriksel Modeli

Fotovoltaik paneller, DA gerilim üreten fotovoltaik hücrelerden oluşurlar. Yük AA olduğundan, DA/AA dönüşümü yapan bir evirici, kendisi tarafından üretilen harmonik bileşenleri giderecek bir filtre ve fotovoltaik sistemin şebeke bağlantı noktasındaki bir trafo da sisteme dahildir. Fotovoltaik paneller, güç çıkışını arttıracak şekilde birbirine seri veya paralel bağlı fotovoltaik hücrelerden meydana gelirler. Şekil 3.1’de fotovoltaik hücreye ait elektriksel model verilmiştir. Fotovoltaik hücrenin elektrik üretimi bir akım kaynağı olarak gösterilir. Hücrenin üreteceği elektrik akımı, hücre üzerine düşen ışınımın artmasıyla birlikte artar. Fotovoltaik hücrenin gövdesi, yarı iletken malzeme olması nedeniyle diyotla modellenmiştir. Jonksiyonda üretilen enerjinin kutuplara iletilmesi sırasında oluşan kayıplar seri direnç ile sembolize edilir. Seri direnç ile ifade edilen bu kayıplar, hücre verimini doğrudan etkiler [60,61].



Şekil 3.1 : Fotovoltaik hücreye ait eşdeğer devre [60].

Burada çıkış akımı I , Kirchhoff yasasına göre belirlenir [60]:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (3.1)$$

a ısı gerilimi olarak ifade edilir ve bu parametre şu şekilde belirlenir [60]:

$$a = \frac{N_s \cdot A \cdot k \cdot T_C}{q} \quad (3.2)$$

Burada A diyotun idealitesidir. I_{ph} , güneş ışınımının oluşturduğu akım kaynağı olarak gösterilen akım değeri ve I_d ise diyot akımıdır [60]:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

Çıkış akımı ise şu şekilde verilir [60]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (3.4)$$

I_0 ve imalatçıdan temin edilen ($V_{oc,ref}$, $T_{C,ref}$, A ve $\mathcal{E}_G$) gibi parametreler PV hücre teknolojisine bağlı olsa da a ve T_C anlık sıcaklığa bağlı olduğundan I_0 gerçek zamanlı olarak şu şekilde hesaplanır [60]:

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_C}{T_{C,ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{q \mathcal{E}_G}{A \cdot k} \right) \left(\frac{1}{T_{C,ref}} - \frac{1}{T_C} \right) \right] \quad (3.5)$$

Burada;

I_{ph} : Güneş ışığı tarafından üretilen elektrik akımı (güneş ışınımı ve hücre sıcaklığının bir fonksiyonudur)

I_0 : Diyotun doyma akımı (hücre sıcaklığının bir fonksiyonudur)

V : Fotovoltaik hücre uç gerilimi

I : Fotovoltaik hücre çıkış akımı

R_p : Paralel direnç

R_s : Seri direnç

k : Boltzmann sabiti (1.381×10^{-23} J/K)

T_C : Hücre sıcaklığı Kelvin cinsinden (0K)

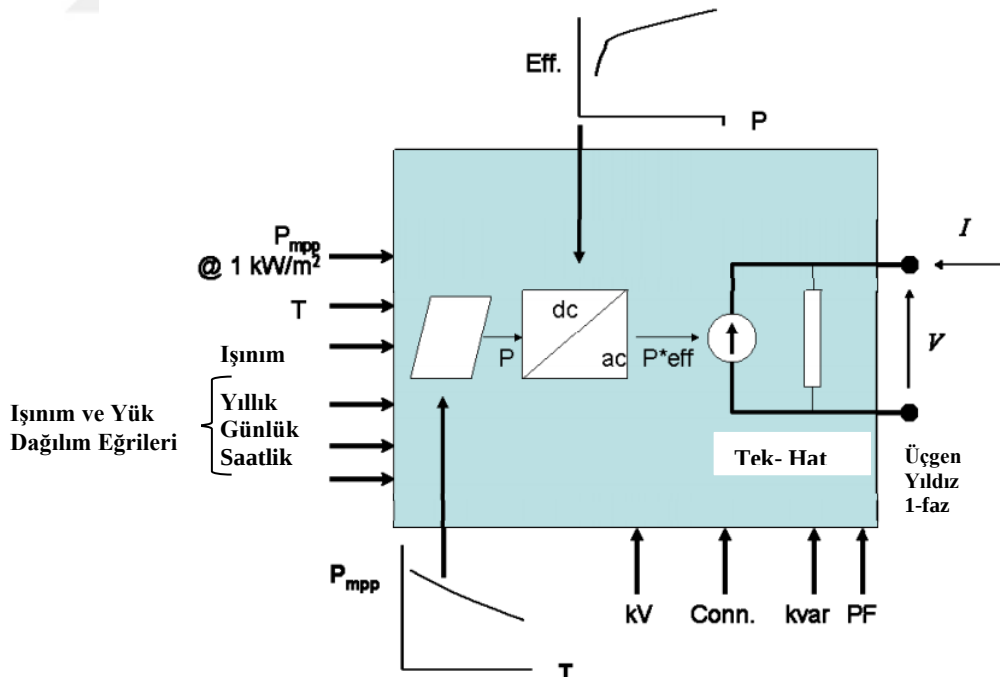
q : Elektron yükü ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

A : diyot idealitesi

3.2 OpenDSS PV Sistem Modeli

OpenDSS (The Open Distribution System Simulator), 1997 yılında EPRI (Electric Power Research Institute) tarafından elektrik dağıtım sistemleri için geliştirilmiş kapsamlı bir simülasyon aracıdır. Açık kaynak kodlu olan bu program; akıllı şebeke, şebeke modernizasyonu ve yenilenebilir enerji araştırmalarıyla ilgili gelecekteki ihtiyaçları karşılamak için tasarlanmış birçok yeni analiz türünü destekler. OpenDSS, gelecekteki ihtiyaçları karşılayacak şekilde kolayca değiştirilebilmesi için genişletilebilir olacak şekilde tasarlanmış ticari olmayan bir simülasyon programıdır [62].

OpenDSS bünyesinde PV sistemlerin dağıtım şebekelerine etkilerini incelemek amacıyla, hem PV paneli hem de eviriciyi kapsayan uygun bir PV sistem modeli bulunmaktadır. Modelin şematik diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu modelde, PV panelin maksimum güç noktası (MPP) izleyicisi de içeren evirici yapısı kullanılmıştır [63].

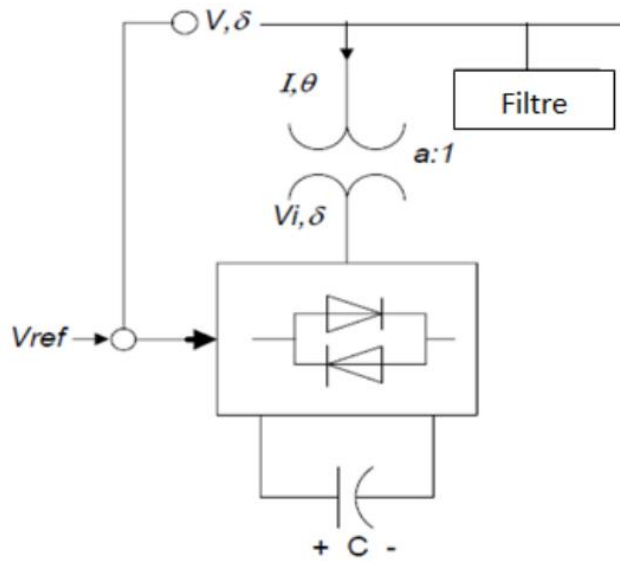


Şekil 3.2 : PV sistemin OpenDSS’teki blok diyagram modeli [63].

Burada üretilen aktif güç, P ; ısınım, sıcaklık ve maksimum güç noktasındaki nominal gücün (P_{mpp}) bir fonksiyonudur. Buna ilave olarak, eviricinin işletme gücü ve gerilimindeki verimliliği de uygulanarak üreteceği güç P hesaplanır [63].

3.3 Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

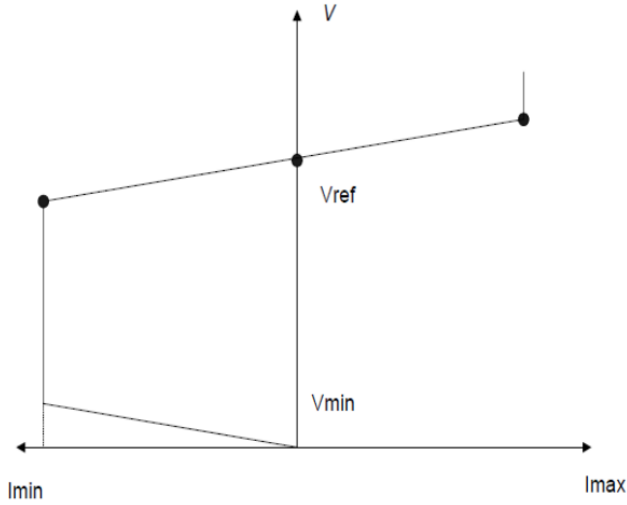
STATCOM, şebekeye şönt bağlanan güç elektroniği tabanlı bir reaktif güç kompanzatörüdür. STATCOM, bir DA kapasitör, evirici ve bir bağlantı transformatöründen oluşmaktadır [64,65]. STATCOM'un genel yapısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : STATCOM'un genel yapısı [66].

STATCOM'un yapısındaki gerilim kaynaklı evirici, DA giriş gerilimini şebeke frekansında üç fazlı çıkış gerilimine dönüştürür. STATCOM'un çıkış geriliminin genliği değiştirilerek AA sistemi (şebeke) ve evirici arasındaki reaktif güç alışverişi kontrol edilir. Çıkış geriliminin genliği AA sisteminin gerilim genliğinden büyükse, evirici AA sistemi için reaktif güç üretir. Çıkış geriliminin genliği AA sisteminin gerilim genliğinden küçükse, evirici AA sisteminden reaktif güç çeker. Çıkış gerilimi AA sisteminin gerilimine eşitse reaktif güç alışverişi olmaz. AA sistemi ve evirici arasındaki aktif güç alışverişi, AA sisteminin gerilimi ile evirici çıkış gerilimi arasındaki faz açısı değiştirilerek kontrol edilir. Evirici çıkış gerilimi AA sisteminin geriliminden ileri fazda tutulursa evirici AA sistemine aktif güç verir. Evirici çıkış gerilimi AA sisteminin geriliminden geri fazda tutulursa evirici AA sisteminden aktif güç çeker. Sürekli halde STATCOM ve AA sistemi arasındaki güç alışverişi

çoğunlukla reaktiftir. Şebekeden aktif güç STATCOM'un iç kayıplarını karşılamak için çekilir [66,67].



Şekil 3.4 : STATCOM'a ait V-I karakteristiği [66].

STATCOM'un V-I eğrisi Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, STATCOM kapasitif ve endüktif kompanzasyon sağlayabilir ve AA sisteminin geriliminden bağımsız olarak çıkış akımını kontrol edebilir. Herhangi bir gerçek sistem gerilim değerinde tam kapasitif veya tam endüktif çıkış akımı sağlayabilmesi, STATCOM'un SVC'ye üstünlüklerinden biridir. Çünkü düşük AA sistem gerilimde SVC'nin çıkış akımı da azalmaktadır. STATCOM için gerekli kurulum alanı SVC'den %50 daha küçüktür. Ayrıca, sürekli halde daha büyük yükleri beslemek için, STATCOM, SVC'ye göre daha fazla reaktif güç sağlayabilir [66,67].

3.4 Fotovoltaik Sistem Eviricilerinin STATCOM olarak kontrolü (PV-STATCOM)

Fotovoltaik enerji, yenilenebilir enerjilerin en temiz formlarından biridir. Fotovoltaik güneş sistemleri yüksek maliyetli yatırımlar olsa da dünya genelindeki pek çok ülke teşvik programları ile bu teknolojinin ticari ve evsel kullanımına destek vermektedir. Bu nedenle çok sayıda fotovoltaik sistem güç sistemlerine entegre edilmektedir [19,68].

Fotovoltaik sistemler sadece gün içerisinde aktif güç üretirken, gece ise ışıyım olmadığından çalışmaz. Bu ölçüde pahalı bir yatırım, gece saatlerinde tamamen kullanılmaz bir durumda olup yatırımcısı adına hiçbir kazanç sağlamamaktadır. Fotovoltaik sistemlerdeki anahtar eleman olan gerilim kaynaklı evirici (VSI), aynı

zamanda FACTS cihazlarından biri olan STATCOM'un da esas elemanıdır [18,19]. Fotovoltaik sistemlerdeki eviricilerin STATCOM olarak kullanılmasını öneren ve "PV-STATCOM" olarak isimlendirilen yenilikçi bir evirici kontrol tasarımı 2009-2011 yılında Rajiv K. Varma tarafından [18,68]'de tanıtılmıştır.

[18]'de, PV güneş sisteminin STATCOM olarak işletilebilmesine olanak sağlayan yeni evirici kontrolörü, Kanada'da Bluewater Power Corporation'a bağlı 10 kW'lık fotovoltaik sisteme uygulanmış ve PV-STATCOM kontrolörünün 24 saat boyunca sürekli hal ve geçici hal performansları gösterilmiştir. [68]'de 10 kVA gücündeki bir PV-STATCOM'un, gerilim kontrolü ve güç faktörü düzenlenmesi amacıyla hem gece saatlerinde hem de nominal aktif gücünün üretilmediği gündüz saatlerinde STATCOM olarak işletilebilmesi, Kanada'daki başka bir yerel bir dağıtım şirketine (London Hydro power company) ait fiderde uygulamalı olarak gösterilmiştir. [69]'da sunulan analizler ise 100 MVA'lık bir PV-STATCOM 'un hem gün içi hem de gece saatlerinde iletim şebekesinde kararlı güç transfer kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. [70]'te ise, ilk defa PV-STATCOM sistemlerinin dağıtım şebekelerinde optimal yerleştirilmesi ve boyutlandırılması problemi ele alınmıştır.

3.4.1 PV-STATCOM'un işletme modeli

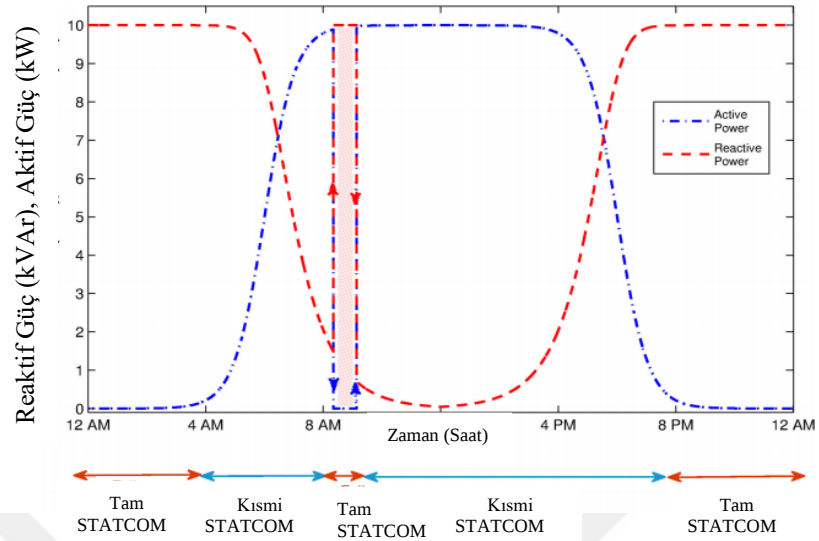
PV-STATCOM'un üç çalışma şekli vardır [18-20]:

Tam PV modu: Burada PV-STATCOM sistemi şebekeye sadece aktif güç verir. Reaktif gücü sıfırdır.

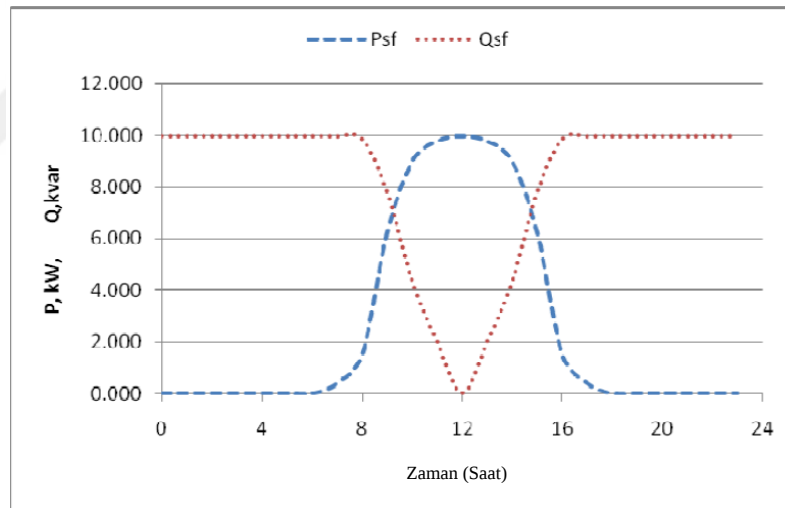
Kısmi STATCOM modu: Bu işletme şekli gündüz saatlerinde elverişlidir. Gündüz saatlerinde aktif güç üretiminden arta kalan evirici kapasitesi ile, şebeke ile santral arasında bir STATCOM gibi reaktif güç alışverişi yapılır. Bu işletme şeklinde öncelik aktif güç üretimindedir. PV-STATCOM'un reaktif güç alış-veriş kabiliyeti [$kVAr = \sqrt{(kVA^2 - kW^2)}$] ile formülize edilmiştir.

Tam STATCOM modu: Bu işletme şekli güneş ışığının olmadığı gece saatlerinde aktiftir. Ayrıca gündüz saatlerinde şebekede reaktif güç kompanzasyonuna kritik ihtiyacın geliştiği bir arıza olması durumunda bu moda geçilir. Şekil 3.5'te örnek olarak gösterildiği gibi, gün içinde reaktif güç desteğini gerektiren geçici bir hal durumunda, aktif güç üretimine ara verilerek reaktif güç alışverişine öncelik verilir.

Şebeke desteğine gereksinim tamamlandığında fotovoltaik sistem tekrar normal aktif güç üretimine devam eder.



Şekil 3.5: STATCOM olarak kontrol edilen akıllı PV eviricinin işletme şekilleri [20].



Şekil 3.6 : 10 kVA'lık bir PV-STATCOM'a ait aktif güç üretimi ve reaktif güç kapasitesi [68].

Şekil 3.6' da 10 kVA'lık bir fotovoltaik sistemin gün içerisinde ürettiği aktif güç mavi çizgi ile gösterilmiştir. Akşam 21:00 ile sabah 6:00 arasında hiç aktif güç üretilmediğinden eviricinin tüm kapasitesi bir STATCOM gibi reaktif güç alışverişine elverişlidir. Sistemin gün içerisinde de sabah saatlerinde ve akşama yaklaşılan saatlerde, ışıının az olmasından dolayı fotovoltaik sistem nominal aktif gücü üretilmediği için hala büyük ölçüde reaktif güç desteği kapasitesine $[kVar = \sqrt{(kVA^2 - kW^2)}]$ sahip olduğu görülmektedir [68].

Çok sayıda PV-STATCOM'un dahil olduğu dağıtım şebekelerinde, önerilen amaç ölçütleri için Volt/VAr kontrol probleminin matematiksel modeli bundan sonraki bölümde açıklanacaktır.



4. PV-STATCOM İÇEREN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE VOLT/VAR OPTİMİZASYON PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

4.1 Çoklu-Amaç Fonksiyonu

Bu çalışmanın hedefi; ağırlıklandırılmış çoklu-amaç fonksiyonu minimize edilirken, dağıtım şebekesinde bulunan çok sayıdaki PV-STATCOM olarak işletilen fotovoltaik güneş sisteminin 24-saatlik optimal reaktif güç çizelgelemesinin kararlaştırılmasıdır. Şebekenin güvenli çalışmasını sağlamak için dağıtım sisteminin optimizasyonu; dağıtım sistemi ekipmanlarının (hatlar, reaktif güç kontrol ekipmanları vb.) kısıtlamalarını karşılarken, belirlenen kontrol değişkenleri kullanılarak amaç fonksiyonunun en aza indirilmesini gerektirir. Bu çalışmada önerilen amaç fonksiyonu iki faktörden oluşur: (i) şebekedeki aktif güç kayıplarının bir gün içinde saatlik olarak en aza indirilmesi (ii) çok sayıda PV-STATCOM içeren bir şebekede saat başına enerji net maliyetinin en aza indirilmesi. Problemin çoklu-amaç işlevi şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\min \quad w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (4.1)$$

burada w_1 ve w_2 ağırlık katsayıları olup, bu çalışma için $w_1 = 0.5$ ve $w_2 = 0.5$ olarak atanmıştır. f_1 , aktif güç kayıplarını en aza indiren ilk amaç fonksiyonuyken; f_2 ise, maliyet minimizasyonu ile ilgili amaç fonksiyonudur. f_1 ve f_2 matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$f_1 = \sum_{i=1}^n 3R_i |I_{t,i}|^2 \quad (4.2)$$

$$f_2 = M_{EN} + M_{YAT-PV} + M_{YAT-PV-STATCOM} + M_{İŞL-BAK} - M_{HUR} \quad (4.3)$$

burada n toplam bara sayısı, R_i , i . hattın direnci ve $I_{t,i}$, i . hattaki t . saatte akan akımdır. (4.3) 'te verilen denklemde, tüm maliyet kalemleri \$/h cinsinden hesaplanmış olup açılımları aşağıda ayrı ayrı verilmiştir:

(i) İndirici transformatörden çekilen enerjinin maliyeti:

$$M_{EN} = P_{tr} \times Fiyat_P + Q_{tr} \times Fiyat_Q \quad (4.4)$$

P_{tr} : İndirici Transformatörden çekilen aktif enerji (kWh)

Q_{tr} : İndirici Transformatörden çekilen reaktif enerji (kVarh)

$Fiyat_P$: Gün öncesi market piyasasına göre dağıtım şirketinin ödeyeceği aktif enerji bedeli (\$/kWh)

$Fiyat_Q$: Gün öncesi market piyasasına göre dağıtım şirketinin ödeyeceği reaktif enerji bedeli (\$/kVarh)

Bu çalışmada; literatürdeki pek çok çalışmadan farklı olarak, enerji maliyeti hesaplanırken aktif enerjinin yanısıra reaktif enerjinin maliyeti de dikkate alınmıştır.

