

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜK ALTINDA KADEME DEĞİŞTİRİCİ VE EVİRİCİ
DESTEKLİ REAKTİF GÜÇ AYARIYLA GERİLİM
REGÜLASYONU İÇİN ANALİTİK TABANLI YÖNTEMLERİN
GELİŞTİRİLMESİ

SÜLEYMAN TUNÇEL
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜK ALTINDA KADEME
DEĞİŞTİRİCİ VE EVİRİCİ DESTEKLİ
REAKTİF GÜÇ AYARIYLA GERİLİM
REGÜLASYONU İÇİN ANALİTİK
TABANLI YÖNTEMLERİN
GELİŞTİRİLMESİ

SÜLEYMAN TUNÇEL
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ TUBA GÖZEL

GEBZE

2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DEVELOPMENT OF ANALYTIC
BASED METHODS WITH ON LOAD TAP
CHANGER AND INVERTER AIDED
REACTIVE POWER REGULATION FOR
VOLTAGE REGULATION**

SÜLEYMAN TUNÇEL
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY**
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. ÜYESİ TUBA GÖZEL

GEBZE
2023



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 06/07/2023 tarih ve 2023/37 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 01/08/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Süleyman Tunçel'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Dr. Öğr. Üyesi Tuba Gözel

ÜYE

: Prof. Dr. Mehmet Hakan Hocaoğlu

ÜYE

: Prof. Dr. Abdülkadir Balıkçı

ÜYE

: Prof. Dr. Bora Alboyacı

ÜYE

: Prof. Dr. Murat Erhan Balcı

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Dağıtım şebekesi yapısı artan yük talepleri, dağıtık jeneratörlerin ve enerji depolama sistemleri ve yeni teknolojik sistemlerin entegrasyonu ile gerilim ihlallerini daha sık yaşanır hale getirmiştir. Bu sebeple, gerilim ihlallerinin üstesinden gelebilmek için etkili gerilim regülasyonu metotlarının türetilmesi önem arz etmektedir.

Mevcut literatürde gerilim regülasyonu; aktif güç, reaktif güç ayarlaması yöntemiyle ve yük altında kademe değiştirici, statik VAR kompensatör vb. komponentlerin kullanılmasıyla yapılmıştır. Aktif, reaktif güç ayar değerleri ve gerilim regülatörüne katılacak komponentlerin ayar değerleri, mevcut çalışmalarda ağırlıklı olarak optimizasyon problemi çözümü yaklaşımı, öğrenme algoritmaları ve kontrol algoritmalarının uygulanmasıyla bulunmuştur. Literatürde, bu ayar değerlerinin pratik cebirsel işlemlerle bulunduğu analitik ifade temeline dayanan metotların eksikliği tespit edilmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak yük altında kademe değiştiricili transformatörün kademe pozisyon ayarlamasıyla, bara gerilimlerini işletme limitlerinde tutan ve analitik ifadeden faydalanan metot geliştirilmiştir. Ek olarak, türetilen bu metot ufak değişikliklerle gerilim profilini iyileştiren analitik tabanlı metoda geliştirilmiştir. İkinci olarak, dağıtık jeneratörlerin eviricilerinin reaktif güç kapasitesini ayarlayan analitik tabanlı metot geliştirilmiştir. Son olarak, yük altında kademe değiştirici transformatörün kademe pozisyonunu ve dağıtık jeneratörün reaktif güç çıkışını, koordineli biçimde ayarlayan, belli bir uygulama prosedürüne sahip ve eğri uydurma tekniğinden faydalanan algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen analitik tabanlı metotlar sayesinde optimizasyon problemi çözme yaklaşımı vb. metotlara kıyasla işlem yükü önemli derecede azaltılarak, harcanan hesaplama süresi önemli ölçüde azaltılmıştır. Son katkı olarak, koordineli gerilim regülasyonu yaklaşımıyla, ilk olarak reaktif güç ayarlaması yapılarak yük altında kademe değiştiricili transformatörün kademe pozisyon hareket sayısı da azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gerilim Regülasyonu, Yük Altında Kademe Değiştirici, Tap Pozisyon Ayarlaması, Evirici, Reaktif Güç Ayarlaması.

SUMMARY

The distribution grid structure is becoming more complex with increasing load demand, integration of the distributed generators and the energy storage systems, and new energy technology systems. In particular, these changes have made voltage violations in the distribution network more frequent. Therefore, it is important to create effective voltage regulation methods to overcome voltage violations.

In the existing literature, voltage regulation has been performed by adjusting active power, reactive power and using components such as on load tap changers (OLTC), static VAR compensators and etc. The active and reactive power setting values and the setting values of the components to be included in the voltage regulator have been found in existing studies mainly by applying optimization problem solving approach, learning algorithms and control algorithms. In the literature, the lack of methods based on analytical expressions where these setting values are obtained by simple calculable algebraic operations has been realized. In this study firstly, an analytic based method was derived to keep bus voltages within operating limits by adjusting the OLTC tap position. In addition, this derived method is evolved into an analytic based method that improves the voltage profile with minor modifications. Secondly, an analytic method is developed to adjust the reactive power capacity of the distributed generator inverters. Finally, an algorithm that coordinates the tap position of OLTC and the reactive power output of the distributed generator is developed, which has a specific implementation procedure and utilizes the curve fitting technique.