(ii) Fotovoltaik güneş santrallerinin yatırım maliyeti:

$$M_{YAT-PV} = \frac{P_{S_PV} \times Y_{PV} \times SKF}{T} \quad (4.5)$$

Burada P_{S_PV} , şebekedeki tüm fotovoltaik güneş santrallerinin toplam kurulu gücünü ifade eder. Y_{PV} ise, fotovolatik güneş santralinin kW başına düşen \$ cinsinden yatırım maliyetidir. T , santralin bir yıldaki toplam çalışma süresi olup 8760 saate karşılık gelmektedir. Santral yatırımının, faiz oranı ve santral ömrü dikkate alınarak her bir yıla karşılık gelen payı, toplam sermaye bedelinin SKF ile çarpılmasıyla elde edilir. SKF ile gösterilen sermaye koruma faktörü (Capital Recovery Factor), $SKF = \frac{f \cdot (1+f)^{\bar{O}}}{(1+f)^{\bar{O}} - 1}$ olarak tanımlanmıştır [71]. Burada f , faiz oranını ve $\bar{O}$, santral kullanım ömrünü ifade eder. Bu çalışmada, PV sistemlerinin ve PV-STATCOM kontrolörlerinin tüm kullanım ömrü 25 yıl olarak kabul edilmiştir. Saat başına net maliyet, toplam yaşam döngüsü maliyetinin tüm yaşam boyunca saat sayısına oranı olarak hesaplanır [13].

(iii) PV-STATCOM kontrolörlerinin yatırım maliyeti:

$$M_{YAT-PVSTATCOM} = R \times M_{YAT-PV} \quad (4.6)$$

PV-STATCOM kontrolörlerinin kurulum maliyeti, Rajiv K. Varma'nın önerisiyle fotovoltaik güneş santral yatırım maliyetinin % 2'si olarak alınmıştır ($R = \% 2$).

(iv) Fotovoltaik güneş santrallerinin işletme ve bakım maliyeti:

$$M_{i\mathcal{S}L\&BAK} = \frac{P_{S_PV} \times i\mathcal{S}L\&BAK_{PV}}{T} \quad (4.7)$$

Burada $\dot{I}SL\&BAK_{PV}$, santrallerin bir yıl boyunca birim işletme ve bakım maliyetine (\$/kW) karşılık gelir.

(v) Fotovoltaik santrallerin hurda ekipmanlarının satış fiyatı

(Resale cost of salvageable system components):

$$M_{HUR} = \frac{P_{S_PV} \times Y_{PV} \times J}{T \times \dot{O}} \quad (4.8)$$

Burada J , hurda değeri (salvage value) oranı olup %10 olduğu kabul edilmiştir [72].

4.2 İşletme Sınırları

Dağıtım şebekesine ait işletme sınırları aşağıda verilmiştir:

- Bara gerilimlerine ait sınırlar:

$$V^{min} \leq V_i \leq V^{maks} \quad i=1,2,\dots,N_B \quad (N_B : \text{Bara sayısı})$$

Burada V_i , i . baraya ait gerilimin genliğini ifade eder. V^{min} ve V^{maks} , sırasıyla bara gerilim genliklerinin alt ve üst sınırlarını gösterir.

- PV-STATCOM'ların reaktif güç sınırları:

$$Q_{PVSTATCOM_i}^{min} < Q_{PVSTATCOM_i} < Q_{PVSTATCOM_i}^{maks} \quad i=1,2,\dots,N_{PV-STATCOM}$$

STATCOM

Burada $Q_{PVSTATCOM_i}$, i . PV-STATCOM'un reaktif gücüne karşılık gelir. $Q_{PVSTATCOM_i}^{min}$ ve $Q_{PVSTATCOM_i}^{maks}$ ise, i . PV-STATCOM'un sırasıyla minimum ve maksimum reaktif güç sınırlarını ifade eder. $N_{PV-STATCOM}$ ise, şebekedeki PV-STATCOM sayısıdır.

- Kabloların akım taşıma kapasite sınırları:

$$I_i < I_i^{maks} \quad i=1,2,\dots,N_k \quad (N_k : \text{Kablo sayısı})$$

Bu bölümde, ele alınan optimizasyon probleminin matematiksel modeli verilmiştir. Bundan sonraki bölümde, tez kapsamında dağıtım kayıpları ve enerji maliyetini minimize etmeyi hedefleyen Volt/VAr optimizasyon probleminin çözümü için kullanılan algoritmalar tanıtılacaktır.



5. OPTİMİZASYON PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR

5.1 Ateş Böceği Algoritması

Metasezgisel algoritmalar, günümüz bütünsel optimizasyon algoritmalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu algoritmalar genellikle çok değişkenli doğadan esinlenen algoritmalar. Metasezgisel algoritmalar sıklıkla sürü zekası temelli algoritmalar olup bu sürü zekası-temelli algoritmalar kuş, balık, insan vb. gibi biyolojik etkenlerin sürü zekası karakteristiklerini örnekleyerek geliştirilmişlerdir. Örnek olarak, parçacık sürü optimizasyonu kuş ve balıkların sürü davranışlarını temel alırken, ateş böceği algoritması ise tropik ateşböceklerinin kırpışma (yanıp sönme) örüntüsünü modeller [73].

Son yirmi yılda, oldukça güç-karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü için, parçacık sürü optimizasyonu, diferansiyel gelişim algoritması, yarasa algoritması, karınca kolonisi algoritması ve ateş böceği algoritması gibi çok sayıda yeni algoritma geliştirilmiştir. Bu yeni algoritmalar arasında ateş böceği algoritması (AA) bütünsel optimizasyon problemlerinin çözümünde oldukça etkilidir [73].

5.1.1 Ateş böceklerinin davranışı

Yaz mevsiminde tropik ve ılıman bölgelerde ateş böcekleri kırpışan (yanıp sönen) ışıkları ile gökyüzünde harika bir manzara sergiler. İkibinin üzerinde ateş böceği türü mevcuttur ve bunların büyük bir kısmı kısa ve ritmik ani ışıklar (flashes) üretir. Bu kırpışma örüntüsü (pattern of flashes) çoğunlukla her bir tür için benzersizdir. Kırpışan ışık bir biyolojik-ışıldama süreci sonunda üretilir ve bu tarz sinyalleşme sistemlerinin esas nedeni tartışılmaktadır. Bununla birlikte bu kırpışan ışıldamaların iki ana nedeninin avlarını ve çiftleşme eşlerini cezbetmek olduğu düşünülmektedir. Kırpışan ışıldamalar ayrıca, yırtıcı hayvanlara karşı koruyucu bir uyarma mekanizması işlevi de görebilir. Ritmik kırpışma, kırpışmanın sıklığı ve süresi sinyal sisteminin bir kısmını oluşturarak iki cinsiyeti bir araya getirir [74-77].

Bilindiği gibi, ışık kaynağından r kadar uzaklıktaki ışık yoğunluğu ters kare kanunu ile ilişkilidir. Dolayısıyla ışık yoğunluğu I , mesafe r 'nin artışının karesiyle ters orantılı olarak azalır. Buna ilaveten, hava ışığı emdiği için ışık yoğunluğu daha da zayıflar. Bu iki faktörün etkisi ile çoğu ateş böceği sınırlı bir uzaklıkta görünür ki bu genellikle geceleri bir kaç yüz metredir ve bu da ateşböceklerinin haberleşmesi için yeterlidir. Kırpışan ışık formülize edilerek optimize edilecek amaç fonksiyonu ile ilişkilendirilir ve böylelikle yeni bir optimizasyon algoritması elde edilir [74-77].

5.1.2 Ateş böceği algoritması

Xin-She Yang tarafından ateş böceklerinin kırpışma (yanıp sönme) karakteristikleri idealize edilerek 2008 yılında ateş böceği algoritması geliştirilmiştir. Kolaylık sağlaması açısından algoritmada aşağıdaki üç idealize edilmiş kural kullanılmıştır [74-75]:

1. Ateş böceklerinin tamamı tek cins kabul edilmiştir. Buna göre, tüm ateş böcekleri cinsiyetten bağımsız olarak diğer ateş böcekleri tarafından çekilebilir.
2. Ateş böceklerinin çekicilikleri (cezbedicilikleri), parlaklıkları ile orantılıdır. Buna göre, kırpışan herhangi iki ateş böceğinden daha az parlak olan ateş böceği, daha parlak olan ateş böceğine doğru hareket eder. İki ateş böceği arasındaki mesafe arttıkça çekicilik de parlaklık gibi azalır. Bir ateş böceği, kendisinden daha parlak başka bir ateş böceği olmadığı durumda rastgele hareket eder.
3. Bir ateş böceğinin parlaklığı, amaç fonksiyonu olarak belirlenebilir veya ondan etkilenir.

5.1.3 Işık yoğunluğu ve çekicilik

Ateş böceği algoritmasında iki temel esas vardır. Bunlar; ışık yoğunluğunun değişimi ile çekiciliğin formülasyonudur. Basitlik sağlaması bakımından, ateş böceğinin çekiciliğinin; kodlanmış amaç fonksiyonu ile ilişkili olan parlaklığına veya ışık yoğunluğuna bağlı olduğu varsayılır. Optimizasyon problemlerinin en basit halinde, ateş böceğinin parlaklığı (I), belli bir konumu (x); parlaklık uzaklığa bağlı olduğundan $I(x)$ $\propto f(x)$ olarak gösterilir. Ancak; çekicilik (β) göreceli olduğundan, bakan bireye veya diğer ateş böceklerinin değerlendirmesine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu

nedenle çekicilik, i ve j konumundaki ateş böcekleri arasındaki uzaklığa (r_{ij}) bağlıdır. Ayrıca, ışık ortam tarafından emildiği için kaynaktan uzaklaştıkça ışık yoğunluğu düşer. Bu ise, çekiciliğin soğurma (emilim) derecesine bağlı olduğunu ifade eder [74,76,77].

En basit halinde, ters-kare kanununa göre ışık yoğunluğunun uzaklığa bağlı değişimi [75]:

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1’de I_s , kaynaktaki ışık yoğunluğunu gösterir. $r=0$ ’da, I_s/r^2 ifadesinde teklikten kaçınmak için, hem ters kare yasasının hem de soğurmanın birleşik etkisi aşağıdaki Gauss formu olarak yaklaşık olarak tahmin edilebilir [75]:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.2’de I_0 , $r=0$ noktasındaki orjinal ışık yoğunluğudur. Eşitlik 5.2’ de, ışığı soğurma (emilim) katsayısı sabit bir γ değeri olan bir ortamda, mesafeye (r) göre ışık yoğunluğunun değişimi $I(r)$ verilmiştir.

Bir ateş böceğinin çekiciliği, çevresindeki diğer ateşböcekleri tarafından görülen ışığının yoğunluğuyla doğru orantılıdır. Bir ateş böceğinin çekiciliğinin (β) ifadesi Eşitlik 5.3’te verilmiştir [75]:

$$\beta = \beta_0 e^{(-\gamma r^2)} \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3’te β_0 , $r=0$ konumundaki çekiciliktir. Herhangi iki i ve j ateş böcekleri arasındaki uzaklık (x_i, x_j), Eşitlik 5.4’te verilen kartezyen uzaklıktır [75]:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (5.4)$$

(5.4)’te verilen eşitlikte x_{ik} : i . ateş böceğinin, k . bileşeninin konumunu ifade eder.

İki boyutlu uzayda [75]:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5.5)$$

olarak gösterilir. i . ateş böceğinin kendisinden daha çekici (daha parlak) olan j . Ateş böceğine hareketi, matematiksel olarak (5.6)’daki gibi ifade edilir [75]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{(-\gamma r_{ij}^2)} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \varepsilon_i^t \quad (5.6)$$

(5.6) eşitliğinde [75],

- ilk terim i . ateş böceğinin şimdiki konumudur.
- ikinci terim çekiciliğin ifadesidir yani, j . ateş böceğinin i . ateş böceği tarafından görülen parlaklığını gösterir.
- üçüncü terim rastgeleleştirmedir yani i . ateş böceğinin kendisinden daha parlak başka bir ateş böceği görmediği durumda rastgele hareketine imkan verir. α rastgeleleştirme parametresidir ve ϵ_i de, Gauss dağılımı veya uniform dağılıma göre rastgele sayılar ile çizilmiş bir vektördür.

(5.6)'de verilen denklem, üçüncü terimi açarak şu şekilde ifade edilebilir [74]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{(-\gamma r_{ij}^2)} (x_j^t - x_i^t) + \alpha (rand - \frac{1}{2}) \quad (5.7)$$

Burada $rand$, rastgele sayı üretici olup $[0,1]$ aralığında rastgele sayı üretir. $-1/2$ ile de rastgeleliğe yön kazandırılır [74,76,77]. Rastgeleleştirmede ϵ_i^t yerine, Lévy uçuşları gibi diğer dağılımlar da kullanılabilir [73].

5.2 Lévy Ateş Böceği Algoritması

İdealleştirilmiş üç kural, Lévy uçuşlarının özellikleriyle birleştirilirse, yeni bir Lévy-uçuş Ateş Böceği Algoritması tanımlanabilir. Bir i ateş böceğinin kendisinden daha parlak (çekici) başka bir j ateş böceğine hareketi şu şekilde ifade edilir [78-79]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{(-\gamma r_{ij}^2)} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \otimes Lévy, \quad (5.8)$$

burada $\otimes$, girdi başına çarpımları ifade eder. Lévy uçuş tabanlı rastgele sayı üretimi iki aşamadan oluşur: (i) rastgele bir yön seçimi (ii) Lévy dağılımına uyan adımların oluşturulması seçimi. Burada ateş böceği hareketinin rastgele adım uzunluğu, sonsuz bir ortalama ile sonsuz bir varyansı olan Lévy dağılımından alınmıştır [75,78].

5.3 Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritması

Yukarıda tanıtılan Lévy Ateş Böceği Algoritmasının performansını geliştirmek amacıyla, literatürden [50,51] yararlanılarak aşağıda verilen değişiklikler algoritmaya uygulanmış ve Modifiye edilmiş Lévy Ateş Böceği Algoritması (MLAA) geliştirilmiştir.

5.3.1 Mutasyon stratejisi

Orjinal ateş böceği algoritmasının (AA) performansını arttırmak ve lokal optimadan kaçınmak için bir mutasyon stratejisi geliştirilmiştir [50]. Bir iterasyon sonucunda hesaplanan amaç fonksiyonunun değeri, bir önceki iterasyonda hesaplanan değerden daha kötüyse veya eşitse, bu durumda o iterasyon sonunda (bir sonraki iterasyona geçmeden önce) mutasyon stratejisi uygulanır. Böyle her bir iterasyonun sonunda, popülasyondan rastgele dört farklı ateş böceği (q_1, q_2, q_3 ve q_4) seçilir. Bu seçilen ateş böceklerinin birbirinden farklı olması koşulu aranır : $q_1 \neq q_2 \neq q_3 \neq q_4 \neq i$ [51] . (5.9)'da verilen eşitliğe göre mutasyon yapılır [50]:

$$x_{m_i}^t = x_{q_1}^t + rand_1(1 - rand_2)(x_{q_2}^t - x_{q_3}^t) + rand_3(1 - rand_4)(x_{best}^t - x_{q_4}^t) \quad (5.9)$$

Burada m_i , i . ateş böceğine karşılık gelen mutant ateş böceğidir; $x_{m_i}^t$, m_i mutant ateş böceğinin t . iterasyondaki kontrol değişkenidir (konumudur). x_{best}^t , en küçük amaç fonksiyonuna sahip ateş böceğinin konumudur. $rand_j$ ise 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır ve $j=1,2,3,4$.

Mutant ateş böceği oluşturulduktan sonra, mutant ateş böceği m_i ile i . ateş böceğinin amaç fonksiyonlarının ($f(x)$) değeri karşılaştırılır. Mutant ateş böceği m_i 'nin amaç fonksiyonu değeri, i . ateş böceğinin amaç fonksiyonu değerinden küçükse, i . ateş böceği m_i mutant ateş böceği ile yer değiştirir. Böylece oluşturulan mutant ateş böceği bir sonraki iterasyona giriş popülasyonu olarak verilir. Aksi durumda ise i . ateş böceği yerinde kalır . Bu durum (5.10)'da veridiği gibi açıklanabilir [50-51]:

$$x_i = \begin{cases} x_{m_i} & \text{eğer } f(x_{m_i}) < f(x_i) \\ x_i & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_A \quad (5.10)$$

Burada N_A , ateş böceği sayısını ifade eder.

5.3.2 Parametrelerde yapılan değişiklikler

5.3.2.1 α 'nın adaptif olarak ayarlanması

Rastgeleleştirme parametresi α , verilen bir ateş böceği için komşu ateş böcekleri görünmediği durumlarda rastgele araştırmada (harekette) algoritmayı kontrol amaçlı kullanılır. Herbir ateş böceğinin rastgele hareketi için kullanılan α , $[0,1]$ aralığında bir değer olarak belirlenir. Büyük bir α değeri, algoritmaya uzak arama uzaylarında da optimal çözümü araştırmasına imkan verirken, küçük bir α ise yerel (lokal) araştırmaya

olanak tanır. Bu nedenle, hem yerel hem de bütünsel (global) araştırma için algortimanın toplam uyum kabiliyetini geliştirmek amacıyla adaptif kontrol yöntemi uygulanmıştır [50,51,79]. Buna göre her iterasyonda α değerini değiştiren aşağıdaki formül geliştirilmiştir [50]:

$$\alpha^{iter+1} = \left(\frac{1}{2t_{\max}} \right)^{1/t_{\max}} \alpha^{iter} \quad (5.11)$$

(5.11)'de verilen fonksiyonda t_{maks} maksimum iterasyon sayısını ifade eder. Bu fonksiyonla zaman içinde α değeri de değişecek olup bu durumda optimizasyon süreci boyunca lokal ve bütünsel arama arasında iyi bir denge sağlanmış olur [50,51,79].

5.3.2.2 Çekiciliğin modifikasyonu

Yukarıda verilen Eşitlik (5.8)'de, ikinci terimde β_0 yerine β_{ij} yerleştirilerek bir değişikliğe gidilmiştir [50,51]:

$$\beta_{ij} = (\beta_{\max} - \beta_{\min}) \times e^{-\gamma r_{ij}^2} + \beta_{\min} \quad (5.13)$$

Burada $\beta_{\min}$ ve β_{maks} sırasıyla çekicilik katsayısının alt ve üst sınırlarıdır. Çekicilik katsayısı β , $\beta_{\min}$ ile β_{maks} arasında bir değer alır. Bu değişiklik, algoritmanın yakınsama hızını iyileştirir ve lokal optimaya takılması ihtimalini azaltır [50,51]. Bu tez kapsamında yapılan simülasyon çalışmalarında, $\beta_{\min}$ ve β_{maks} sırasıyla 0,2 ve 0,8 olarak alınmıştır.

5.3.3 Güncellenmiş formül modifikasyonu

Şimdiye kadar Eşitlik (5.13)'te verildiği gibi olan formül, daha hızlı yakınsama sağlamak amacıyla bu aşamada değiştirilmiştir [51].

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \left(\sum_{j \in H_i} \beta_{ij} (x_j^t - x_i^t) \right) + \alpha^{iter} (x_{\max}^t - x_{\min}^t) \oplus Levy \quad (5.13)$$

$$\beta_{ij} = (\beta_{\max} - \beta_{\min}) \times e^{-\gamma r_{ij}^2} + \beta_{\min}$$

(5.13) 'te verilen formüle en küçük amaç fonksiyonu değerine sahip ateş böceği (en iyi çözüm) ve değişken katsayılar eklenerek Eşitlik (5.14)'e dönüştürülmüştür. Yapılan bu modifikasyon diğer ateş böceklerine, en iyi çözüme daha yakın hareket etme kabiliyetini kazandırır [51].

$$x_i^{t+1} = x_i^t + c_1^{iter} \left(\sum_{j \in H_i} \beta_{ij} (x_j^t - x_i^t) \right) + c_2^{iter} (x_{best}^t - x_i^t) + \alpha^{iter} (x_{max}^t - x_{min}^t) \oplus Levy \quad (5.14)$$

$$c_1^{iter} = \frac{Iter}{Iter_{max}} (c_1^f - c_1^i) + c_1^i \quad (5.15)$$

$$c_2^{iter} = \frac{Iter}{Iter_{max}} (c_2^f - c_2^i) + c_2^i \quad (5.16)$$

Burada c_i^{iter} değişken katsayıdır, $i=1,2$; c_1^i , pozitif bir sabit olup c_1 'in ilk değeridir. c_2^i , pozitif bir sabit olup c_2 'in ilk değeridir. c_1^f , pozitif bir sabit olup c_1 'in son değeridir. c_2^f , pozitif bir sabit olup c_2 'in son değeridir.

İterasyon sayısı arttıkça, değişken katsayı c_1^{iter} 'in değeri giderek azalırken c_2^{iter} 'in değeri giderek artar. Bu durum; c_1^{iter} daha büyükken daha parlak ateş böceklerinin etkisini arttırırken, c_2^{iter} daha büyükken en iyi çözümün (en küçük amaç fonksiyonuna sahip ateş böceğinin) etkisini arttırır. Sonuç olarak yapılan bu değişiklik algoritmanın; optimizasyon sürecinin erken aşamasında keşif (exploration) kabiliyetini; geç aşamasında ise arama (search) kabiliyetini arttırmaktadır [51]. Uygulama çalışmalarında, $c_1^i=0,45$; $c_2^i=0,2$; $c_1^f=0,2$; $c_2^f=0,5$ olarak alınmıştır.

5.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), 1995'te Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiştir. Bir bölgede rasgele yiyecek arayan bir kuş sürüsünün olduğu ve arama yapılan bölgede sadece bir parça yiyecek olduğu varsayılın. Kuşların hiçbirinin yiyeceğin nerede olduğunu bilmediği düşünülün. Fakat kuşların, her bir iterasyon sonunda yiyeceğin ne kadar uzakta olduğunu bildikleri varsayılın. Bu durumda en etkili strateji; yiyeceğe en yakın olan kuşu takip etmektir [80,81].

PSO, bu senaryoya göre çalışarak optimizasyon problemlerinin çözümünü arar. PSO'da "parçacık" olarak adlandırılan her bir çözüm arama uzayındaki bir kuştur. Tüm parçacıkların, bir uygunluk değeri ve uçuşlarını yönlendiren hız bilgileri

mevcuttur. Uygunluk değeri, optimize edilecek uygunluk fonksiyonu tarafından değerlendirilir. Her bir parçacık problem uzayında bulunan optimum parçacıkları takip ederek uçar [80,81].

PSO, bir grup rasgele çözümle (parçacıkla) çalışmaya başlatılır ve jenerasyonlar güncellenerek optimum değer aranır. Her iterasyonda, her bir parçacık iki tane “*en iyi*” değere göre güncellenir. Bunlardan birincisi; bir parçacığın o ana kadar bulduğu en iyi uygunluk değeridir ki daha sonra kullanılmak üzere hafızada tutulur ve “*pbest*” yani parçacığın en iyi değeri olarak adlandırılır. Diğer en iyi değer ise popülasyondaki herhangi bir parçacık tarafından o ana kadar elde edilmiş en iyi uygunluk değerine sahip çözümdür ki popülasyon için bütünsel en iyi değerdir ve “*gbest*” olarak adlandırılır [80,81].

pbest ve *gbest* değerlerini bulduktan sonra parçacık hızını ve konumunu aşağıdaki verilen (5.17) ve (5.18) denklemlerine göre değiştirir [80,81]:

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 rand_1^k (pbest_i - x_i^k) + c_2 rand_2^k (gbest - x_i^k) \quad (5.17)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (5.18)$$

Burada k , iterasyon sayısını ve i , parçacık numarasını ifade eder. (5.18) denkleminde geçen terimler aşağıdaki gibidir:

v_i^k : k . iterasyonda i . parçacığın hızı

c_1, c_2 : öğrenme faktörleri

x_i^k : k . iterasyonda i . parçacığın şimdiki konumu

$rand_1^k, rand_2^k$: 0 ile 1 arasında üretilen rastgele değerler

w : atalet ağırlığı

$pbest_i^k$: i . parçacığın o ana kadar ki en iyi konumu

$gbest^k$: tüm parçacıklar içinde bütünsel en iyi konum

c_1, c_2 değerleri parçacıkları *pbest* ve *gbest* konumlarına doğru yönlendiren sabitlerdir. c_1 parçacığın kendi tecrübelerine göre, c_2 ise sürüdeki diğer parçacıkların tecrübelerine göre hareketi yönlendirir.

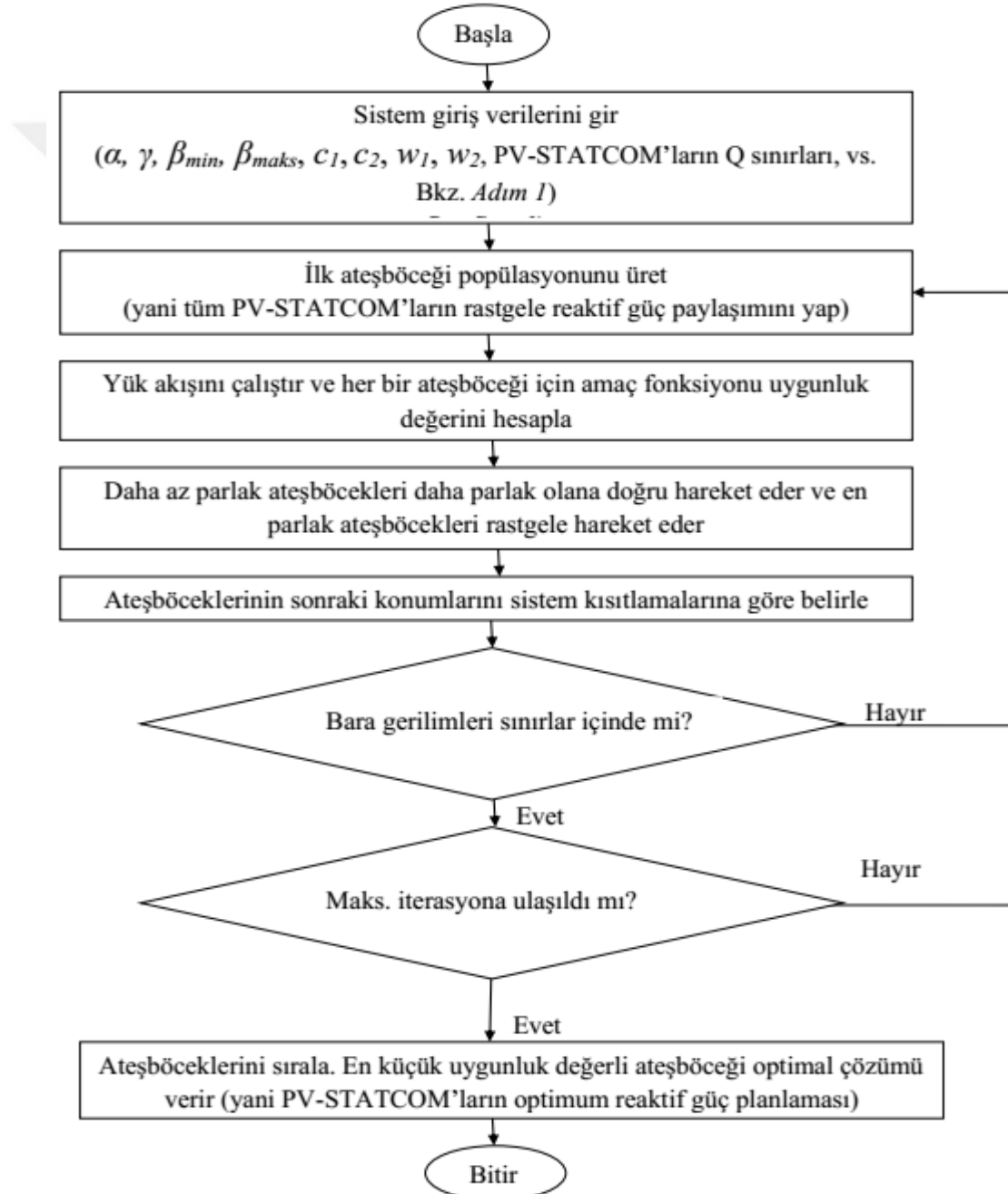
Bu bölümde, PSO ve AA üzerinde yapılan düzenlemelerle geliştirilen MLAA tanıtılmıştır. Bundan sonraki bölüm, ele alınan problemin MLAA ile çözüm adımlarını açıklayacaktır.





6. VOLT/VAR KONTROL PROBLEMİNİN MLAA İLE ÇÖZÜMÜ

Bu tez çalışmasında önerilen yaklaşımın adımları aşağıda verilmiş olup Şekil 6.1’de özetlenmiştir. Bu problemdeki kontrol değişkenleri, şebekedeki tüm PV-STATCOM’ların reaktif güç durumlarıdır.



Şekil 6.1 : Önerilen yöntemin akış şeması.

Adım 1: Başlıca tanımlanacak sistem giriş verileri: Dağıtım şebekesi yapısı, kablo empedansları, yük profili, gün öncesi piyasası fiyatları, güneş ışınımı, sıcaklık, PV-STATCOM'ların reaktif güç limitleri, gerilim güvenlik sınırları, ağırlık katsayıları, ateş böceği sayısı, maksimum iterasyon (yineleme) sayısı, rastgelelik parametresinin başlangıç değeri (alfa), maksimum ve minimum çekicilik değerleri, ışık soğurma katsayısı (gama), c_1 ve c_2 sabitlerinin başlangıç ve son değerleri.

Adım 2: PV-STATCOM'lar arasında reaktif güç paylaşımını gösteren ateş böceği popülasyonunun başlangıç değerleri, kendi kısıtlama sınırlarının içinde rastgele oluşturulur.

Adım 3: Güç akışı programı tüm ateşböcekleri için yürütülür. Saat başına dağıtım kayıpları ve enerji maliyeti sırasıyla Eşitlik (4.2) ve Eşitlik (4.3) kullanılarak hesaplanır. Sonra da saat başına amaç fonksiyonunun uygunluk değeri Eşitlik (4.1)'deki gibi hesaplanır.

Adım 4: Her ateş böceğinin parlaklığı ve çekiciliği değerlendirilir ve diğer ateş böcekleriyle karşılaştırılır. Daha sonra tüm ateş böceklerinin konumları Eşitlik (5.14) kullanılarak güncellenir. Daha az parlak ateş böceği daha parlak olana doğru hareket eder ve en parlak ateş böceği rastgele hareket eder. Bu iterasyondaki en iyi çözümün uygunluk değeri, önceki iterasyonda bulunan değerden büyükse, Denklem (5.9) 'a göre mutasyon stratejisi uygulanır. Her bir mutant ateş böceğinin uygunluk değeri değerlendirildikten sonra, ateş böceği i ve mutant ateş böceği m_i 'nin uygunluk değeri karşılaştırılır. Mutant ateş böceği m_i 'nin uygunluk değerleri ateş böceği i 'den düşükse, ateş böceği i 'nin yerini mutant ateş böceği m_i alır. Böylece, mutant ateş böceği bu iterasyonun çıktısı olur. Aksi takdirde, ateş böceği i kalmaya devam eder.

Adım 5: Tüm baraların gerilim profilleri kontrol edilir. Hiç bir baranın gerilimi regülasyon sınırlarını aşmıyorsa ($\pm\%5$), sonraki adıma gidilir. Aksi takdirde 2. Adıma geri gidilir.

Adım 6: 4. Adımda tüm ateş böcekleri güncellendikten sonra, maksimum iterasyon sayısına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Öyleyse, sonraki adıma gidilir. Aksi takdirde, 2. Adıma geri gidilir.

Adım 7: Mevcut iterasyon sayısı, maksimum iterasyon (yineleme) sayısına ulaşırsa iterasyonlar durdurulur ve ateşböceklerini sıralanır. En iyi amaç fonksiyon değerine sahip ateş böceği, sistemin optimum kontrol parametrelerini verir.

Bu bölümde, önerilen yöntemin çözüm aşamalarından bahsedilmiştir. Bundan sonraki bölümde, önerilen yöntemin farklı senaryolar altında örnek şebekeye uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonuçları verilecektir. Ayrıca MLAA ile çözülen problem, AA ve PSO ile de çözülerek bu algoritmaların etkinlikleri karşılaştırılacaktır.

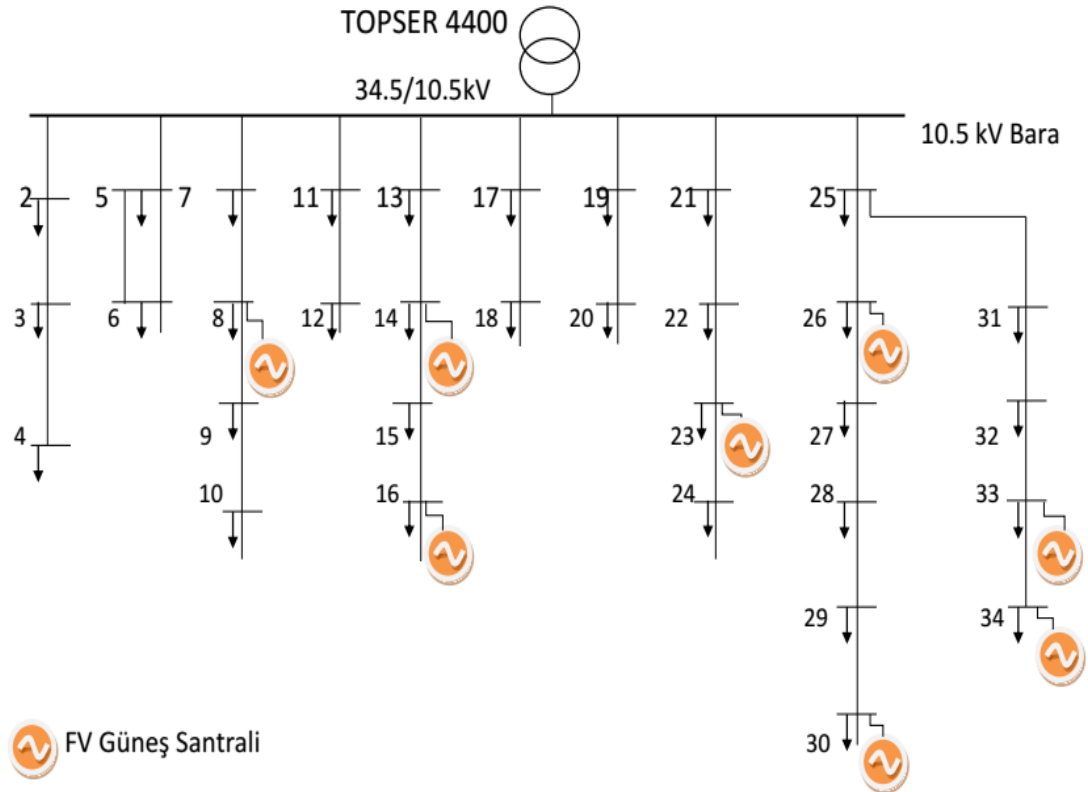




7. UYGULAMA ÇALIŞMALARI

7.1 Örnek Dağıtım Şebekesinin Tanıtımı

Katılım oranı hızla artan büyük ölçekli fotovoltaik santrallerin dağıtım şebekelerinde gerilim profiline olası etkilerinin yönetilebilmesi ve maliyet odaklı uygun işletme koşullarının bulunabilmesi için önerdiğimiz yaklaşımın performansı, İstanbul'un Sarıyer ilçesine ait bir OG dağıtım sisteminde test edilmiştir. 10,5 kV'luk 40 MVA kurulu güce sahip bu şebeke, TOPSER 4400 (34,5/10,5 kV) – indirici merkez tarafından beslenmektedir. Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş.'den (BEDAŞ) alınan verilerle yapılan analizlerde kullanılan 34 baradan oluşan radyal yapıdaki şebekeye ait tek-hat şeması Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : İstanbul-Sarıyer ilçesine ait örnek dağıtım şebekesinin tek kutuplu bağlama şeması.

Şebekedeki 10,5/0,4 kV dağıtım transformatörlerinin kurulu güçleri ve bunların bağlı oldukları baralar Çizelge 7.1’de verilmiştir. Çizelge 7.2’de ise şebekedeki tüm kabloları ait direnç, reaktans ve kapasitans bilgileri verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Yük karakteristikleri.

Bara	Nominal Güç (kVA)	Tüketici Tipi	Bara	Nominal Güç (kVA)	Tüketici Tipi
2	630	M	19	1000	M
3	1000	M	20	800	T
4	350	T	21	1250	M+T
5	2000	E	22	630	M
6	1600	M+T	23	630	M
7	400	T	24	1250	M+T
8	630	M	25	630	M
9	630	M	26	1250	M+T
10	630	M	27	630	M
11	250	T	28	1000	M
12	500	M	29	1000	E
13	630	M	30	1000	E
14	400	T	31	400	E
15	630	M	32	630	M
16	1000	M+T	33	1000	E
17	630	M	34	630	M
18	160	T			

M: Mesken T: Ticarethane E: Endüstriyel

Çizelge 7.2 : Kabloların direnç, reaktans ve kapasitans değerleri.

Kablo	R (Ω)	X (Ω)	Kapasitans (μF)	Kablo	R (Ω)	X (Ω)	Kapasitans (μF)
1-2	0.064872	0.04028	0.12296	1-19	0.420903	0.261345	0.79779
2-3	0.196605	0.122075	0.37265	19-20	0.141219	0.087685	0.26767
3-4	0.2621	0.100734	0.23472	1-21	0.453186	0.28139	0.85898
1-5	0.243117	0.150955	0.46081	21-22	0.14841	0.09215	0.2813
5-6	0.09522	0.053386	0.11825	22-23	0.165088	0.063448	0.14784
1-7	0.52785	0.32775	1.0005	23-24	0.08415	0.05225	0.15928
7-8	0.520812	0.32338	0.98716	1-25	0.52938	0.3287	1.0034
8-9	0.206896	0.079516	0.18528	25-26	0.080172	0.04978	0.15196
9-10	0.262372	0.100837	0.23496	26-27	0.136629	0.084835	0.25897
1-11	0.706984	0.271714	0.63312	27-28	0.0459	0.0285	0.0870
11-12	0.04824	0.01854	0.0432	28-29	0.048807	0.030305	0.09251
1-13	0.765	0.475	1.450	29-30	0.23868	0.1482	0.4524
13-14	0.313828	0.120613	0.28104	25-31	0.341648	0.075632	0.12388
14-15	0.080668	0.031003	0.072	31-32	0.71264	0.15776	0.2584
15-16	0.114436	0.043981	0.10248	32-33	0.32226	0.07134	0.11685
1-17	0.26163	0.16245	0.4959	33-34	0.490988	0.108692	0.17803

12 Mayıs 2019 tarihinde resmi gazetede yayınlanan Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği'ne göre [82], lisanssız yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim tesislerinde kurulu güç üst sınırı 1 MW'tan 5 MW'a yükseltilmiştir. Bu çalışmada ele alınan OG şebekesinde, Şekil 7.1'de gösterilen ve Çizelge 7.3'te belirtilen kurulu güçlere sahip fotovoltaik güneş sistemlerinin mevcut olduğu varsayılarak analizler yapılmıştır. Kabloların akım taşıma kapasiteleri de dikkate alınarak mevcut şebekenin 8 farklı noktasına entegre edilen fotovoltaik güneş santrallerinin toplam kurulu gücü, şebeke kurulu gücünün %38'ine karşılık gelmektedir.

Çizelge 7.3 : PV santrallerin kurulu güçleri ve bağlandığı bara numaraları.

	Anma Gücü (kVA)	Bağlandığı Bara
PV-1, PV-3, PV-4, PV-6, PV-7	2000	8, 16, 23, 30, 33
PV-2, PV-8	1000	14,34
PV-5	3000	26

7.2 1 MW'lık Fotovoltaik Güneş Santralinin Maliyeti

Çizelge 7.4 : 1 MW kurulu güce sahip PV santralin toplam yatırım maliyeti [72].