The proposed methods with analytical and algorithmic approaches significantly reduce the computational burden and the calculation time compared to the methods with optimization problem solving approach, etc. As a final contribution, with the coordinated voltage regulation approach, the number of tap position movements of OLTC is also reduced by first adjusting the reactive power.

Key Words: Voltage Regulation, OLTC, Tap Position Adjustment, Invertors, Reactive Power Adjustment.

TEŞEKKÜR

BaŐta, doktora eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiğbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu ęalıŐmanın oluŐmasının yolunu ağan danıŐmanım Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL'e,

Bütün ęalıŐmam boyunca yanımda olan, desteklerini benden esirgemeyen değerli eŐim Gizem TUNÇEL, annem Zeynep TUNÇEL, babam Muzaffer TUNÇEL, ablam Niray TUNÇEL' e ve 2021 yılında dünyaya gelen, en değerlim olan kızım Zeynep TUNÇEL' e,

en ięten teŐekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Tezin Bölümleri	3
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Gerilim Regülasyonu: OLTC ile İlgili Çalışmalar	4
2.2. Gerilim Regülasyonu: Reaktif Güç Ayarlamasıyla	11
3. OLTC İLE GERİLİM REGÜLASYONU	19
3.1. Analitik İfadenin Elde Edilmesi	19
3.1.1. Bara Gerilim Düşümünün Analitik İfadesi	20
3.1.2. Radyal Dağıtım Şebekelerinde OLTC ile Gerilim Regülasyonu İçin Önerilen Metot	24
3.1.2.1. Bara Gerilimlerinin, OLTC Kademe Pozisyonuna Bağlı İfade Edilmesi	24
3.1.3 Algoritma Tanıtımı	35
3.1.4. Analiz Sonuçları	36
3.1.4.1. Test Sistemi ve Durumların Tanıtımı	36
3.1.4.2. Durum 1	38
3.1.4.3. Durum 2	39
3.2. OLTC ile Gerilim Profili İyileştirilmesi	40
3.2.1. Gerilim Sapması Endeksi İfadesinin Salınım Barasına Göre İfade Edilmesi	40
3.2.2. Algoritma Tanıtımı	41

3.2.3. Analiz Sonuçları	42
3.3. Sonuç	43
4. REAKTİF GÜÇ AYARLAMASIYLA GERİLİM REGÜLASYONU	45
4.1. Evirici Destekli Dağıtık Jeneratörün Reaktif Güç Çıkışını Gerilim Regülasyonu Amacı için Ayarlayan İfade	45
4.2. Algoritma Tanıtımı	48
4.3. Analiz Sonuçları	51
4.3.1. Durum-1	52
4.3.2. Durum-2	53
4.4. Sonuç	54
5. GERİLİM REGÜLASYONU: DAĞITIK JENERATÖR VE OLTC'NİN KOORDİNASYONU İLE	56
5.1. Koordineli Gerilim Regülasyonu Stratejisi	56
5.2. Koordineli Eğri Uydurma Temelli Gerilim Regülasyonu Metodu	58
5.2.1. Aşama-1	59
5.2.2. Aşama-2	61
5.2.3. Aşama-3	62
5.3. IAA ile Koordineli Gerilim Regülasyonu	64
5.4. Analiz Sonuçları	66
5.4.1. Durum-1	67
5.4.2. Durum-2	68
5.4.3. Durum-3	69
5.4.4. Durum-4	70
5.5. Sonuç	72
6. METOTLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	74
6.1. Sonuç	76
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
7.1. Sonuç	77
7.2. İleriye Yönelik Çalışmalar	79
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	85
EKLER	-

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kisaltmalar

AGK	: Aktif Güç Kesintisi
AVC	: Otomatik Voltaj Kontrolü, Automatic Voltage Control
BCBV	: Hat Akımından Bara Gerilim, Branch-Current to Bus-Voltage
BIBC	: Bara Akımından Hat Akımı, Bus-Injection to Branch-Current
DAC	: Merkezi Olmayan Otonom Kontrol
DG	: Dağıtık Jeneratör, Distributed Generator
DL	: Derin Öğrenme, Deep Learning
DRL	: Derin Takviyeli Öğrenme, Deep Reinforcement Learning
EA	: Evrimsel Algoritma, Evolutionary Algorithm
FACTS	: Esnek alternatif akım iletim sistemleri, Flexible AC Transmission Systems
FCS	: Fider Kontrol Birimi, Feeder Control Section
IAA	: Izgara Arama Metodu
MAS	: Çoklu Ajan Sistemi, Multi Agent System
MDP	: Marcov Karar Problemi, Marcov Decision Problem
MDP	: Model Öngörülü Kontrol, Model Predictive Control
MG	: Mikro-şebeke, Micro-grid
OLTC	: Yük Altında Kademe Değiştirici, On-load Tap Changer
OTC	: Optimal Kademe Kontrolü, Optimal Tap Control
PI	: Oransal İntegral, Proportional Integral
PSO	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Particle Swarm Optimization
PV	: Fotovoltaik, Photovoltaic
SOCP	: İkinci Dereceden Koni Programlama, Second Order Cone Programming
SOP	: Yumuşak Açık Nokta, Soft Open Point
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Örnek radyal yapıya sahip olan dağıtım şebekesi devre şeması	20
3.2: Durum 1 bara gerilim değerleri	39
3.3: Durum 2 bara gerilim değerleri	40
3.4: Bara gerilimleri	43
4.1: Durum-1 analiz sonuçları	53
4.2: Durum-2 analiz sonuçları	54
5.1: Koordineli gerilim regülasyonu metodu: IAA ile	65
5.2: Durum 1 bara gerilimleri	68
5.3: Durum 2 bara gerilimleri	69
5.4: Durum 3 bara gerilimleri	70
5.5: Durum 4 bara gerilimleri	71

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: OLTC kademe pozisyonuyla yapılan gerilim regülasyon çalışmaları	11
2.2: Reaktif güç ayarlamasıyla yapılan, merkezi kontrol stratejisine dayalı gerilim regülasyon çalışmaları	14
2.3: Reaktif güç ayarlamasıyla yapılan, DAC stratejisine dayalı gerilim regülasyon çalışmaları	16
2.4: Reaktif güç ayarlamasıyla yapılan, merkezi olmayan koordineli kontrol stratejisine dayalı gerilim regülasyon çalışmaları	18
3.1 Gerilim regülasyonu algoritması: OLTC kullanılarak	36
3.2: Test sistemi ve analiz durumları özeti	37
3.3 Gerilim profili iyileştirilmesi algoritması: OLTC kullanılarak	41
4.1 Reaktif güç ayarlamasıyla gerilim regülasyonu algoritması: DG vasıtasıyla	49
4.2: Test sistemi ve durumların açıklaması	51
5.1 Koordineli gerilim regülasyon strateji algoritması	57
5.2 Koordineli eğri uydurma temelli gerilim regülasyonu algoritması: aşama-1	60
5.3 Koordineli eğri uydurma temelli gerilim regülasyonu algoritması: aşama-2	62
5.4 Koordineli eğri uydurma temelli gerilim regülasyonu algoritması: aşama-3	63
5.5: Test sistemi durum bilgileri	67
5.6: Tüm durumların sonuçları	72

1. GİRİŞ

Geleneksel elektrik dağıtım şebekeleri, merkezi enerji üretim tesislerinde üretilen elektrik enerjisini kullanıcılara ulaştırmak üzere, tek yönlü elektrik enerjisi akışına göre dizayn edilmişlerdi [1]. Ancak günümüzde, lokal elektrik enerjisi üretimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) üretim yapan tesislerinin kurulmasının ülkeler tarafından desteklenmesi vb. gelişmelerle birlikte, dağıtım şebekelerinde enerji akışı çift yönlü hale gelmiştir. Özellikle 2012 yılından itibaren dağıtım şebekelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üreten enerji tesislerinin kurulumu; iklim değişikliğini engelleme, emisyon oranlarını ve fosil yakıtların kullanımını azaltma vb. hedefler doğrultusunda, her geçen gün artarak devam etmektedir [2], [3]. Dağıtım şebekelerinde YEK'lerin penetrasyonunun artmasının yanında; elektrik enerji depolama birimleri (elektro-kimyasal depolama, mekanik enerji depolama birimleri vb.), elektrikli araçlar ve ısı pompaları gibi dinamik yapıya sahip bileşenler şebekeye süratle dahil olmakta ve bu bileşenlerin her geçen gün sayıları artmaktadır [4], [5].

YEK'ler, depolama birimleri, elektrikli araçlar genel amaç itibarıyla fosil yakıtların kullanımını azaltma, sera gazı emisyonu miktarını düşürme hususlarının hepsinde veya bir kısmında önemli rolü sahiptirler. Özellikle, YEK'lerin dağıtım şebekelerine kurulması, uygun şekilde yerleştirilmeleri, boyutlandırılmaları ve işletilmeleri halinde şebeke hattı kayıplarının en aza indirilmesi, yük artışının karşılanması ve iletim-dağıtım şebekesi kapasitesine yapılacak yatırımın ertelenmesi gibi önemli avantajlar sağlayabilirler [6], [7]. Bu şebekeye son yıllarda dahil olan bileşenler: bahsedilen faydalarına rağmen, şebeke işletim koşulları üzerinde olumsuz etkilere neden olabilirler. Özellikle, rüzgar ve güneş kaynakları gibi YEK'lerden üretilen elektrik enerjisi kesintili, dalgalı ve genellikle büyük ölçüde hava koşullarına bağlıdır [8]. Sözün özü, Elektrikli araçlar, ESS'ler ve RES'ler gibi kesikli talep ve arzın artan bir şekilde dağıtım şebekesine dahil edilmesiyle, dağıtım şebekeleri daha karmaşık hale gelmekte ve gerilim ihlali sorunuyla sık sık karşılaşmaya eğilimli hale gelmektedir [9].