1 MW'lık PV güneş santrali kurulum maliyeti (2018)	
PV modüller (270 W)	US\$ 594,000
Evirici	US\$ 98,600
Konstrüksiyon	US\$ 78,078
Transformatör köşkü	US\$ 12,253
OG+AG dağıtım panosu	US\$ 7840
DC kablo	US\$ 9744
AC kablo	US\$ 19,302
SCADA	US\$ 9500
Transformatör	US\$ 12,000
Topraklama	US\$ 14,575
Toplama panosu	US\$ 24,464
Tel çit ve kapı işlemleri	US\$ 5413
Kamera ve video güvenlik sistemleri	US\$ 7287
Yıldırımından korunma ve topraklama sistemleri	US\$ 6038
Panel montajı	US\$ 11,556
Konstrüksiyon montajı	US\$ 16,553
Peysaj ve toprak işleri	US\$ 3123
Türkiye Elektrik Dağıtım (TEDAŞ) AŞ Projesi	US\$ 6246
Ulaşım giderleri	US\$ 7079
Mali giderler	US\$ 16,657
Beklenmedik harcamalar ve diğerleri	US\$ 20,000
TOPLAM (KDV'siz (%18))	US\$ 980,308
TOPLAM MALİYET	US\$ 1,156,763

Tüm sistem ekipmanlarının fiyatları ve 1 MW kurulu güce sahip PV güneş santralinin toplam yatırım maliyeti 2018 yılı için Çizelge 7.4'te verilmiştir [72]. Santrale ait bakım ve onarım giderleri yıllık toplamı 3840 \$'dır. İşletme giderleri bünyesinde değerlendirilecek olan tüm çalışanların işverene toplam maliyeti de dahil aylık işletme giderleri toplamı 3169,68 \$'dır. Bu durumda, santrale ait yıllık işletme ve bakım giderleri toplam 48068,88 \$ olarak kabul edilmiştir [72]. 2018 yılı Haziran ayı için \$/TL kuru 4,55 TL ve faiz oranı %1,8 olarak alınmıştır. Santral yaşam ömrü ise 25 yıl olarak kabul edilmiştir [70].

7.3 İncelenen Üç Senaryo

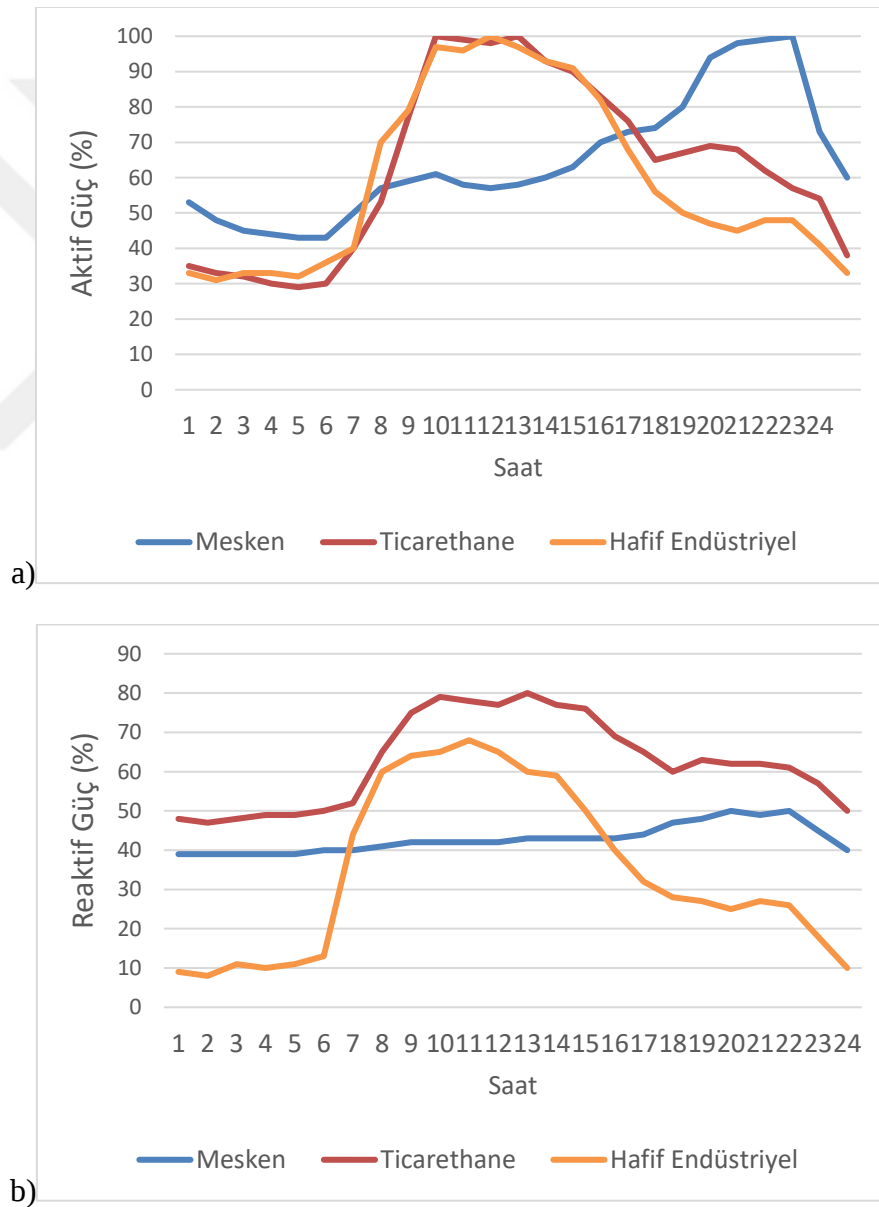
Bu çalışmada, şebekeye entegre tüm PV güneş sistem eviricilerinin PV-STATCOM olarak işletilmesi ve işletme sınırları dahilinde güç kayıpları ve enerji maliyetini minimize edecek şekilde, tüm PV-STATCOM sistemlerinin günlük reaktif yük paylaşımlarının Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritması ile tayin edilmesi hedeflenmiştir. Her türlü yüklenme durumu ve değişken hava koşulunda, şebekedeki tüm baraların gerilim genliklerinin $0,95 \text{ pu} \leq V_i \leq 1,05 \text{ pu}$ arasında [83,84] tutulması amaçlanmıştır. Önerilen yöntemin geçerliliğini göstermek için, simülasyonların tamamı aşağıda açıklandığı gibi üç farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir:

- **Senaryo 1- PV'siz:** Şebekede henüz hiçbir PV sistemin bağlı olmadığı- temel durum.
- **Senaryo 2- PV ile:** Şebekeye bağlı 8 adet PV güneş sistemi mevcuttur. PV güneş sistemleri şebekeye yalnızca aktif güç enjekte eder. PV güneş sistemleri ile şebeke arasında reaktif güç değişimi yoktur ($Q = 0$).
- **Senaryo 3- Optimal PV-STATCOM ile:** Şebekeye bağlı 8 adet PV güneş sistemi mevcuttur. Aktif güç kaynağına ek olarak, burada, PV güneş sistem eviricileri, PV güneş sistemleri ile şebeke arasındaki reaktif güç verilmesini/alınmasını yönetmek için STATCOM (PV-STATCOM) olarak çalıştırılır. Her bir PV-STATCOM'un bir sonraki gün için optimum reaktif güç çizelgelemesi, MLAA ile belirlenir.

Senaryo 2 ve Senaryo 3’te, gün boyunca hava sıcaklığı ve güneş ışınımına bağlı olarak üretilebilecek maksimum aktif güç şebekeye enjekte edilmiştir. Aktif güç üretiminde herhangi bir kısıtlamaya gidilmeksizin en iyi çözüme ulaşılması hedeflenmiştir.

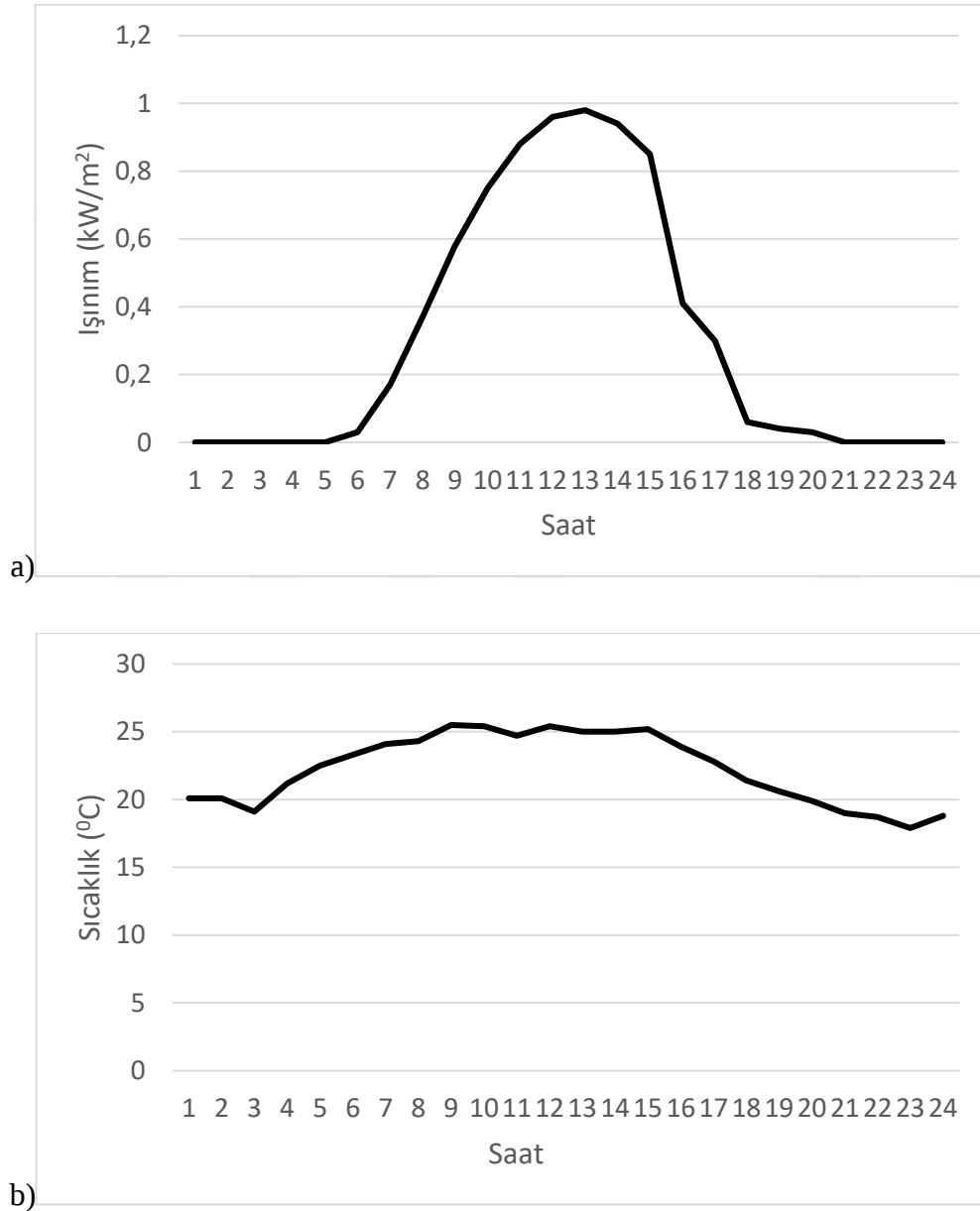
7.4 Simülasyon Sonuçları

Bu tez kapsamında, yük akışı analizleri EPRI tarafından geliştirilmiş olan OpenDSS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. OpenDSS ile elde edilen yük akışı sonuçlarının MATLAB’da hazırlanan optimizasyon algoritmalarına aktarımı, OpenDSS’in COM arayüzünün kullanılmasıyla sağlanmıştır.



Şekil 7.2 : Tüketici türleri için günlük yük talepleri [85]. (a) Aktif güç (b) Reaktif güç.

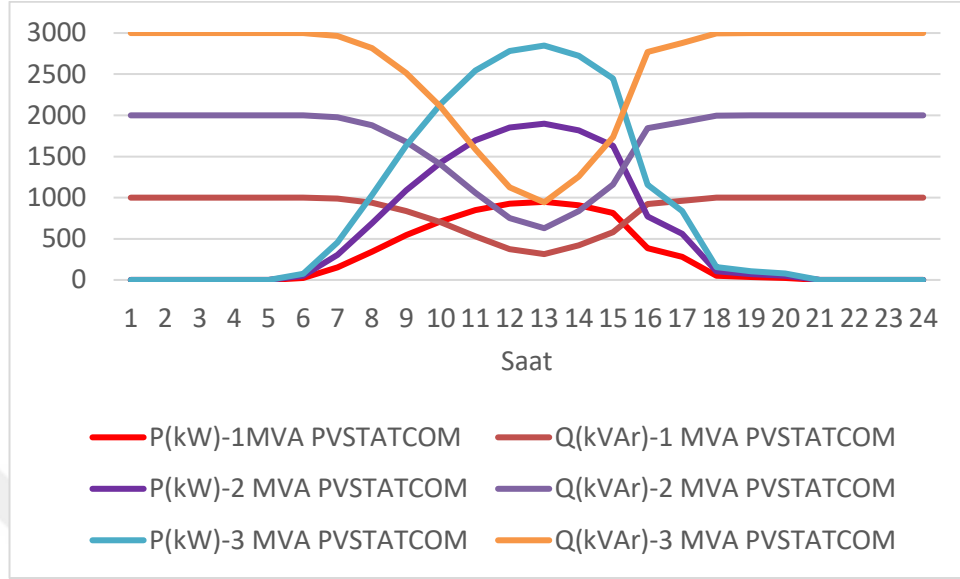
Uygulama kapsamında yapılan analizler, BEDAŞ'tan temin edilen TOPSER-4400 indirici merkeze ait yüklenme durumu baz alınarak, Şekil 7.2'de gösterilen farklı tüketici türlerine ait günlük aktif ve reaktif güç talepleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir [85]. Şekil 7.2'de gösterilen yük eğrileri, Çizelge 7.1'de verilen dağıtım transformatörlerinin nominal güç değerleriyle çarpılarak her bir baraya ait günlük yük profili elde edilmiştir. OpenDSS kullanılarak yapılan yük akışı analizlerinde sabit güç modeli (sabit P, sabit Q) kullanılmıştır.



Şekil 7.3 : Sarıyer'e ait 12.06.2018 tarihli güneş ışınlamı ve sıcaklık verileri.

Senaryo 2 ve Senaryo 3 için yapılan analizlerde, PV güneş sistemlerinin üretim durumları, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden edinilen İstanbul Sarıyer ilçesine ait

12.06.2018 tarihli sıcaklık ve güneş radyasyonu değerleri kullanılarak tespit edilmiştir. Sarıyer’de 12 Haziran 2018 tarihinde ölçülen saatlik güneş radyasyonu ve hava sıcaklığı değerleri Şekil 7.3’te verildiği gibi temin edilmiştir.

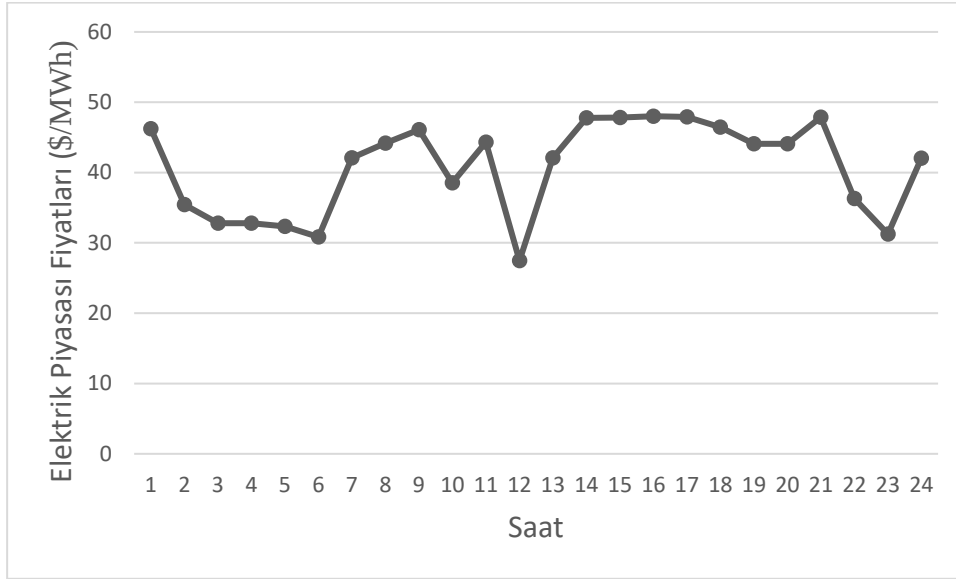


Şekil 7.4 : 12.06.2018 tarihinde, farklı kurulu güçlerdeki PV-STATCOM'lara ait aktif güç üretimleri ve reaktif güç enjeksiyon/emilim kapasiteleri.

Bildirilen güneş ışıınımı ve sıcaklık koşullarında 1 MVA, 2 MVA ve 3 MVA güçlerindeki PV güneş sistemlerinin mevcut aktif güç üretimleri Şekil 7.4'te gösterildiği gibidir. Şekil 7.4, ayrıca gün boyunca aktif güç üretiminden arta kalan STATCOM olarak kullanılan evirici kapasitelerini de göstermektedir. Akşam 21:00 ile sabah 6:00 arasında hiç aktif güç üretilmediğinden, PV-STATCOM'ların tüm kapasiteleri reaktif güç alışverişine elverişlidir. PV-STATCOM'ların gün içerisinde de; sabah saatlerinde ve akşama yaklaşılın saatlerde, ışıınımın az olmasından dolayı nominal aktif gücü üretemedikleri için hala büyük ölçüde reaktif güç desteği kapasitesine sahip oldukları görülmektedir. Işıınımın yüksek olduğu öğle saatlerinde ise, aktif güç üretimi hızla arttığınan, PV-STATCOM'ların reaktif güç kontroluna ayrılan kapasitelerinin büyük ölçüde azaldığı görülmektedir.

Bedeli BEDAŞ tarafından ödenen, indirici transformatörden (TOPSER-4400'den) çekilen enerjinin günlük maliyetinin düşürölmesi bu çalışmanın hedeflerinden biridir. Şekil 7.5, 12 Haziran 2018 günü için Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ)'dan temin edilen MWh başına Türkiye Elektrik Piyasası gün öncesi piyasa fiyatlarını göstermektedir [86]. Bu tez çalışmasında enerjinin toplam maliyeti minimize edilirken; aktif enerjinin yanısıra reaktif enerjinin maliyeti de dikkate alınmıştır.

MVARh başına düşen bedel, aktif enerji bedelinin %50'si olarak kabul edilerek maliyet hesaplanmıştır.



Şekil 7.5 : 12.06.2018 tarihi için gün öncesi market fiyatları [86].

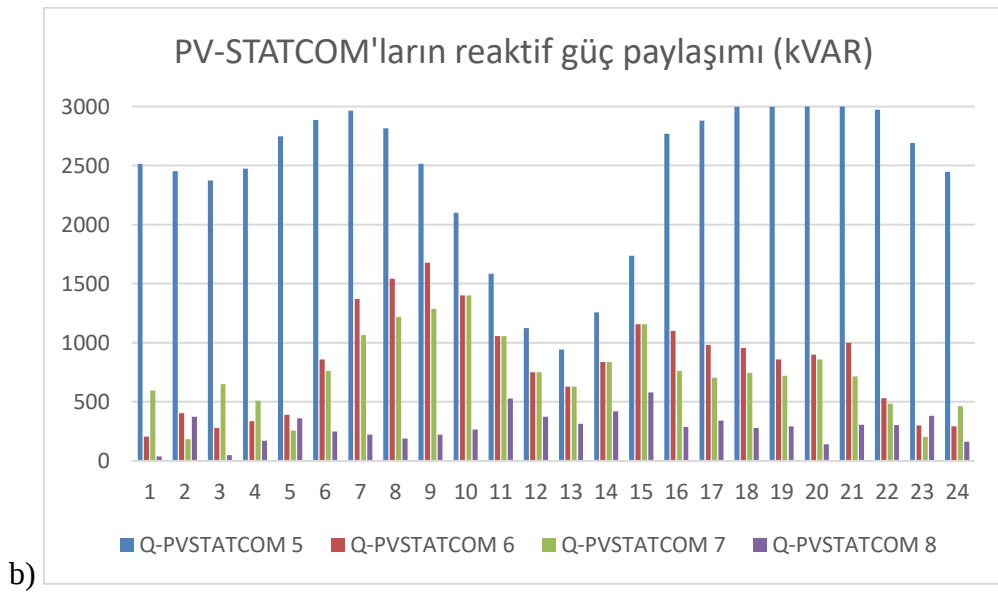
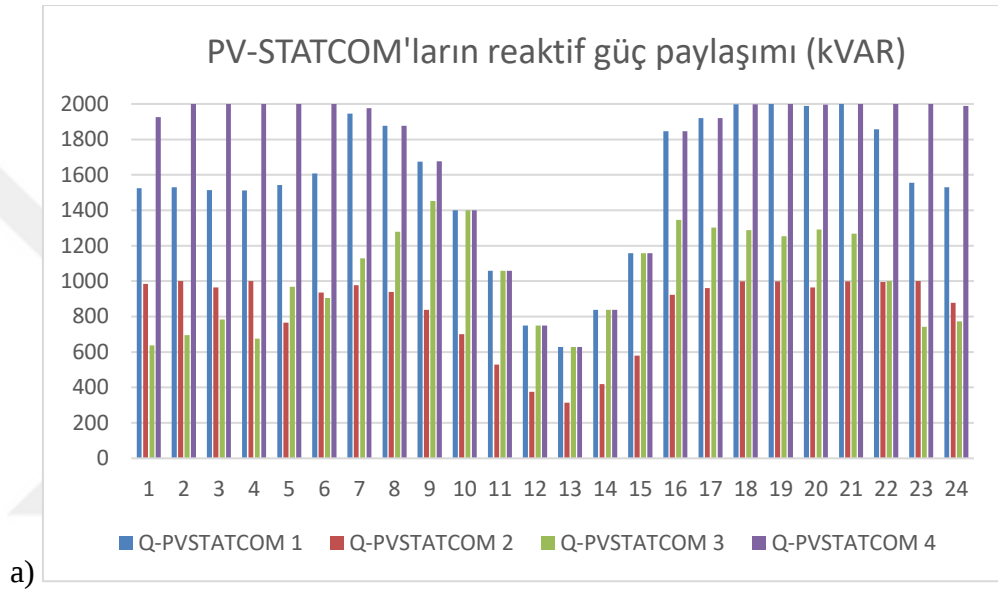
Önerilen yaklaşımla; teknik ve ekonomik beklentileri karşılayacak şekilde, tüm PV-STATCOM'ların şebeke ile olan reaktif güç alışverişlerinin 24 saatlik planlamasını kararlaştırmak için,

- OpenDSS programına yukarıda verilen kablo verileri ve yük karakteristikleri ile sıcaklık ve ısıtım bilgileri,
- MATLAB programında yazılan algoritmalara ise PV sistemlerin maliyet verileri, gün öncesi market fiyatları, sisteme ait işletme kısıtları, PV-STATCOM'ların reaktif güç sınırlamaları, optimizasyon algoritmalarına ait parametrelerin bilgileri, amaç fonksiyonlarının ağırlık katsayıları gibi veriler girdi olarak verilmiştir.