Sürekli devinim halinde olan dağıtım şebekelerinde meydana gelen gerilim ihlali sorunları; reaktif güç ayarlaması (dağıtım jeneratör eviricilerinin reaktif güç kapasitelerini), aktif güç ayarlaması (aktif güç kesintisi ve enerji depolama birimleri vasıtasıyla), Yük Altında Kademe Değiştiricisi (OLTC) kademe ("tap") pozisyonu ayarlaması, FACTS cihazlarının kullanımı, şönt kapasitör ve reaktör uygulamalarıyla

ortadan kaldırabilmektedir [10], [11] ve [12]. Bu çalışmada dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu için yeni metodolojiler sunulmuştur. İlk olarak, gerilim regülasyonu için OLTC tap pozisyonu ayarlamasını kolaylaştıran analitik ifade çıkartılmıştır ve bu analitik ifadeden faydalanarak analitik tabanlı metot geliştirilmiştir. İkinci olarak çıkartılan analitik ifade değiştirilerek gerilim profilini iyileştiren analitik tabanlı bir başka metot geliştirilmiştir. Üçüncü olarak ise de dağıtık jeneratörün eviricisinin reaktif güç çıkış ayarını gerilim regülasyonu için ayarlayan analitik tabanlı metot önerilmiştir. Son olarak da dağıtık jeneratörün reaktif güç ayarlaması ve OLTC tap pozisyonu ayarlamasını, gerilim regülasyonu için koordineli biçimde yapan algoritma önerilmiştir.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada temel olarak radyal dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonunu OLTC tap pozisyonu ayarlaması ve dağıtık jeneratör eviricisinin reaktif güç ayarlaması ile yapan, güvenilir ve sonuca hızlıca ulaşabilen yeni metotların geliştirilmesi ve böylece dağıtım şebekelerinde yüksek ve düşük gerilim problemlerinin üstesinden gelinmesi amaçlanmıştır. Bunun için ilk olarak OLTC tap pozisyonunu gerilim regülasyonu için ayarlayan analitik ifade temelli yeni metot ortaya konmuştur. Dahası, ileri sürülen analitik ifade ufak değişikliklerle yenilenerek, tap pozisyonu ayarlamasıyla gerilim profili iyileştiren bir diğer analitik temelli metot da elde edilmiştir.

Reaktif güç ayarlamasıyla gerilim regülasyonu gerçekleştirme amacına ulaşmak için, dağıtık jeneratörlerin eviricilerinin reaktif güç kapasitelerinden faydalanılarak gerilim regülasyonu yapmaya yarayan analitik temelli metot ortaya konmuştur. Ek olarak, OLTC ve dağıtık jeneratörü gerilim regülasyonu için koordine eden algoritma geliştirilmiştir. Metotlarda dağıtım şebekesinin radyal ve dengeli olduğu, yüklerin sabit güç çektiği, üretimlerin ve güçlerinin zamana bağlı değişmediği varsayılmıştır.

Son olarak metotların performansını göstermek adına, tüm ileri sürülen metotlar test sistemi üzerinde farklı durumlar için uygulanmıştır ve tüm çözüm-uzayını belli bir hassasiyet oranıyla tarayan Izgara Arama Algoritmasının (IAA) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

1.2. Tezin Bölümleri

OLTC tap pozisyonu ayarlaması ve evirici destekli reaktif güç ayarlamasıyla gerilim regülasyonu yapan çalışmaların incelendiği kısım, bu tezin ikinci bölümüdür. OLTC tap pozisyonu ayarlamasıyla gerilim regülasyonu yapan çalışmalarda kapsam olarak yalnızca OLTC tap pozisyonu ayarlaması uygulamalarını temel alınan çalışmalara odaklanılmıştır. Benzer şekilde reaktif güç ayarlaması yapan çalışmalar incelenirken de dağıtık jeneratörlerin invertörlerinin reaktif güç kapasitelerini kullanan çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise OLTC tap pozisyonu ayarlamasını, gerilim regülasyonu amacıyla, yapan analitik temelli metodun elde edilme adımları gösterilmiştir. Ek olarak, bu metodun geliştirilerek gerilim profili iyileştiren ifadenin türetilmesi basamakları da anlatılmıştır. Her iki ifade de test sistemi üzerinde değişik durumlar altında uygulanmıştır ve sonuçları doğruluğu kesin olan Izgara Arama Algoritması (IAA) sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümünde, dağıtık jeneratör eviricisinin reaktif güç çıkışı ayarlamasını, gerilim regülasyonu amacıyla, yapan analitik temelli metodun elde edilme adımları gösterilmiştir. Ek olarak, bu ifadenin gerilim ihlali problemlerine nasıl uygulanacağına karar veren algoritmanın da açıklaması yapılmıştır. Bu ifade, uygulama algoritmasına bağlı kalarak, test sistemi üzerinde, farklı durumlar altında uygulanmıştır ve sonuçları doğruluğu kesin olan IAA sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde, OLTC tap pozisyonu ve dağıtık jeneratörün reaktif güç ayarlamasını yapan algoritmik tabanlı koordineli gerilim regülasyonu gerçekleştiren metodun tanıtımı yapılmıştır. Ek olarak ileri sürülen bu algoritmik tabanlı metot, test sistemi üzerinde farklı durumları için uygulanmıştır ve elde edilen sonuçları IAA sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise tez çalışması özetlenmiştir ve ileriye yönelik çalışma önerileri yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu çalışmaları son yıllarda: dağıtık jeneratörlerin, enerji depolama birimlerinin, elektrikli araçlar vb. dinamik değişken güç tüketim ve üretim birimlerinin dağıtım şebekelerine entegrasyonu, daha önem kazanmıştır. Bu esnek belirsiz güç üretim ve tüketim komponentleri dağıtım şebekelerini gerilim işletim hususunda daha hassas hale getirmiştir ve bu yüzden ki çok fazla sayıda araştırmacı gerilim regülasyonu konusunda akademik çalışma yapmışlardır.