Yukarıda grafikleri görülen hava koşullarında ve yüklenme şartlarında verilen market fiyatlarıyla, 12.06.2018 günü için Modifiye edilmiş Lévy Ateş Böceği Algoritması kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasında birinci amaç olan kayıpların minimizasyonuna ait ağırlık katsayısı $w_1=0,5$ ve ikinci amaç olan enerjinin toplam maliyetinin minimizasyonuna ait ağırlıklık katsayısı $w_2=0,5$ alınmıştır.

Çizelge 7.5 : MLAA'nın parametre değerleri.

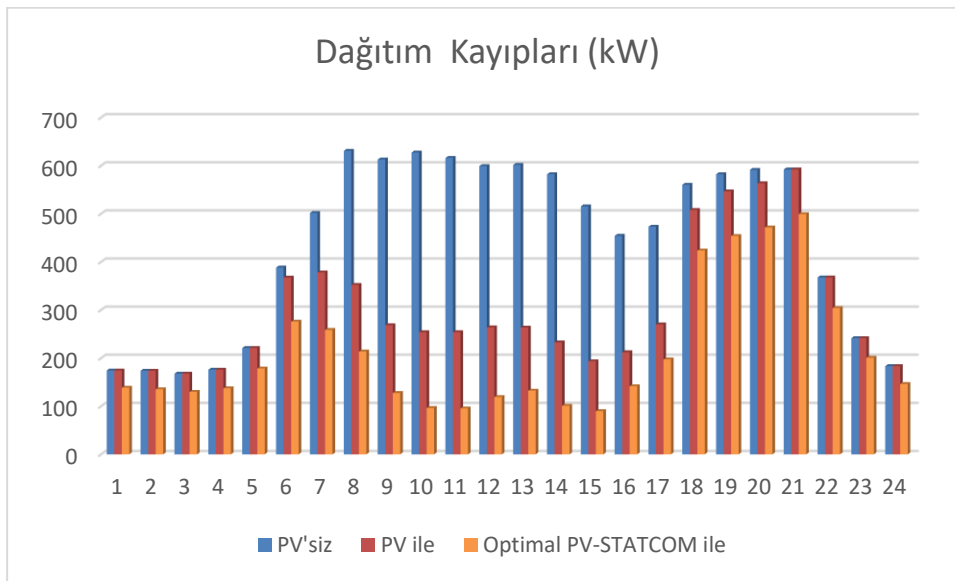
Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
Ateş böceği sayısı	15	c_1^i	0,45
α	0,5	c_1^f	0,2
$\beta_{\min}$	0,2	c_2^i	0,2
$\beta_{\max}$	0,8	c_2^f	0,5
γ	1	İterasyon sayısı	40



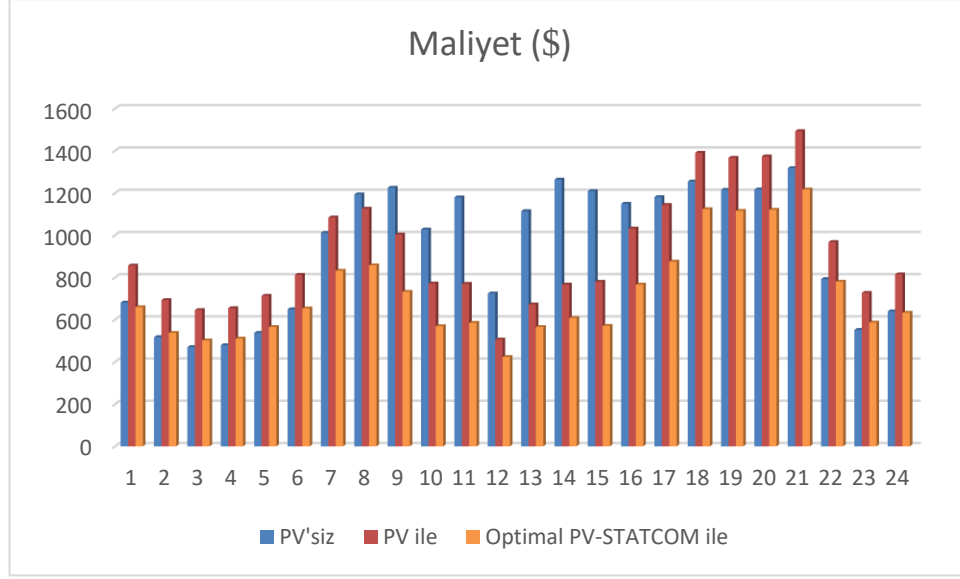
Şekil 7.6 : 12.06.2018 günü için PV-STATCOM'lara ait saatlik optimal reaktif güç çizelgelemesi.

MLAA'a ait Çizelge 7.5'te belirtilen parametre değerleriyle koşturulan 40 iterasyon sonucu; bara gerilimlerini güvenli aralıklarda tutarken kayıpları ve enerji maliyetini minimize edecek şekilde elde edilen 8 adet PV-STATCOM'a ait günlük reaktif güç çizelgelemesi Şekil 7.6'da verilmiştir. Şekil 7.6 a) ilk 4 PV-STATCOM'un reaktif güç değerlerinin gün boyu dağılımını gösterirken, b) ise sonraki 4 PV-STATCOM'un reaktif güç değerlerini göstermektedir.

Optimizasyon sonucunda optimal olarak işletilen PV-STATCOM'lar ile elde edilen saat başına kayıp ve maliyet değerleri sırasıyla Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Aktif güç kayıpları ve enerjinin maliyeti üç farklı senaryo altında incelenmiştir. Şebekede henüz hiçbir fotovoltaik sistemin bağlı olmadığı temel durumda, günlük toplamda maliyet ve kayıplar diğer senaryolara göre daha fazladır. Şebekenin değişik noktalarına 8 adet PV güneş sistemi yerleştirildiğinde (Senaryo 2), güneş ışınımına bağlı olarak üretilen aktif güçle beraber gündüz saatlerinde dağıtım kayıplarında büyük azalma olmuştur. Gece saatlerinde ise kayıplar Senaryo 1 ile aynıdır. Diğer taraftan, gündüz saatlerinde şebeke tarafından talep edilen enerjinin bir kısmı fotovoltaik üretimden karşılandığından dolayı, enerjinin maliyetinde bir miktar azalma söz konusudur. Gece saatlerinde ise, fotovoltaik sistem kurulumundan doğan maliyetin etkisiyle, enerjinin maliyetinde Senaryo 1'e göre artış olmuştur. Şebekedeki tüm fotovoltaik güneş sistemlerinin PV-STATCOM olarak optimal bir biçimde işletildiği Senaryo 3'te ise, sadece gündüz saatlerinde değil 24 saat boyunca hem kayıplarda hem de maliyette büyük ölçüde iyileşmenin olduğu görülmüştür.



Şekil 7.7 : Değişik senaryoların gün boyunca aktif güç kayıplarına etkisi.



Şekil 7.8 : Değişik senaryoların maliyete etkisi.

Her üç senaryo için günlük toplam aktif dağıtım kayıpları ve enerjinin maliyeti Çizelge 7.6'da verilmiştir. Senaryo 1 baz alınarak hesaplanan, Senaryo 2 ve Senaryo 3'teki iyileşme yüzdeleri ise Çizelge 7.7'de görüldüğü gibidir. Temel durumda (Senaryo 1) toplam dağıtım kayıpları 10630,978 kW iken, PV güneş santrallerinin entegrasyonu (Senaryo 2) ile 7222,234 kW'a düşmüştür. MLAA algoritması kullanılarak optimal işletilen PV-STATCOM'ların varolduğu Senaryo 3'te ise, bu kayıp 5064,785 kW'a kadar düşmektedir. Senaryo 2'de, temel duruma göre kayıplarda toplam 3408,744 kW'luk bir düşüş olmuştur ki bu da %32,1'lik bir değere karşılık gelmektedir. Senaryo 3'te ise, temel duruma göre kayıplarda %52,4'lük bir orana karşılık gelen 5566,193 kW'luk bir düşüş olmuştur. Bu farklı senaryolarda günlük toplam maliyetteki değişime bakılacak olduğunda; Senaryo 2'de temel duruma göre bir günde toplam 438 \$'lık (1993 TL) bir iyileşme olmuşken, Senaryo 3'te ise temel duruma göre sadece bir günde toplam 5211 \$'lık (23710 TL) bir iyileşme olduğu görülmüştür.

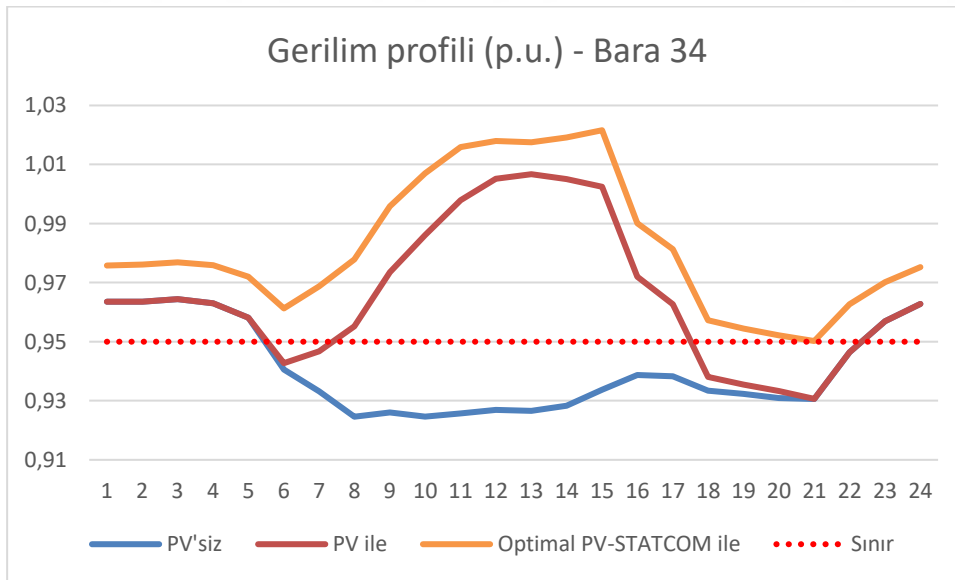
Çizelge 7.6 : Üç senaryo için günlük toplam dağıtım kayıpları ve maliyet.

	<i>PV'siz</i>	<i>PV ile</i>	<i>Optimal PV-STATCOM ile</i>
Toplam Kayıp (kW)	10630.978	7222.234	5064.785
Toplam Maliyet (\$)	22591	22153	17380

Çizelge 7.7 : Temel duruma göre Senaryo 2 ve Senaryo 3'teki kayıp ve maliyetlerdeki iyileşme miktarı.

Günlük Toplam İyileşme	PV ile	Optimal PV-STATCOM ile
Kayıplar (kW)	3408.744	5566.193
(%)	32.1	52.4
Maliyet (\$)	438	5211
(%)	1.94	23.1

Önerilen yaklaşım, yukarıda bahsedilen teknik ve ekonomik faydalarının yanısıra, dağıtım şebekelerinin işletmecilerine farklı hava koşullarında ve yük durum değişikliklerinde şebekedeki bara gerilim profillerini izin verilen aralıkta tutma imkanı tanımaktadır. Ele alınan bu dağıtım şebekesinde, temel durum için yapılan yük akışı analizi sonucunda, 24 saat boyunca en düşük gerilim profiline sahip baranın Bara-34 olduğu – o civarda düşük kesitli dolayısıyla yüksek dirençli kabloların kullanılmasından kaynaklı- tespit edilmiştir. Şekil 7.9'da üç farklı durum için tüm gün boyunca bara gerilim profilleri görülmektedir. Sadece *Optimal PV-STATCOM ile* Bara-34'ün geriliminin gün boyu sınırlar içinde tutulabildiği görülmektedir. Güneş ışınımının az olduğu veya yüklenmenin fazla olduğu zamanlarda *PV ile* bara gerilimlerinin işletme koşullarını sağlayamayabileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.9 : En kritik baranın üç farklı senaryo altındaki gerilim profili.

7.4.1 Yüklenme faktörünün etkisinin araştırılması

Önerilen yöntemin farklı yüklenme koşullarındaki performansı aşağıda verilen dört farklı durum için incelenmiştir:

Durum 1: Aşırı yüklü şebeke (yüklenme faktörü $\lambda= 1,2$)

Durum 2: Hafif yüklü şebeke (yüklenme faktörü $\lambda= 0,8$)

Durum 3: Çok hafif yüklü şebeke (yüklenme faktörü $\lambda= 0,5$)

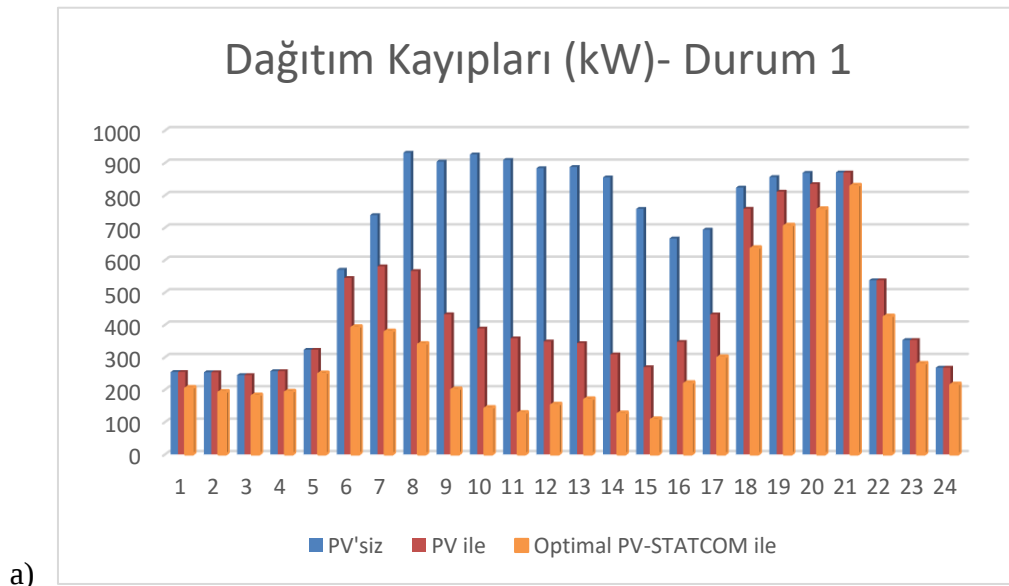
Durum 4: PF=0,98 (Güç faktörünün tüm yükler için 0,98 olduğu durum)

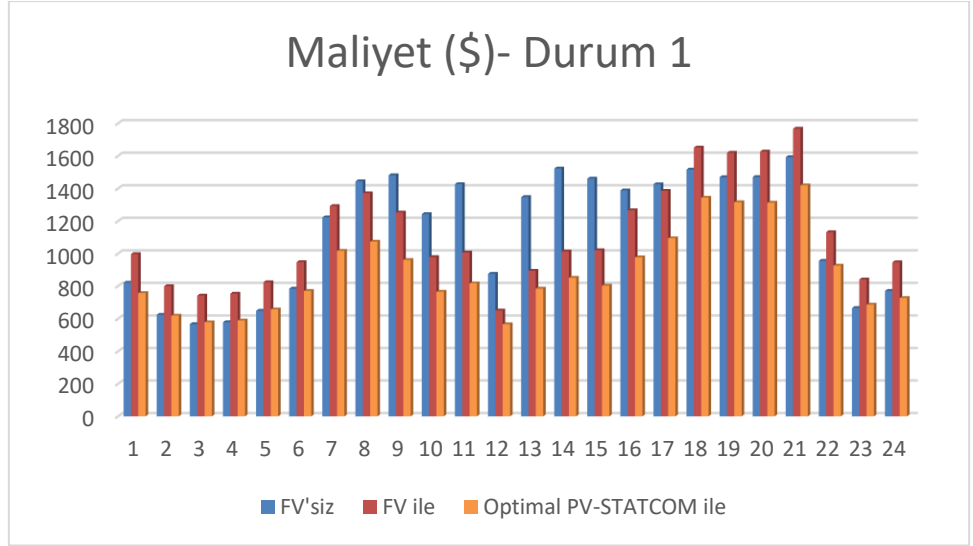
İndirici merkezden çektikleri reaktif gücün, tükettikleri aktif gücün %20'si veya daha fazlası olması durumunda - ki bu, güç faktörünün 0,98 olmasına karşılık gelir- , mevcut düzenlemeye [87] göre dağıtım şirketleri reaktif enerjinin de bedelini ödemekle yükümlü olmaktadır. Bu nedenle Durum 4'te dağıtım şirketi tarafından çekilen reaktif enerjinin, zorunlu olarak ödendiği minimum reaktif yük talebi için (PF=0,98) önerilen yöntemin performansı araştırılmıştır. Bu durum incelenirken, şebekedeki aktif yükler daha önce verilen Şekil 7.2 (a)'da verildiği gibiyken, reaktif yük talebi ise aktif yükün %20'si olarak kabul edilmiştir.

Yukarıda anlatılan dört farklı durum için yapılan optimizasyon çalışmalarının sonuçları sayısal olarak Çizelge 7.8'de verilmiştir. Şekil 7.10 - Şekil 7.13'te kayıp ve maliyetin gün içinde saatlere göre değişimi dört durum için ayrı ayrı gösterilmiştir. Bütün yüklenme koşullarında; *Optimal PV-STATCOM* ile olan işletme şeklinin, *PV ile* olan işletme şekline göre hem ekonomik hem de teknik üstünlüğü ortaya çıkmıştır. Şebekenin yarı yarıya az yüklü olduğu yüklenme koşulunda ($\lambda=0,5$), *PV ile* işletme şeklinin ekonomik olmadığı Çizelge 7.8'de görülmüştür. Bununla birlikte PV sistemlerin PV-STATCOM olarak işletilmesi, %50 daha az yüklenilmiş bir şebekede dahi maliyette %11.83'lik bir iyileşmeye karşılık gelerek bir günde 1305 \$'lık (5937 TL) bir tasarruf sağlamıştır. Reaktif güç talebinin azaldığı Durum 4'te, kayıp ve maliyetteki iyileşme oranı da düşmüştür. Bununla birlikte *Optimal PV-STATCOM ile* kayıpta sağlanan iyileşme *PV ile* sağlanan iyileşmeden 163 kW fazlayken; günlük toplam tasarruf 1493 \$ (6793 TL) daha fazladır.

Çizelge 7.8 : Tüm durumlar için günlük toplam kayıplar, maliyetler ve iyileşme yüzdeleri.