Literatür incelendiğinde gerilim regülasyonunun dağıtım şebekesine entegre komponentlerin aktif güç ayarlamasıyla, reaktif güç ayarlamasıyla veya gerilim regülasyonu cihazlarının ayarlanmasıyla yapıldığı görülür. Bu tez çalışmasında OLTC ile yapılan gerilim regülasyonu çalışmaları ve reaktif güç ayarlamasıyla yapılan gerilim regülasyonu (ağırlıklı olarak bu tez çalışmasının da konularından biri olduğu için dağıtık jeneratörlerin reaktif güç çıkışlarını ayarlayan) çalışmaları incelenmiştir.

2.1. OLTC ile İlgili Çalışmalar

Tezin bu bölümünde dağıtım şebekesinde gerilim regülasyonunu OLTC vasıtasıyla yapan yayınlar incelenmiştir. Geleneksel dağıtım şebekesi yapısında (YEK'lerin, enerji depolama birimlerinin, elektrikli araçlar gibi dinamik yüklerin vb. bulunmadığı dağıtım şebekelerinde), elektrik enerjisi merkezi üretim sistemlerinden yüklere doğru aktarılmaktaydı ve genellikle fider sonlarında düşük gerilim problemi meydana gelmekteydi [10]. Bu sebeple, gerilim regülasyonu için OLTC tap pozisyonu ayarlaması gerilim düşüm problemi engelleme prensibine göre yapılırdı [12]. Modernleşen dağıtım şebekesi yapısı dolayısıyla, artık OLTC tap pozisyonu ayarlaması hem düşük gerilim hem de yüksek gerilim probleminin ortadan kaldırılması için yapılmaktadır. Günümüzde dağıtım şebekelerinde çoğunlukla, gerilim regülasyonu sadece OLTC tap ayarlamasıyla değil: STATCOM, dağıtık jeneratörler vb. komponentlerin aktif veya reaktif güç ayarlamasıyla yapılmaktadır [13]. Bu kısımda ağırlıklı olarak, odak noktası gerilim regülasyonu için OLTC tap pozisyonu ayarlaması olan çalışmalara yer verilmiştir.

Robbins ve ark. çalışmasında yük altında tap değiştirebilen transformatörlerin tap pozisyonu ayarlaması için matris temelli tanımlanan optimal yük akışı probleminin

çözüm yöntemi sunulmuştur. Matris temelli tanımlama “Semidefinite program (SDP)” kullanılarak, Eşitlik 2.1’deki i . baradaki görünür güç enjeksiyonu ifadesine uygulanmasıyla yapılmıştır. Eşitlikteki \mathcal{H}_i “incidence” matrisidir.

$$S_i = V_i \sum_{k \in \mathcal{H}_i} [Y^*]_{ik} V_k^* \quad (2.1)$$

Bunun için ilk olarak transformatör sekonder gerilimi primer tarafa göreceli olarak yazılarak transformatörün sekonder tarafı sanal bir bara olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlama özetle Eşitlik 2.2.a’da verilmiştir. Sekonder taraf sanal bara olarak varsayılarak, Eşitlik 2.2.a’da sekonder tarafın gerilim kısıtı tap pozisyonuna bağlı biçimde (\underline{a} ve \bar{a} sırasıyla minimum ve maksimum tap pozisyonlarıdır) ifade edilmiştir. Ek olarak, 2.2.b’deki eşitlikteki; W “positive semidefinite matrix”dir, n bara sayısıdır ve r ise transformatör sayısıdır. Eşitlik 2.2.b’deki W ise amaç fonksiyonun matris temelli tanımlanmasında kullanılmaktadır ve sekonder tarafın sanal bara olarak ifade edilerek bu matrise entegre edilmesi de V_{st} değişkeni ile yapılmıştır.

$$\underline{a}^2 V_{pt}^2 \leq V_{st}^2 \leq \bar{a}^2 V_{pt}^2 \quad (2.2.a)$$

$$W = VV^H = \begin{bmatrix} V_1^2 & \cdots & V_1 V_{n+r}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_1^* V_{n+r} & \cdots & V_{n+r}^2 \end{bmatrix} \quad (2.2.b)$$

Eşitlik 2.1’deki ifade i . baradaki görünür güç enjeksiyonu formülüdür. Yukarıdaki kısımda bahsi geçen matris şekline dönüştürme mantığıyla (W matrisi ve SDP kullanımıyla), i . baradaki görünür güç enjeksiyonu matrisel olarak ifade edilmiştir ve Eşitlik 2.3’te verilmiştir.

$$S_i = Tr(H_i W) \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3’teki $H_i = Y^H E_i$ ’dir, $E_i = e_i e_i^T$ ’dir, e_i ise i . baraya tekabül eden sıra dışındaki, tüm satırların 0 olduğu vektördür (i . bara için ise değer 1’dir) ve Y ise admitans matrisidir. Bu eşitlikteki Tr : (“trace of matrice”) ismindeki işlem operatörüdür ve içine atılan matrisinin diyagonal elemanlarının toplamını alır. Benzer

mantıkla, i. baradan k. baraya akan görünür güç miktarını hesaplayan matrisel ifadesi elde edilmiştir ve Eşitlik 2.4'te verilmiştir.