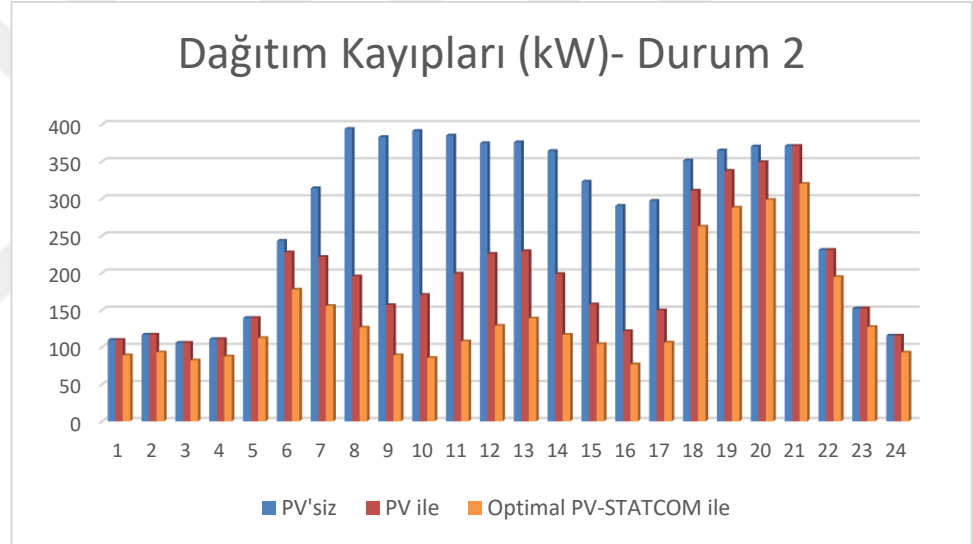
Günlük Toplam		Durum 1 $\lambda=1.2$	$\lambda=1.0$	Durum 2 $\lambda=0.8$	Durum 3 $\lambda=0.5$	Durum 4 PF=0.98
Kayıplar (kW)	<i>PV'siz</i>	15631.11	10630.978	6673.882	2505.824	7577.122
	<i>PV ile</i>	10682.55	7222.234	4700.49	2519.467	4336.789
	<i>Opt PV-STATCOM ile</i>	7517.766	5064.785	3457.667	2104.124	4173.570
Kayıptaki İyileşme (kW)	<i>PV ile</i>	4948.56	3408.744	1973.392	-13.643	3240.334
	<i>Opt PV-STATCOM ile</i>	8113.343	5566.193	3216.215	401.701	3403.553
Kayıptaki İyileşme (%)	<i>PV ile</i>	31.66	32.1	29.57	-0.54	42.76
	<i>Opt PV-STATCOM ile</i>	51.91	52.4	48.19	16.03	44.92
Maliyet (\$)	<i>PV'siz</i>	27304	22591	17956	11027	18343
	<i>PV ile</i>	26781	22153	17595	12340	17914
	<i>Opt PV-STATCOM ile</i>	21411	17380	13517	9722	16422
Maliyetteki İyileşme (\$)	<i>PV ile</i>	523	438	361	-1313	429
	<i>Opt PV-STATCOM ile</i>	5370	5211	4439	1305	1922
Maliyetteki İyileşme (%)	<i>PV ile</i>	1.92	1.94	2.01	-11.91	2.34
	<i>Opt PV-STATCOM ile</i>	19.67	23.1	24.72	11.83	10.48



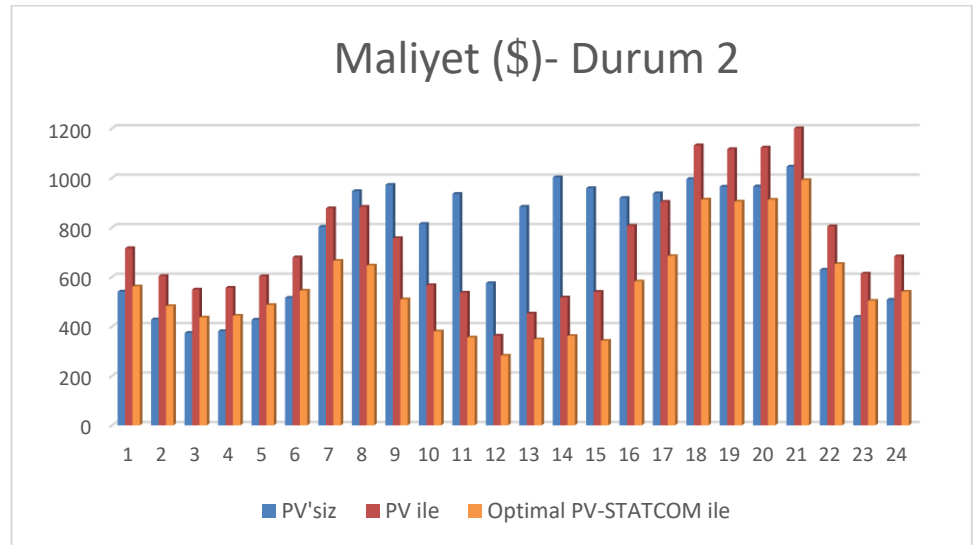


b)

Şekil 7.10 : Durum 1 ($\lambda=1.2$) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi.

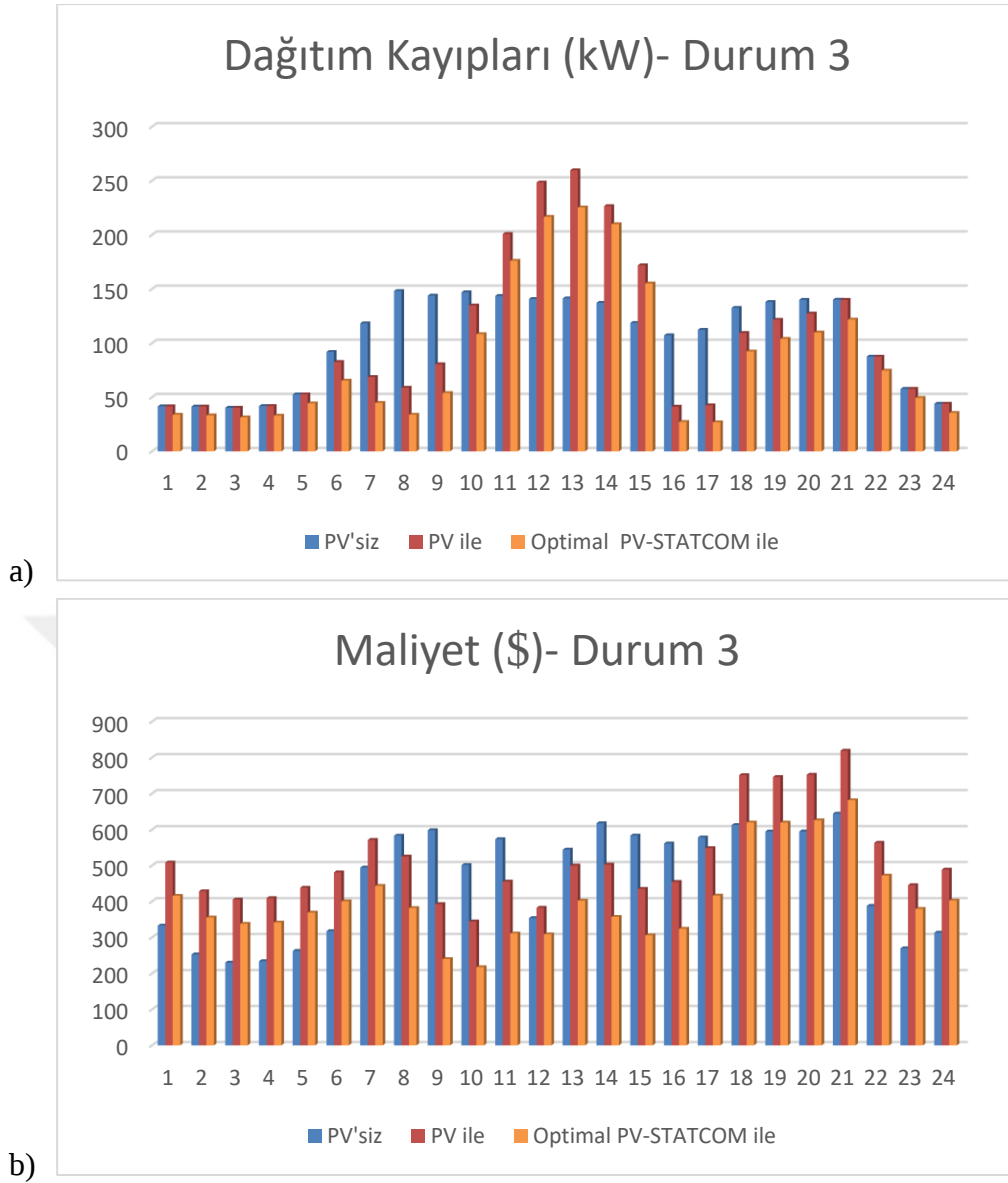


a)

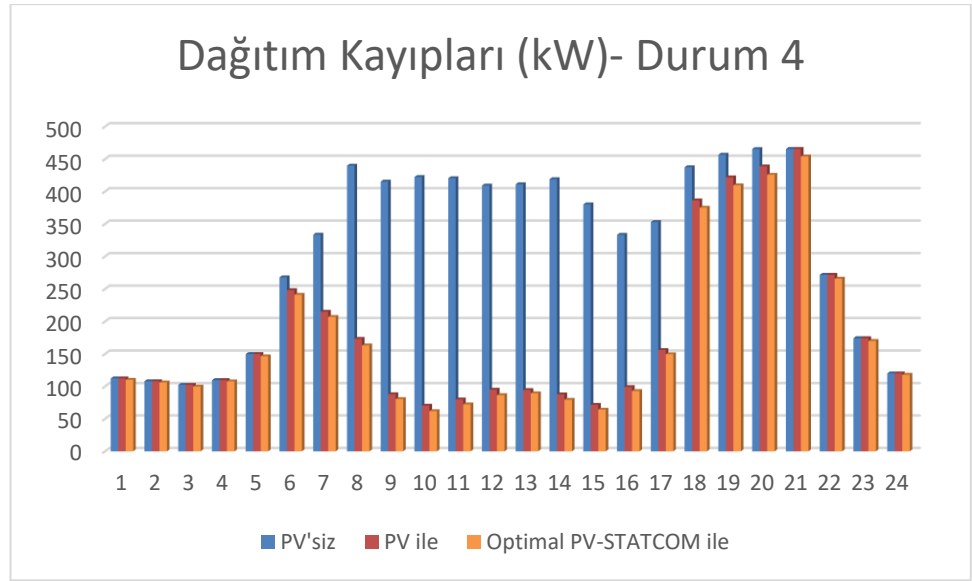


b)

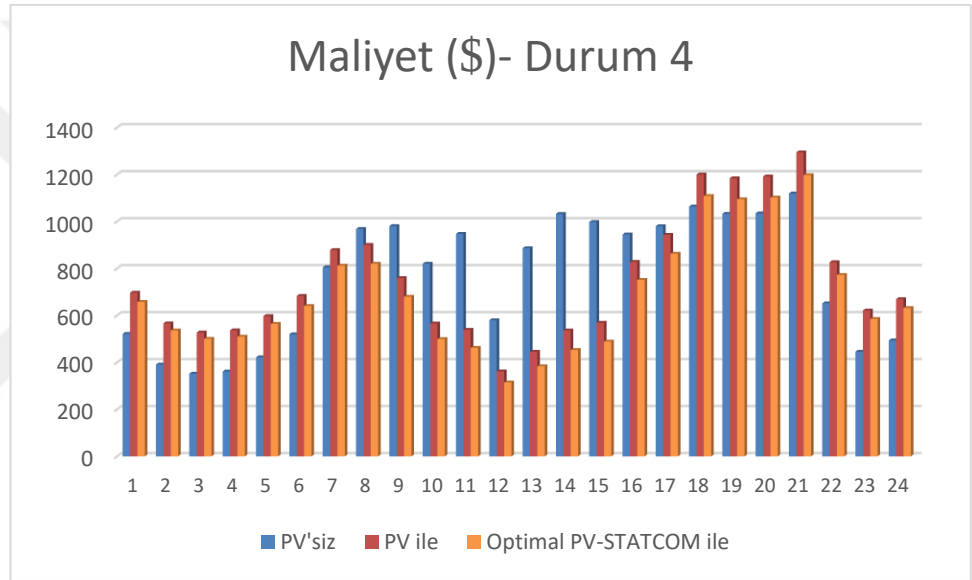
Şekil 7.11 : Durum 2 ($\lambda=0.8$) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi.



Şekil 7.12 : Durum 3 ($\lambda=0.5$) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi.



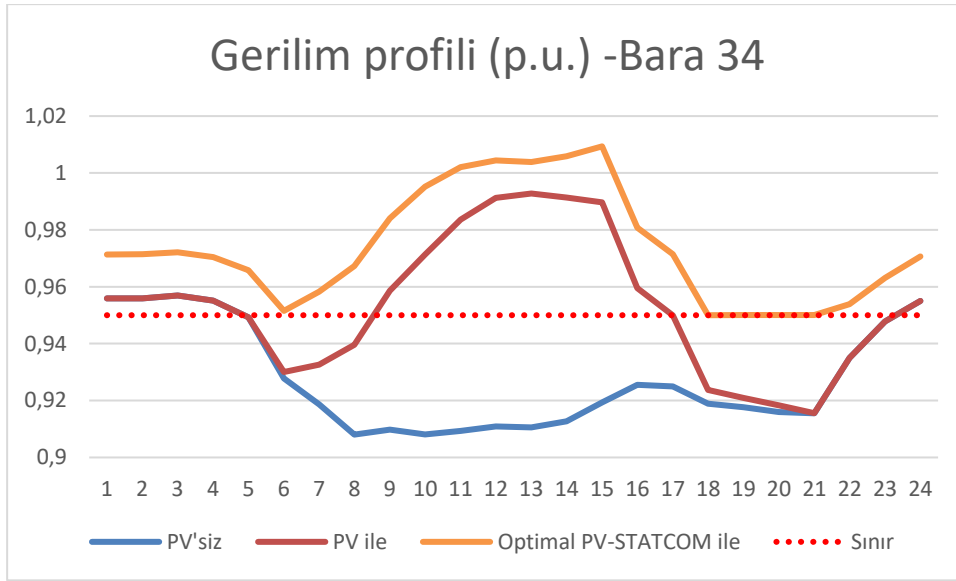
a)



b)

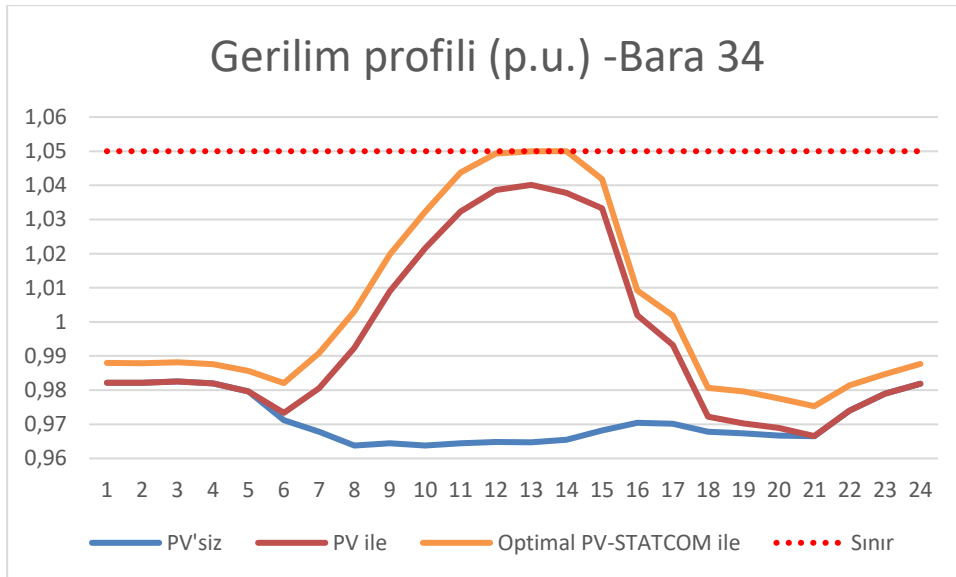
Şekil 7.13 : Durum 4 (GF=0,98) için a) kayıp ve b) maliyetin saatlik değişimi.

Hem aşırı yüklenme ($\lambda=1.2$) durumunda hem de çok hafif yüklenme ($\lambda=0.5$) durumunda, şebekedeki en zayıf baranın (Bara 34) gün boyu gerilim profillindeki değişimler Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'te sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 7.14'te aşırı yüklenme koşullarında *PV ile*, aktif güç üretiminin yeterli gelmediği saatlerde bara geriliminin alt sınır olan 0,95 pu altında kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, *Optimal PV-STATCOM ile* 24 saat boyunca bara geriliminin izin verilen sınırlar içinde tutulabildiği ortaya çıkmıştır.



Şekil 7.14 : Aşırı yüklenme koşulları altında ($\lambda=1.2$) Bara-34'ün gerilim profili.

Şebekenin yükü azaldığında, baraların gerilim genliklerinin yükselmesi beklenir. Yine PV sistemlerin bağlandıkları baralarda ve civarında gerilim profillerinde yükseliş gözlemlenir. Bu şebekenin yükünün %50 düştüğü çok hafif yüklenme durumu ($\lambda=0.5$) için yük akışı analizleri yapıldığında, gerilimi üst sınıra en çok yaklaşan baranın Bara 34 olduğu görülmüştür.



Şekil 7.15 : Çok hafif yüklenme koşulları altında ($\lambda=0.5$) Bara-34'ün gerilim profili.

Şekil 7.15'te görüleceği üzere, *Optimal PV-STATCOM ile* Bara 34'ün gerilimi *PV ile* işletme durumuna göre daha fazla yükselmiştir. Ancak, bu çalışmada önerilen yaklaşımın temel hedefi gerilimleri $0,95 \text{ pu} \leq V_i \leq 1,05 \text{ pu}$ güvenli aralığında tutmakla

beraber kayıp ve maliyet minimizasyonunu yapabilecek şekilde reaktif güç paylaşımlarını yönetebilmektir. Burada dikkat değer diğer bir özellik, fotovoltaiğin aktif güç üretimlerinde herhangi bir kısıtlamaya gidilmeden de gerilim kontrolü sağlanabildiğidir.

7.4.2 Ağırlıklandırma katsayılarının etkilerinin araştırılması

Ağırlıklandırma katsayılarının amaç fonksiyonları üzerindeki etkisini ortaya koymak için, farklı birkaç w_1 ve w_2 kombinasyonu kullanılarak problemin çözümüne gidilmiştir. Bu çalışma $\lambda=1$ olduğu yüklenme durumu için gerçekleştirilmiştir. Çizelge 7.9’da ağırlık katsayılarının değişimine göre günlük toplam kayıp ve maliyet değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.9 : Kayıp ve maliyet amaç fonksiyonları için ağırlık katsayılarının farklı kombinasyonları ile edinilen sonuçlar.

w_1	w_2	Kayıp (kW)	Maliyet (\$)
0.9	0.1	4536.287	18521
0.7	0.3	4679.514	17968
0.5	0.5	5064.785	17380
0.3	0.7	5311.209	17198
0.1	0.9	5360.835	17190

Çizelgede verilen sonuçlara göre, w_2 için 0,5’ten daha küçük değerler seçildiğinde, maliyetteki artış hızı daha fazla olmaktadır. $w_1=0,3$ ve $w_2=0,7$ seçildiğinde; maliyet $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ kombinasyonuna göre %1,05 azalmıştır. Fakat, dağıtım kayıpları %4,64 artmıştır. Sonuç olarak, ağırlıklandırma katsayılarının seçimi dağıtım şebekesi işletmecilerinin hangi amacı önceliğine bağlıdır.

7.4.3 MLAA’nın etkinliğinin diğer algoritmalarınki ile karşılaştırılması

Yukarıda Modifiye edilmiş Lévy Ateş Böceği Algoritmasının uygulama sonuçları verilmişti. Bu başlıkta ise Ateş Böceği Algoritmasının orijinal hali (AA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile Volt/Var probleminin çözümü aranmıştır.

PSO ile çözüm aranırken kullanılan parametre değerleri: sürüdeki parçacık sayısı 15; maksimum iterasyon sayısı 40; hem c_1 hem de c_2 öğrenme faktörleri 2; w_{min} ve w_{maks} sırasıyla 0,5 ve 1.0 olarak seçilmiştir. AA ve MLAA ile yapılan çalışmalarda da sürü büyüklüğü (ateş böceği sayısı) 15, maksimum iterasyon sayısı 40 olarak seçilmiştir. α (rastgelelik katsayısı) ve γ (ortamın soğurma katsayısı) ise sırasıyla 0,5 ve 1 olarak alınmıştır.