$$S_{ik} = Tr(A_{ik}W) \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'teki $A_{ik} = -e_k^T Y^H e_i E_{ki}$ ve $E_{ik} = (e_i - e_k)e_i^T$ 'dir. Eşitlik 2.3 ve 2.4'te sırasıyla i. baradaki görünür güç enjeksiyonu ve i. baradan k. baraya akan görünür güç miktarı matrisel olarak ifade edildikten sonra, bu ifadeler amaç fonksiyonuna dahil edilerek, tap pozisyonu ayarlama problemi temelli hale getirilmiştir. Matrisel tanımlanarak konveks hale getirilen en uygun tap pozisyonu bulma optimizasyon problemi Eşitlik 2.5'te sunulmuştur.

$$\min_{W \geq 0, S_{ps'}} f_0(W) + \sum_i f_i \quad (2.5.a)$$

Şu şartlar altında:

$$Tr(\widetilde{H}_i W) - S_i = 0 \quad (2.5.b)$$

$$Tr(\widetilde{H}_{p_t} W) - S_{p_t} + S_{p_t s'_t} = 0 \quad (2.5.c)$$

$$Tr(\widetilde{H}_{s'_t} W) - S_{p_t s'_t} = 0 \quad (2.5.d)$$

$$\underline{V}^2 \leq [W]_{ii} \leq \bar{V}^2 \quad (2.5.e)$$

$$\underline{a}^2 [W]_{p_t p_t} \leq [W]_{s'_t s'_t} \leq \bar{a}^2 [W]_{p_t p_t} \quad (2.5.f)$$

Eşitlik 2.5.a amaç fonksiyonu (penaltı fonksiyonu f_i olarak dahil edilmiştir), Eşitlik 2.5.b ve Eşitlik 2.5.d arası görünür güç dengesi kısıtları ve son olarak, Eşitlik 2.5.e ve Eşitlik 2.5.f ise de bara gerilim (Eşitlik 2.5.f çalışmada oluşturulan sanal bara içindir) kısıtlarıdır. Robbins ve ark. çalışmasında analizlerde amaç fonksiyonu (f_0) aktif güç kaybının azaltılması olarak belirlenmiştir ve penaltı fonksiyonları olarak dağıtım şebekesindeki toplam tüketimi, gerilim sapması endeks değeri ve baralara enjekte edilen reaktif güç miktarı tanımlanmıştır. Matrisel olarak tanımlanan ve konveks hale getirilen amaç fonksiyonu yardımıyla, aktif güç kaybını minimize eden

optimal tap pozisyonu “alternating direction method of multipliers” algoritması ile bulunmuştur. Bulunan tap pozisyonu problem çözümünün konveks olarak tanımlanmasından kaynaklı tam sayı değildir ancak, transformatörün tap pozisyonu tam sayı olmalıdır. Bu durum, yalnızca matematiksel bulunan tap pozisyonun değerinin, $\underline{a} - \bar{a}$ aralığında en yakın tap pozisyonuna yuvarlanmasıyla giderilmiştir [14].

Lu ve ark. çalışmasında OLTC tap pozisyonu ayarlaması çoklu amaç fonksiyonu anlayışıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada uygulanan amaç fonksiyonunda dağıtım şebekesinde aktif güç kaybı, gerilim sapsması minimizasyonu yapılmıştır ve beraberinde gerilim aşmaları (iyileştirilecek üst ve alt gerilim limitleri baz alınarak) penaltı fonksiyonu olarak tanımlanarak gerilim regülasyonu sağlanmıştır. Amaç fonksiyonu Eşitlik 2.6.a ve Eşitlik 2.6.c arasında verilmiştir. Çalışmada bara gerilimleri, bara akımları ve yük akış eşitlikleri (aktif güç, reaktif güç dengesi için) kısıtlar olarak optimizasyon problemine dahil edilmiştir.

$$\min f \quad \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 \quad (2.6.a)$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{t=1}^{N_t} P_{i,t} \quad (2.6.b)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{t=1}^{N_t} (u_{i,t} - u_b)^2 \quad (2.6.c)$$

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{t=1}^{N_t} (u_{upper,i,t}^+ - u_{lower,i,t}^-)^2 \quad (2.6.d)$$

Eşitlik 2.6’daki α_1 , α_2 ve α_3 ’ler amaç fonksiyonundaki ağırlık katsayılarıdır, $P_{i,t}$ i. baradaki t anındaki aktif güç enjeksiyon miktarıdır, benzer şekilde $u_{i,t}$ i. bar t anındaki gerilimdir, u_b referans gerilimdir ve son olarak, $u_{upper,i,t}^+$ ve $u_{lower,i,t}^-$ sırasıyla i. barada t zamanında gerilim işletim üst sınırının üzerinde olan ve gerilim işletim alt sınırının altında olan gerilim değerinin karesidir. OLTC modeli is “0-1 variable” metodu ile lineerleştirilmiştir. Bu lineerleştirmeye ek olarak, yeni kısıt ve değişkenlerin tanımlanmasıyla konveks olmayan çoklu amaçlı optimizasyon problemi

“mixed integer second-order cone programming (SOCP)” problemine evrilmiştir ve daha kolay hale getirilerek optimizasyon problemi çözülmüştür. İleri sürülen bu metot sayesinde en uygun OLTC tap pozisyonuna, literatürdeki çözüme göre daha hızlı şekilde çözüme ulaşılmıştır, daha iyi çoklu amaç optimizasyon problemi çözüm performansı elde edilmiştir ve gerilim profili başarılı şekilde iyileştirilmiştir [15].

Wu ve ark. çalışmasında optimal tap pozisyonunu bulma problemi, dağıtım şebekesinde minimum aktif güç kaybını sağlamak için (amaç fonksiyonu), OLTC tap pozisyonu değişiminin probleme lineer hale getirilerek dahil edilmesiyle çözülmüştür. Yük akışı kısıtları SOCP yöntemiyle konveks kısıtlar haline getirilmiştir. OLTC tap pozisyonuna ait kısıtlar ise “Large M” metodu yardımıyla karışık tam sayılı doğrusal ifadelere dönüştürülmüştür. Dönüştürülmüş OLTC kısıt ifadeleri Eşitlik 2.7.a ve Eşitlik 2.7.g arasında verilmiştir.

$$\sum_{n=0}^{N_{ij}} 2^n \lambda_{ij,n} \leq K_{ij} \quad (2.7.a)$$

$$m_{ij} = t_{ij}^{\min} U_j + \Delta t_{ij} \sum_{n=0}^{N_{ij}} 2^n x_{ij,n} \quad (2.7.b)$$

$$0 \leq U_j - x_{ij,n} \leq (1 - x_{ij,n})M \quad (2.7.c)$$

$$0 \leq x_{ij,n} \leq \lambda_{ij,n}M \quad (2.7.d)$$

$$U_{jt} = t_{ij}^{\min} m_{ij} + \Delta t_{ij} \sum_{n=0}^{N_{ij}} 2^n y_{ij,n} \quad (2.7.e)$$

$$0 \leq m_{ij} - y_{ij,n} \leq (1 - x_{ij,n})M \quad (2.7.f)$$

$$0 \leq y_{ij,n} \leq \lambda_{ij,n}M \quad (2.7.g)$$

Eşitlik 2.7.a-Eşitlik 2.7.g’ deki kısıt kümesinde parametrelinin açıklaması şu şekildedir; K_{ij} : i. ve j. bara arasındaki OLTC’nin toplam tap pozisyon sayısıdır, t_{ij}^{\min} : minimum tap pozisyonu, Δt_{ij} : bir tap pozisyonu değişimine denk gelen dönmüşüm oranı değişimi, $\lambda_{ij,n}$ ikili sayı sisteminde tanımlanmış değişken, N_{ij} : toplam tap pozisyonu sayısı olan K_{ij} ’nin ikili sayı sisteminde gösteriminin uzunluğudur, $m_{ij} =$

$\Delta t_{ij} U_j$ 'dir, $x_{ij,n} = \lambda_{ij,n} U_j$ 'dir, $U_{jt} = t_{ij} m_{ij}$ 'dir, $y_{ij,t} = \lambda_{ij,n} m_{ij}$ 'dir, U_j ve U_{jt} ise j. ve m. baradaki gerilim değerinin büyüklüğünün karesidir, son olarak M pozitif büyük bir sayıdır ("Large M" metodu uygulanması için). Özetle, Wu ve ark. ikili sistem sayı sisteminde tanımlanan değişkenlerle ve "Big M" metodu kullanılarak doğrusal olmayan transformatör modelini doğrusal hale getirmişlerdir. Ek olarak çalışmalarında ortaya koydukları model sayesinde, OLTC tap pozisyonu sayısının artışında bile, çözüm süresi önemli ölçüde artış göstermeyerek, diğer metotlara ise çözüm süresi önemli ölçüde artış görülmüştür, hızlı çözüm imkânı sunmuştur. Son olarak, önerilen metodu kesin ve optimal çözüm verdiği belirtilmiştir [16].

OLTC'nin lineer modellemesi yapılan bir diğer çalışma, Li ve ark. gerçekleştirdiği çalışmadır. Bunun için ilk olarak, tap pozisyon operasyonu, empedans değişimi olarak (ΔZ): admitans matrisinde tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar Eşitlik 2.8.a ve Eşitlik 2.9.c arasında verilmiştir. OLTC i. ve j. baralar arasında devreye entegre edilmiştir.

$$Y_{ii} = \frac{a^2}{z_T} + \sum_{k \neq j} \frac{1}{z_{ik}} \quad (2.8.a)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -\frac{a}{z_T} \quad (2.8.b)$$

$$Y_{jj} = \frac{1}{z_T} + \sum_{k \neq i} \frac{1}{z_{jk}} \quad (2.8.c)$$

Eşitlik 2.8 kümesindeki z_T : transformatörün eşdeğer empedans değeridir, z_{ik} ise $k \neq i$ iken: i. bara ve k. bara arasındaki empedans değeridir, z_{ii} ise i. baradan toprağa giden hattaki empedans değeridir. Eşitlik 2.8.a, a^2 (a: tap pozisyonu değişkeni) parametresinden dolayı lineer olamamaktadır. Örneğin tap pozisyonu a_0 dan a konumuna geldiğinde admitans matrisindeki değişim şu şekilde olur: $\Delta Y_{ii} = \frac{(a^2 - a_0^2)}{z_T}$.