Herbir algoritmanın 20’şer defa serbest koşturulmasıyla elde edilen sonuçlar Çizelge 7.10’da karşılaştırılmıştır. Uygunluk değeri, amaç fonksiyonlarının değerlerinin ağırlık katsayıları ile çarpımlarının toplamını ifade eder. Herbir algoritma için 40’ar iterasyon koşturulmuştur. Bu optimizasyon işlemi bütün algoritmalar için 20’şer defa tekrar edilmiştir. Herbir algoritma için ayrı ayrı koşturulan 20 serbest optimizasyon denemesi sonucunda, elde edilen uygunluk değerleri sıralamaya sokularak en iyi ve en kötü uygunluk değerlerine karşılık gelen kayıp ve maliyet değerleri Çizelge 7.10’a işlenmiştir. Ayrıca herbir algoritma için elde edilen 20 uygunluk değerinin ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır. Bu çalışmada amaç fonksiyonlarının minimizasyonu hedeflendiğinden; 20 optimizasyon işlemi sonunda elde edilen en küçük uygunluk değeri, en iyi (en başarılı) uygunluk değerine işaret eder. Çizelge 7.10’da görüldüğü gibi, MLAA’nın bulduğu hem en iyi uygunluk değeri hem de en kötü uygunluk değeri; AA’nın ve PSO’nunkilerden daha küçüktür. Yine, MLFA ile 20 deneme sonucunda elde edilen uygunluk değerlerinin ortalaması diğerlerininkinden daha küçüktür. Küçük standart sapma değerleri, algoritmaların daha isabetli ve güvenilir olduğuna işaret eder. Çizelge 7.10’da MLAA ile bulunan çözümlerin standart sapmasının, diğer algoritmalarınkine göre dikkat çekecek ölçüde küçük olduğu görülmüştür. Bu ise, rastgele bir koşturmada MLAA’nın bütünsel (global) optimal çözümü bulma olasılığının AA ve PSO’ya göre daha yüksek olduğunu ifade eder.

Çizelge 7.10 : Farklı algoritmalar için 20 deneme ile elde edilen sonuçlar.

		MLAA	AA	PSO
En İyi Uygunluk Değeri	Kayıp (kW)	5064.785	5093.285	5078.107
	Maliyet (\$)	17380	17404	17380
En Kötü Uygunluk Değeri	Kayıp (kW)	5106.639	5079.723	5374.004
	Maliyet (\$)	17386	17652	17706
Ortalama Uygunluk Değeri	Kayıp (kW)	5079.979	5106.723	5230.968
	Maliyet (\$)	17380	17493	17379
Standart Sapma	Kayıp (kW)	23.826	137.362	151.713
	Maliyet (\$)	185	1538	1396

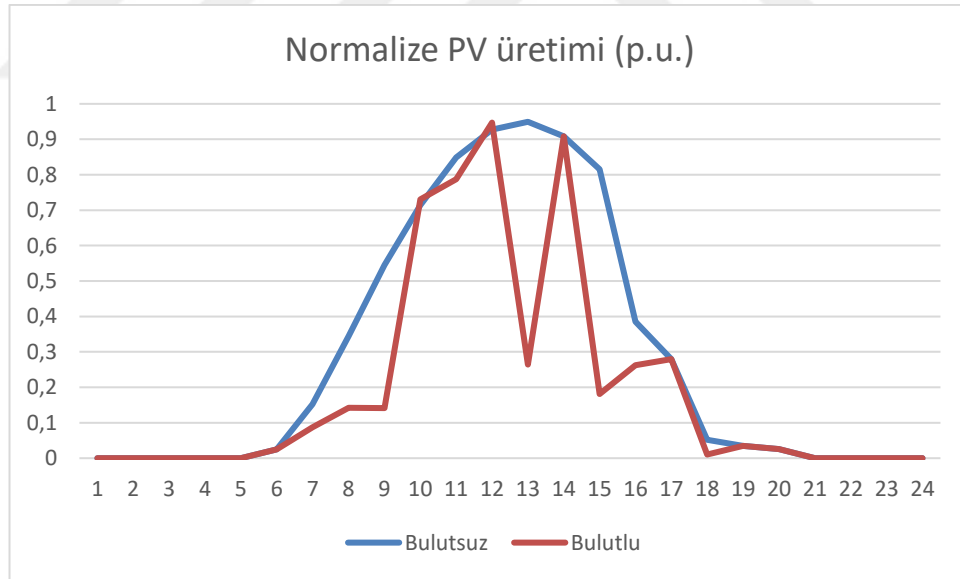
Ek olarak, önerilen algoritmanın performansını kanıtlamak için elde edilen sonuçlara “başarı yüzdesi” olarak tanımlanan bir kriter uygulanmıştır. Başarı yüzdesi; en iyi çözüme yakınsayan başarılı denemelerin sayısının, tüm denemelerin sayısına (ki bu çalışmada 20 denemedir) bölünmesinden elde edilir [50]. Bahsedilen üç algoritmanın

başarı yüzdeleri Çizelge 7.11’de verilmiştir. Bu çizelgede verilen uygunluk değerleri, bulunan kayıp ve maliyet çözümlerinin $w_1=0,5$ ve $w_2=0,5$ kombinasyonu ile çarpımlarının toplamından elde edilmiştir. MLAA ile elde edilen optimal çözümlerinin tamamı 11222 ile 11248 değerleri arasındayken, algoritmanın ilk hali olan AA ile bu aralıkta hiçbir optimal çözüm bulunamamıştır. Çizelge 7.11; MLAA’nın, AA ve PSO’ya üstünlüğünü ortaya koymuştur.

Çizelge 7.11 : Algoritmaların 20 deneme ile elde edilen başarı yüzdeleri.

Çözüm aralığı (Uygunluk değeri)	MLAA	AA	PSO
11222-11229	60%	-	-
11229-11248	40%	-	20%
11248-11286	-	35%	35%
11286-11349	-	60%	30%
11349-11413	-	5%	5%
11413-11476	-	-	5%
11476-11540	-	-	5%

7.4.4 Bulutlanma etkisinin araştırılması



Şekil 7.16 : Tamamen güneşli (bulutsuz) ve bulutlu hava koşullarında normalize edilmiş fotovoltaik üretimi.

Fotovoltaik güneş tarlalarının üzerinden geçen bulutlar, fotovoltaiklerce üretilen aktif güçte dalgalanmalara neden olur. Bu bölümde, bulutlanmanın sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bulutlanma etkisini simule etmek için, gün içinde PV

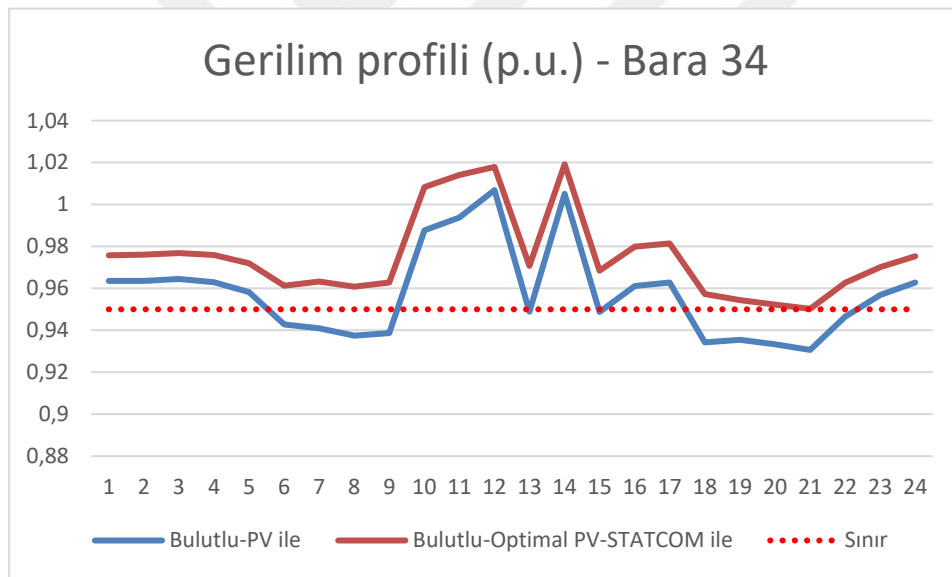
üretiminde yer yer ani düşüşler olduğu düşünülmüştür. Şekil 7.16’da, bulutlu ve bulutsuz hava şartlarında, aktif güç üretimi p.u’ye dönüştürülerek verilmiştir.

Gün boyunca yer yer bulutlanmanın, günlük toplam kayıp ve maliyet üzerindeki etkisi Çizelge 7.12’de verilmiştir.

Çizelge 7.12 : Hava bulutsuz ve bulutlu iken günlük toplam kayıp ve maliyet.

	Bulutsuz- PV ile	Bulutlu- PV ile	Bulutsuz- Optimal PVSTATCOM ile	Bulutlu- Optimal PVSTATCOM ile
Kayıp (kW)	7222.234	8022.744	5064.785	5884.076
Maliyet (\$)	22153	23694	17380	18660

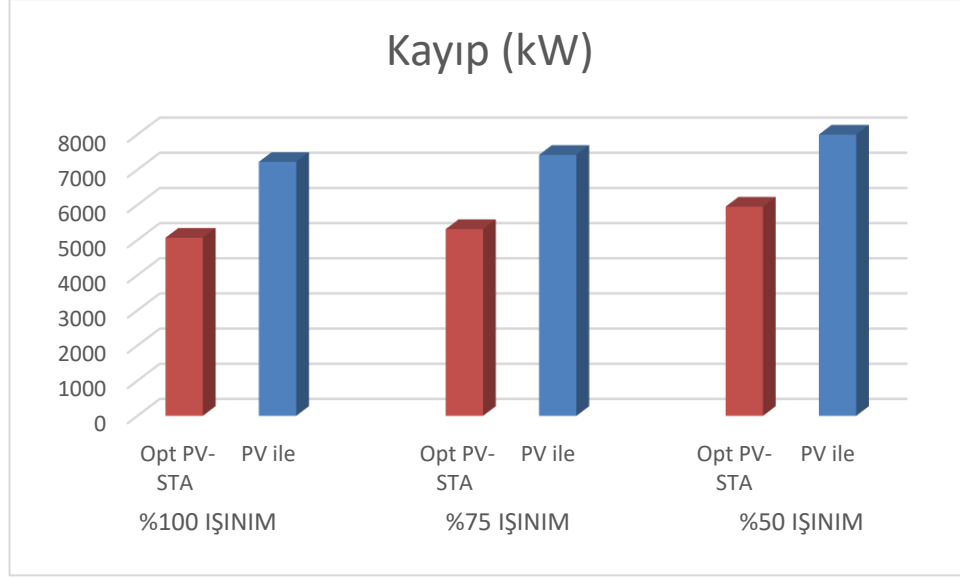
Bulutlanmanın şebekedeki en zayıf baranın gerilim profiline etkisi Şekil 7.17’de görülmektedir. *PV ile* gündüz saatlerinde bulutlanmanın etkisiyle gerilim sınırı aşılmışken, *Optimal PV-STATCOM ile* bulutlanmanın negatif etkisi bertaraf edilmiştir.



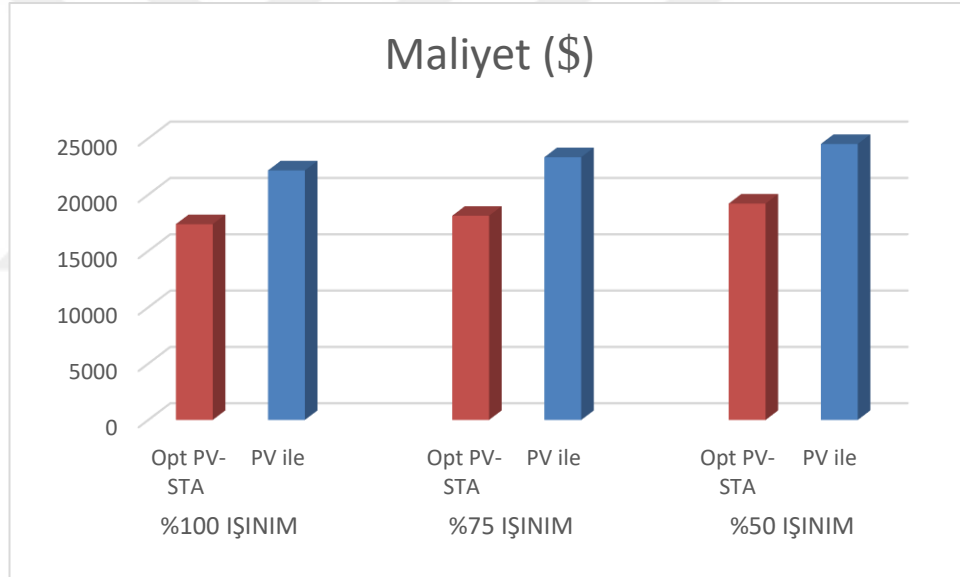
Şekil 7.17 : Bulutlanma etkisinde Bara-34’ün gerilim profili.

7.4.5 Işınnımın etkisinin araştırılması

Bu bölümde, ışınnım düzeyindeki değışimin sonuçlara etkisi incelenmiştir. Yukarıda gösterilen Şekil 7.3’te, Sarıyer’in 12.06.2018 tarihli günlük ışınnım grafiğı verilmiştir. Bu bölümde, Şekil 7.3’te verilen ışınnımın, %25 ve %50 daha az olduğu varsayılarak bu iki farklı senaryo için analizler yapılmıştır. Yapılan yük akışı analizlerinde *PV ile* elde edilen sonuçlar, MLAA koşturularak *Optimal PV-STATCOM ile* elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

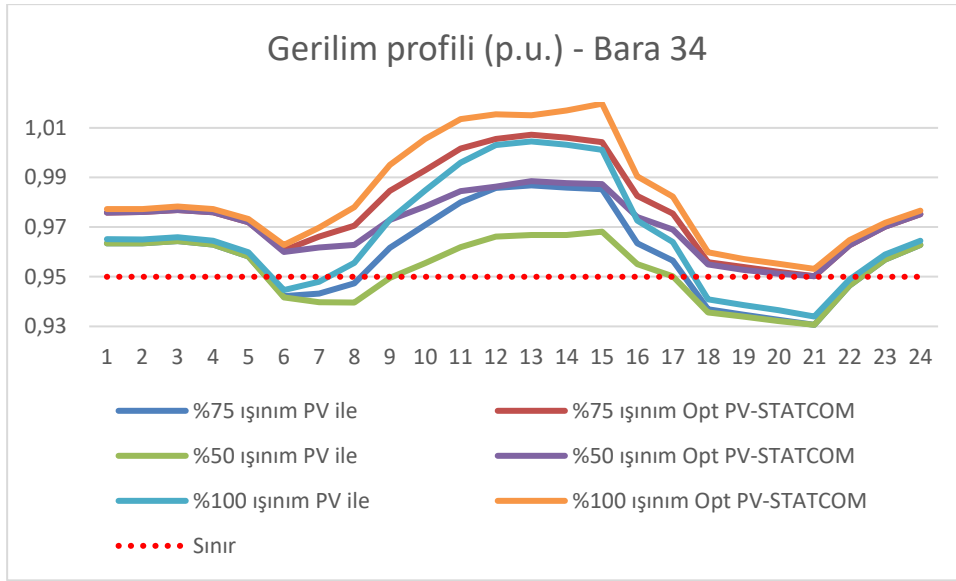


Şekil 7.18 : Farklı ışınlm düzeylerinde günlük toplam kayıp değerleri.



Şekil 7.19 : Farklı ışınlm düzeylerinde günlük toplam maliyet değerleri.

%100 ışınlm durumu için elde edilen sonuçlar yukarıda verilmişti. %100 ışınlm durumundaki günlük toplam kayıp ve maliyet değerleri, ışınlm düzeyinin %75'e ve %50'ye düşmesi durumları ile Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da karşılaştırılmıştır. Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'dan görüldüğü gibi, ışınlmdaki %25'lik düşüş kayıp ve maliyette küçük bir artışa neden olurken; ışınlmdaki %50'lik düşüş, daha baskın bir artışa neden olmuştur.



Şekil 7.20 : Farklı ışıınım düzeylerinde Bara 34'ün gerilim profili.

Şekil 7.20'de, ışıınım düzeylerindeki değışimin en zayıf baranın gerilim profiline etkisi incelenmiştir. Işıınımın düşmesiyle, gündüz saatlerinde bara gerilim genliğinin düştüğü sonucuna varılmıştır. Işıınımın düşmesiyle birlikte, *PV ile* bara geriliminin bazı gündüz saatlerinde de güvenli sınırın altında kaldığı görülmektedir. Önerilen yöntemle ise, kayıp ve maliyeti minimize etmekle birlikte tüm ışıınım düzeylerinde gerilimin istenen aralıkta tutulabildiği görülmektedir.

8. SONUÇLAR

Artan teşvikler ve düşen fotovoltaik panel maliyetleri, son yıllarda ülkemizde fotovoltaik güneş santrallerinin yatırımlarına büyük bir ivme kazandırmıştır. Fotovoltaik güneş sistemlerinin dağıtım şebekesinin gerilim profilini yükseltici yöndeki etkisi; fotovoltaik güneş sistemlerinin katılım oranlarının yüksek olduğu özellikle hafif yüklü şebekelerde, güvenli gerilim işletme sınırlarının sağlanması noktasında sorun teşkil edebilmektedir. Dağıtım şebekelerine entegre edilen büyük ölçekteki fotovoltaik güneş sistemlerinin olası etkilerinin yönetilmesi gerektiğinden, bu tez kapsamında dağıtım sistem işletmecilerinin karşılaması gereken şebeke işletme yükümlülüklerini yerine getirebilecekleri şekilde akıllı bir gerilim/reaktif güç kontrol yöntemi geliştirme düşüncesi doğmuştur.

Dağıtım şebekelerindeki STATCOM uygulamalarının gerilim ve reaktif güç kontrolunda önemli bir yere sahip olduğu bilinen bir gerçektir. Hem sistemin sürekli durum işletme koşullarını iyileştirdiğinden hem de geçici durum sistem arızalarının giderilmesine yönelik hızlı cevap verme kabiliyetinden dolayı STATCOM uygulamaları gitgide yaygınlaşmaktadır. Literatürde fotovoltaik güneş sistemlerinin bulunduğu şebekelerde; STATCOM'ların fiziksel olarak tesis edilmesinden, fotovoltaik sistem eviricilerinin STATCOM olarak işletilmesine olanak tanıyan akıllı bir PV-STATCOM kontrolör tasarımı önerilmiştir. Bu öneri, dağıtım sistem işletmecileri için ekonomik olarak büyük bir tasarruf imkanını beraberinde getirmektedir.

Dağıtım şebekelerindeki yük altında kademe değiştirici transformatör ve şönt kapasitör gibi geleneksel gerilim kontrol ekipmanların yavaş tepkilerinin aksine; fotovoltaik güneş sistemlerindeki doğadan kaynaklı ani üretim değişimlerine ve şebekede oluşabilecek geçici arıza durumlarında gerilimdeki ani dalgalanmalara da hızlı cevap verme kabiliyetinden dolayı yenilikçi PV-STATCOM fikrinin uygulamasının uygun olacağı düşünülmüştür.

İlk defa bu tez çalışması kapsamında, bir dağıtım şebekesine entegre edilmiş yüksek katılımlı çok sayıda fotovoltaik güneş sisteminin PV-STATCOM olarak işletilmesi

durumundaki Volt/VAr optimizasyon problemi ele alınmıştır. PV-STATCOM'ların aktif güç üretiminden arta kalan kapasiteleri ile, şebeke ile reaktif güç alışverişleri kontrol edilerek 24 saat boyunca bağlı oldukları baralardaki gerilimler işletme sınırları dahilinde tutulmuştur. Önerilen gerilim kontrol yönteminde, şebeke işletme koşulları sağlanmaya çalışılırken bir taraftan da dağıtım kayıplarını ve enerji maliyetini minimize etmeye odaklanılmıştır. Bu çoklu amacı sağlamak için sisteme bağlı tüm PV-STATCOM'ların optimal olarak işletilmesi gerekmiştir. Bu tez çalışmasında 24 saat boyunca değişen hava koşulları ve yüklenme şartları için tüm PV-STATCOM'ların optimal reaktif güç çizelgelemesinin belirlenmesi; sezgisel algoritmalarından biri olan Ateş Böceği Algoritmasında yapılan düzenlemelerle geliştirilen Modifiye Lévy Ateş Böceği Algoritmasının, ilk defa gerilim/reaktif güç kontrol problemine uygulanmasıyla elde edilmiştir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği, Sarıyer ilçesine ait 10,5 kV'luk bir dağıtım sisteminde test edilmiştir. Simülasyon sonuçları tezin amacına ulaştığını göstermiştir. Yapılan analizlerden çıkarılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Fotovoltaik güneş sistemlerinin PV-STATCOM olarak optimal işletilmesinin, sadece aktif güç üretim modunda işletilmesine göre hem teknik olarak şebekenin işleyişinde hemde enerjinin maliyetine iyileştirici yönde büyük etkisi olduğu görülmüştür.
- Literatürde bu optimizasyon problemine daha önce hiç uygulanmamış olan MLAA'nın etkinliğini değerlendirmek amacıyla, probleminin çözümü AA ve PSO uygulanarak arandığında elde edilen simülasyon sonuçları; MLAA'nın bütünsel optimal çözümü bulmada diğerlerinden daha başarılı olduğunu kanıtlamıştır.
- Önerilen yöntemin gerçek bir şebekede test edilmesiyle elde edilen sonuçlar, uygulanabilirliğini göstermiştir.
- Maliyet formülüne transformatörden çekilen reaktif enerji bedelinin dahil edilmesinin, enerjinin maliyetine büyük etki ettiği sonucuna varılmıştır.
- Sistemin yüklenmesi arttıkça, optimal işletilen PV-STATCOM'ların sağladığı tekno-ekonomik üstünlük daha belirgin olmaktadır.

- Önerilen bu yaklaşımın, reaktif güç talebi daha yüksek olan geniş ticari ve endüstriyel tüketiciye sahip şebekelerde uygulanmasının daha uygun olacağı açıktır.
- Tez çalışmasında önerilen yeni gerilim/reaktif güç kontrol yaklaşımının dağıtım şebekesi işletmecilerine örnek olacağı düşünülmektedir. Gerilim/reaktif güç kontrolunda ana amaçlardan biri enerji kayıplarını azaltmak olduğundan ve yeni yatırımlara gereksinimi azaltacağından, önerilen yeni yöntem dağıtım sistemi işletmecilerine büyük ekonomik yarar sağlayacaktır.
- Bu tez çalışmasında önerilen şekliyle işletilen 5 MW ve altında kurulu güçlerdeki lisanssız fotovoltaik güneş sistemlerinin de dağıtım şirketlerine reaktif güç kontroluna ilişkin yan hizmetler sağlama noktasındaki katkısının dikkate değer olduğu ortaya konmuştur.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde, sağladığı büyük ekonomik fayda ve işletme kolaylığı nedeniyle dağıtım şirketlerinin bizzat kendilerinin şebeke üzerinde fotovoltaik santral yatırımı yapmaları önerilebilir.
- Dağıtım sistem işletmecilerinin yanısıra, gerilim/reaktif güç kontrolu üzerinde çalışan araştırmacılara da farklı bir yaklaşım sunacağından faydalı bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda, bu tezde geliştirilen yönteme gerilim kararlılık indislerinin ve toplam harmonik distorsiyonunun iyileştirilmesi gibi farklı amaç fonksiyonları dahil edilebilir. PV-STATCOM'ların geçici hal kararlılığına, fliker indislerine ve dağıtım sistemlerinin PV karşılama kapasitesini arttırmaya yönelik etkileri gibi konular üzerinde çalışmalar geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Senjyu, T., Yoshitaka, M., Yona, A., Urasaki, N. ve Funabashi, T.** (2008). Optimal Distribution Voltage Control and Coordination with Distributed Generation, *IEEE Trans. on Power Systems*, 23/2: 1236-1242.
- [2] **Kocaman, B.** (2013). Akıllı Sebekeler ve Mikro Sebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 119-127.
- [3] **Niknam, T., Ranjbar, A. ve Shirani, A.** (2003). Impact of Distributed Generation on Volt/Var Control in Distribution Networks, *IEEE Bologna PowerTech Conference*, June, Italy.
- [4] **O'Donnell, J.** (2007). *Voltage Management of Networks with Distributed Generations*. (Doktora tezi). University of Edinburgh, Edinburgh.
- [5] **Pepermansa, G., Driesenb, J., Haeseldonckxc, D., Belmansc, R. ve D'haeseleerc, W.** (2005). Distributed generation: definition, benefits and issues, *Energy Policy*, 33: 787–798.
- [6] **Şimşek, B. ve Bizkevelci, E.** (2014). Fotovoltaik Güneş Elektrik Santrallerinin Alçak Gerilim Şebekesine Bağlantı Esasları, *Enerji Hukuku Dergisi*, Cilt :3, Sayı .1, Ocak.
- [7] **Abacılar, N.** (2015). Lisanssız Elektrik Üretiminde Mevzuat, Başvurular, Değerlendirmeler ve Ana Esaslar, *TEDAŞ Genel Müdürlüğü*. Haziran.
- [8] **O'Gorman, R. ve Redfern M. A.** (2004). Voltage control problems on modern distribution systems, *IEEE General Meetings on Power Systems*.
- [9] **Homaee, O., Zakariazadeh, A. ve Jadid, S.** (2014). Real-time voltage control algorithm with switched capacitors in smart distribution system in presence of renewable generations. *Electrical Power and Energy Systems*, 54:187-197.
- [10] **Brenna, M., Berardinis, E., Carpini, L., Foiadelli, F., Paulon, P., Petroni, P. ve Sapienza, G.** (2013). Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications, *IEEE Trans.on Smart Grid*, 4/2: 877-885, June.
- [11] **Jung, J., Onen, A., Russell, K. ve Broadwater, R.** (2015). Local steady-state and quasi- state impact studies of high photovoltaic generation penetration in power distribution circuits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 569-583.
- [12] **Aly, M. M., Abdel-Akher, M., Ziadi Z. ve Senjyu, T.** (2014). Assessment of reactive power contribution of photovoltaic energy systems on voltage profile and stability of distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 61, 665-672.

- [13] **Adewuyi, O. B., Shigenobu, R., Senjyu, T., Lotfy, M. E. ve Howlader, A.** (2019). Multiobjective mix generation planning considering utility-scale solar PV system and voltage stability: Nigerian case study. *Electric Power Systems Research*. 168, 269-282.
- [14] **URL-1** <<https://www.solarpowereurope.org/european-solar-market-grows-28-in-2017/>> erişim tarihi: 09.02.2021.
- [15] **Tina, G. M., Garozzo, D. ve Siano, P.** (2019). Scheduling of PV inverter reactive power set -point and battery charge/ discharge profile for voltage regulation in low voltage networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 107, 131-139.
- [16] **Pamshetti, V. B. ve Singh, S. P.** (2019). Optimal coordination of PV smart inverter and traditional volt-VAR control devices for energy cost savings and voltage regulation. *Int Trans. Electr Energ Syst*.29: e12042. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12042>.
- [17] **Calderaro, V., Conio, G., Galdi, V., Massa, G. ve Piccolo, A.** (2014). Optimal Decentralized Voltage Control for Distribution Systems With Inverter-Based Distributed Generators. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 29, No. 1, January.
- [18] **Varma, R. K., Khadkikar, V. ve Seethapathy, R.** (2009). Nighttime Application of PV Solar Farm as STATCOM to Regulate Grid Voltage. *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 24, No. 4, December.
- [19] **Varma, R. K., Das, B., Axente, I. ve Vanderheide, T.** (2011). Optimal 24-hr Utilization of a PV Solar System as STATCOM (PV-STATCOM) in a Distribution Network. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*.
- [20] **Varma, R. K. ve Siavashi, E. M.** (2018). PV-STATCOM: A New Smart Inverter for Voltage Control in Distribution Systems, *IEEE Trans. On Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 4, October.
- [21] **Varma, R. K. ve Siavashi, E. M.** (2019). Enhancement of Solar Farm Connectivity With Smart PV Inverter PV-STATCOM. *IEEE Trans.on Sustainable Energy*, Vol. 10, No. 3, July.
- [22] **Barr, J. ve Majumder, R.** (2015). Integration of Distributed Generation in the Volt/VAR Management System for Active Distribution Networks, *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 6, No. 2, pp. 576-586, March.
- [23] **Viawan, F. ve Karlsson, D.** (2008). Voltage and Reactive Power Control in Systems with Synchronous Machine-Based Distributed Generation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, pp. 1079-1087, April 2008.
- [24] **Elkhatib, M., El-Shatshat, R. ve Salama, M.A.** (2011). Novel Coordinated Voltage Control for Smart Distribution Networks With DG, *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 2, No. 4, pp. 598-605, December.
- [25] **Maknouninejad, A. ve Qu, Z.** (2014). Realizing Unified Microgrid Voltage Profile and Loss Minimization: A Cooperative Distributed Optimization and Control Approach, *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, Pp. 1621-1630, July.

- [26] **Kulmala, A., Repo, S. ve Järventausta, P.** (2009). Increasing penetration of distributed generation in existing distribution networks using coordinated voltage control. *Int. J. Distrib. Energy Resources*, Vol. 5, pp. 227–255, July.
- [27] **Bignucolo, F., Caldon, R. ve Prandoni, V.** (2008). Radial MV networks voltage regulation with distribution management system coordinated controller. *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 78, pp. 634–645, Apr.
- [28] **Pfajfar, T., Papic, I., Bletterie, B. ve Brunner, H.** (2007). Improving power quality with coordinated voltage control in networks with dispersed generation. in *Proc. 9th Int. Conf. Electr. Power Quality Utilisation*.
- [29] **Conti, S. ve Greco, A. M.** (2007). Innovative voltage regulation method for distribution networks with distributed generation. in *Proc. 19th Int. Conf. Electr. Distrib.*
- [30] **Niknam, T.** (2011). A new HBMO algorithm for multiobjective daily Volt/Var control in distribution systems considering Distributed Generators, *Applied Energy*; 88: 778-788 .
- [31] **Agalgaonkar, Y. P., Pal, B. C. ve Jabr, R. A.** (2014). Distribution voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulators. *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 29, no. 1, pp. 182–192, Jan.
- [32] **Wang, Z., Wang, J., Chen, B., Begovic, M. ve He Y.** (2014). MPC-Based Voltage/Var Optimization for Distribution Circuits With Distributed Generators and Exponential Load Models, *IEEE Transactions On Smart Grid*, Vol. 5, No. 5, Pp. 2412-2420, September.
- [33] **Kulmala, A., Repo, S. ve Jarventausta, P.** (2014). Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Including Several Distributed Energy Resources, *IEEE Transactions On Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp.2010-2020, July.
- [34] **Oshiro, M., Tanaka, K., Uehara, A., Senjyu, T. ve Yoshitaka, M.** (2010). Optimal voltage control in distribution systems with coordination of distribution installations, *Electrical Power and Energy Systems*, 32:1125-1134.
- [35] **Baran, M. ve El-Markabi, M.** (2007). A multiagent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distribution feeders, *IEEE Trans. on Power Systems*, 22:52-59.
- [36] **Calderaro, V., Conio, G., Galdi, V. ve Piccolo, A.** (2012). Reactive power control for improving voltage profiles: a comparison between two decentralized approaches, *Electric Power Systems Research*, 83:247-254.
- [37] **Roy, P.K., Ghoshal, S.P ve Thakur, S. S.** (2012). Optimal VAR control for improvements in voltage profiles and for real power loss minimization using biogeography based optimization. *Int J Electr Power Energy Syst.*;43:830-838.

- [38] **Mansour, M.O. ve Abdel-Rahman, T. M.** (1984). Non-linear VAR optimization using decomposition and coordination. *IEEE Trans Power Apparatus Syst.*;PAS-103(2):246-255.
- [39] **Mamandur, K.R.C. ve Chenoweth, R.D.** (1981). Optimal control of reactive power flow for improvements in voltage profiles and for real power loss minimization. *IEEE Trans Power Apparatus Syst.*;PAS-100(7):3185-3193.
- [40] **Jashfar, S. ve Esmaeili.** (2014). Volt/var/THD control in distribution networks considering reactive power capability of solar energy conversion, *Electric Power and Energy Systems*, 60:221-233.
- [41] **Niknam, T., Firouzi, B.B. ve Ostadi, A.** (2010). A new fuzzy adaptive particle swarm optimization for daily Volt/Var control in distribution networks considering distributed generators. *Appl Energy*;87:1919-1928.
- [42] **Zare, M. ve Niknam, T.** (2013). A new multi-objective for environmental and economic management of Volt/Var Control considering renewable energy Resources, *Energy*, 55:236-252.
- [43] **Malekpour, A. ve Niknam, T.** (2014). A probabilistic multi-objective daily Volt/Var control at distribution networks including renewable energy sources, *Energy*,36:3477-3488.
- [44] **Paaso, A., Liao, Y. ve Cramer, A.** (2014). Formulation and solution of distribution system voltage and VARcontrol with distributed generation as a mixed integer non-linearprogramming problem, *Electr. Power Syst. Res*, 108:164-169.
- [45] **Yang, X.S.** (2010). Firefly algorithm. Stochastic test functions and design optimization. *Int J Bio-Inspired Comput.*;2(2):78-84.
- [46] **Gandomi, A.H., Yang, X.S. ve Alavi, A.H.** (2011). Mixed variable structural optimization using firefly algorithm. *Comput Struct.*;89(23–24):2325-2336.
- [47] **Yang, X., Hosseini, S.S.S. ve Gandomi, A.H.** (2012). Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect. *Appl Soft Comput.*;12:1180-1186.
- [48] **Othman, M.M., El-Khattam, W., Hegazy, Y.G., Almoataz Y. Abdelaziz.** (2016). Optimal placement and sizing of voltage controlled distributed generators in unbalanced distribution networks using supervised firefly algorithm. *Int J Electr Power Energy Syst.*;82:105-113.
- [49] **Sekhar, G.T.C., Sahu, R.K., Baliarsingh, A.K. ve Panda, S.** (2016). Load frequency control of power system under deregulated environment using optimal firefly algorithm. *Int J Electr Power Energy Syst.*;74:195-211.
- [50] **Niknam, T., Azizipanah-Abarghooee, R. ve Roosta, A.** (2012). Reserve constrained dynamic economic dispatch: a new fast self-adaptive modified firefly algorithm.*IEEE System Journal*;6(4):635-646.

- [51] **Liang, R.H., Wang, J.C., Chen, Y.T. ve Tseng, W.T.** (2015). An enhanced firefly algorithm to multi-objective optimal active/reactive power dispatch with uncertainties consideration. *Int J Electr Power Energy Syst.*; 64:1088-1097.
- [52] **Pradhan, P.C., Sahu, R.K. ve Panda, S.** (2016). Firefly algorithm optimized fuzzy PID controller for AGC of multi-area multi-source power systems with UPFC and SMES. *Eng Sci Techno An Int J.*;19(1):338-354.
- [53] **Kulmala, A., Maki, K., Repo, S. ve Jarventausta, P.** (2007). Active voltage management of distribution networks with distributed generation using on load tap changing Transformers, *IEEE PowerTech Conf.*
- [54] **Alkaabi, S.S., Khadkikar, V. ve Zeineldin, H.H.** (2015). Incorporating PV inverter control schemes for planning active distribution networks. *IEEE Trans. on Sustainable Energy*; Vol.6 No.4 pp.1224-1233.
- [55] **Viehweider, A., Schichl, H., Burnier de Castro, D., Henein, S. ve Schwabeneder, D.** (2010). Smart robust voltage control for distribution networks using interval arithmetic and state machine concepts, *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*.
- [56] **Kulmala, A., Mutanen, A., Koto A., Repo, S. ve Jarventausta, P.** (2012). Demonstrating coordinated voltage control in a real distribution network, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Berlin.
- [57] **Nimpitiwan, N. ve Chaibut, C.** (2007). Centralized control of system voltage/reactive power using genetic algorithm, *Intelligent Systems Applications to Power Systems*.
- [58] **Aman, M.M., Jasmon, G.B., Solangi, K., Bakar, H.A., ve Mokhlis, H.** (2013). Optimum Simultaneous DG and Capacitor Placement on the Basis of Minimization of Power Losses. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 5, October.
- [59] **Niknam, T.** (2008). A new approach based on ant colony optimization for daily Volt/Var control in distribution networks considering distributed generators, *Energy Conversion and Management*, 49:3417-3424.
- [60] **Azharuddin, M. ve Gaigowal, S.R.** (2017). Voltage Regulation by Grid Connected PV-STATCOM, *Int. Conf. on Power and Embedded Drive Control*, IEEE, March.
- [61] **Kincay, O., Bekiroğlu, N. ve Yumurtacı, Z.** Güneş Pilleri- I. Bölüm, Ders Notları, *Yıldız Teknik Üniversitesi*.
- [62] **URL-2**<<https://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx>>erişimtarihi: 4.02.2021
- [63] **OpenDSS PV System Element Model.** (2011). *Electric Power Research Institute (EPRI)*, February 23.

- [64] **Shahnia, F., Rajakaruna, S. ve Ghosh, A.** (2015). Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems. *Springer Singapore*.
- [65] **Ertay, M. ve Erdoğmuş, Z.** (2010). Statcom İle Bir Enerji İletim Sisteminde Gerilim Kontrolü. *Dumlupınar Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. Sayı 21, Nisan.
- [66] **Mithulananthan, N., Sode -Yome, A., and Acharya, N.** (2005). Application of FACTS Controllers in Thailand Power Systems, *RTG Budget Joint Research Project*, School of Environment, Resources and Development Asian Institute of Technology, Thailand.
- [67] **Canizares, C.A.** (2000). Power Flow And Transient Stability Models Of FACTS Controllers For Voltage And Angle Stability Studies, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol.2, 1447–1454. Singapur, Jan. 2000.
- [68] **Varma, R. K., Shriram, S., Axente, R. I. ve Sharma, V.** (2011). Novel Application of a PV Solar Plants as STATCOM during Night and Day in a Distribution Utility Network, *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, March.
- [69] **Varma, R. K., Rahman, S. A. ve Vanderheide, T.** (2015). New Control of PV Solar Farm as STATCOM (PV-STATCOM) for Increasing Grid Power Transmission Limits During Night and Day, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 30, No. 2, April.
- [70] **Luo, L., Gu, W., Zhang, X. P., Cao, G., Wang, W., Zhu, G., You, D. ve Wu, Z.** (2018). Optimal siting and sizing of distributed generation in distribution systems with PV solar farm utilized as STATCOM (PV-STATCOM), *Applied Energy*, 210, 1092-1100.
- [71] **Das, S., Das, D. ve Patra, A.** (2019). Operation of distribution network with optimal placement and sizing of dispatchable DGs and shunt capacitors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109219.
- [72] **Gürtürk, M.** (2019). Economic feasibility of solar power plants based on PV module with levelized cost analysis. *Energy*, 171, 866-878.
- [73] **Yang, X. S. ve He, X.** (2013). Firefly Algorithm: Recent Advances and Applications, *Int. J. Swarm Intelligence*, Vol. 1, No. 1, pp. 36–50.
- [74] **Yang, X. S.** (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization, *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009*, Lecture Notes in Computer Sciences, Vol. 5792, pp. 169-178.
- [75] **Yang, X. S.** (2010). Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms-Second Edition, *Luniver Press*.
- [76] **Yang, X. S.** (2010). Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimization, *Int. J. Bio-Inspired Computation*, Vol.2, No.2, pp.78-84, March 9.
- [77] **Belen, M.A., Alıcı, M., Çor, A. ve Güneş, F.** (2014). Ateş böceği Algoritması ile Mikrodalga Transistör Performans Karakterizasyonu, *Eleco 2014, Bursa*.

- [78] **Yang, X-S. ve Deb S.** (2013). Multiobjective cuckoo search for design optimization. *Comput Oper Res.* ;40:1616-1624.
- [79] **Mohammadi, S., Mozafari, B., Solimani, S. ve Niknam, T.** (2013). An adaptive modified firefly optimisation algorithm based on Hong's point estimate method to optimal operation management in a microgrid with consideration of uncertainties. *Energy*;51:339-348.
- [80] **URL-3** <<http://www.swarmintelligence.org/tutorials.php>> erişim tarihi:4.2.2021
- [81] **Shi, Y. ve Eberhart, R.** (1998). A modified particle swarm optimizer. *IEEE International Conference on World Congress on Computational Intelligence*, Anchorage, Springer, AK, USA. p. 69–73.
- [82] **Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.** (2019). *Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği.*
- [83] **Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.** (2020). *Elektrik Piyasasında Dağıtım Ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Kalite Yönetmeliği.*
- [84] **Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.** (2014). *Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği.*
- [85] **Taleski, R. ve Dragoslav, R.** (1996). Energy summation method for energy loss computation in radial distribution networks. *IEEE Trans. Power Syst.* 11(2): 1104-11.
- [86] **URL-4** <<https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/index.xhtml>> erişim tarihi:04.02.2021
- [87] **Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.** (2015). *Dağıtım Lisansı Sahibi Tüzel Kişiler Ve Görevli Tedarik Şirketlerinin Tarife Uygulamalarına İlişkin Usul Ve Esaslar.*



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Merve GÜLERYÜZ HALAÇLI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2008, İ.T.Ü., Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2011, İ.T.Ü., Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2009 - 2021 yılları arasında, İ.T.Ü., Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

- **Guleryuz Halacli M, Demiroren A.** (2021). Techno-economic management of daily Volt/Var planning considering reactive power contribution of high penetrated-PV solar farms utilized as STATCOM: A case study in Istanbul, Turkey. International Transactions on Electrical Energy Systems;e12772. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12772>

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Uluslararası hakemli dergi (SCI) yayınları:

Guleryuz Halacli M, Demiroren A. (2016). Robust Voltage/VAR Control Using PSO-Based STATCOM: A Case Study in Turkey. Electric Power Components and Systems, Vol. 44, Iss. 8.

Uluslararası konferans yayınları:

M. Guleryuz, A. Demiroren, *Effects of a wind farm and FACTS devices on static voltage stability of Bursa Transmission System in Turkey*, IEEE PES Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering-EEIC, May 2011, Rome

A Demiroren, **M. Guleryuz**, *PSO algorithm-based optimal tuning of STATCOM for voltage control in a wind farm integrated system*, ELECO, November 2011, Bursa