Bu lineer olmama durumu, a^2 'nin a_0 etrafında Taylor serisinin açılmasıyla giderilmiştir. Taylor serisi açılımından sonra admitans matrisindeki değişim şu biçimde olmaktadır: $\Delta Y_{ii} = \frac{(2aa_0 - 2a_0^2)}{z_T}$ ve artık tap pozisyonu değişimine lineer bağımlı hale getirilmiştir. Çalışmada analizler gerçek bir dağıtım şebekesi üzerinde yük ve PV üretim tahminleri verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerdeki kullanılan amaç fonksiyonu gerilim sapmasını ve toplam tap pozisyonu hareket

sayısını minimize etmektedir. Dağıtım şebekesinde bulunan 4 tane OLTC koordineli bir biçimde optimal tap kontrol (OTC) işlemine katılmışlardır. Bu koordinasyon OLTC tap değişim durumuna duyarlılık analizi sonucuyla karar verilmesiyle sağlanmıştır. OTC sayesinde otonom tap pozisyonu ayarlamaya göre daha az sayıda tap pozisyonu değişimiyle gerilim sapsması azaltılmıştır ve PV penetrasyonu önemli ölçüde arttırılmıştır [17].

Optimizasyon temelli çalışmaların yanında öğrenme temelli yöntemle gerilim regülasyonu, literatürdeki çalışmalara konu olmuştur. Bu çalışmalardan biri Xu ve ark. çalışmasıdır ve bu çalışma yalnızca öğrenme temelli yaklaşımla OLTC tap pozisyonu ayarlaması yapmaktadır. Bu çalışmada en uygun tap pozisyonu bulma problemi “Markov Decision Problem” (MDP) şeklinde, gerilim sapsmasını minimize etmek amacıyla, modellenmiştir. Tanımlanan MDP ise de “Reinforcement Learning” algoritmalarından olan “least squares policy iteration” metodu ile çözülmüştür [18].

OLTC tap pozisyonu ayarlaması otomatik kontrol cihazları vasıtasıyla da yapılabilmektedir. Bu cihazlardan sıklıkla kullanılanlardan biri olan “Automatic Voltage Control Relay (AVCR)” isimli, kontrol algoritmasına temeline göre çalışan cihazdır (bir çeşit tetik mekanizması gibi). Salman ve ark. çalışmasında dağıtım şebekesinde bulunan AVCR için “Fuzzy logic controller” temeline dayanan (“if/then” mantığına sahip) dizayn önerilmiştir. Bu sayede gerilim sapsması nominal gerilimin %2’sini aştığı zaman AVCR, OLTC’ye tap pozisyonu ayarlaması için sinyal göndermektedir ve bara gerilimleri istenen aralıkta tutulmaktadır [19].

Bu bölümde yalnızca literatürde OLTC tap pozisyonu ayarlaması konusuna odaklanan çalışmaların özet bilgileri içeren Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: OLTC tap pozisyonuyla yapılan gerilim regülasyon çalışmaları.

Yazarlar	Amaç	OLTC modeli	Metot
Robbins ve ark. [14]	<ul style="list-style-type: none"> Aktif güç kaybının minimizasyonu 	Lineerleştirme	“Alternating direction method of multipliers”
Lu ve ark. [15]	<ul style="list-style-type: none"> Aktif güç kaybı minimizasyonu Gerilim sapması minimizasyonu Gerilim aşımalarının engellenmesi 	Lineerleştirme	SOCP çözüm mantığıyla
Wu ve ark. [16]	<ul style="list-style-type: none"> Aktif güç kaybının minimizasyonu 	Lineerleştirme	SOCP çözüm mantığıyla
Li ve ark. [17]	<ul style="list-style-type: none"> Aktif güç kaybının minimizasyonu Tap pozisyonu değişim sayısını azaltma 	<ul style="list-style-type: none"> Lineerleştirme OLTC’ler arasında koordinasyon 	OTC yöntemi ve konveks optimizasyon problemi çözümü yaklaşımıyla
Xu ve ark. [18]	<ul style="list-style-type: none"> Gerilim sapmasını minimize etmek 	-	MDP yaklaşımıyla öğrenme temelli çözüm
Salman ve ark. [19]	<ul style="list-style-type: none"> Bara gerilimlerini belli bir aralıkta tutmak 	-	“Fuzzy Logic” kontrolcü temelli AVC röle cihazıyla OLTC kontrolü

Özetle, literatürde yalnızca OLTC tap pozisyonu ayarlamaya odaklı kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Çalışmaların genelinde gerilim regülasyonu: aktif güç için ve/veya beraberinde gerilim sapması ve/veya tap pozisyonu hareket sayısını azaltması için, tekli veya çoklu amaç fonksiyonu çözme yaklaşımıyla, yapılmaktadır. Tablodaki çalışmaların dördünde OLTC optimizasyon problemine lineerleştirilerek dahil edilmiştir ve optimizasyon problemi konveksleştirilerek daha kolay ve hızlı çözülebilir hale getirilmiştir. Ek olarak, öğrenme temelli yaklaşımla herhangi bir optimizasyon problemi çözmeye ihtiyaç duyulmadan tap pozisyonu ayarlaması da yapılmıştır. Bu sayede çözüme kısa sürede ulaşılabilmektedir, ancak öğrenme aşaması için fazlaca veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Son olarak amaca uygun tap pozisyonu ayarlaması gerilim kontrolü cihaz (AVC röle) yardımıyla da yapıldığı görülmüştür.

2.2. Gerilim Regülasyonu: Reaktif Güç Ayarlaması Yardımıyla

Literatürde gerilim regülasyonu için geliştirilen metotlar incelendiğinde, başvurulan metodolojinin iki ana başlığa ayrılacağı görülür. Bu ana iki metot sırasıyla aktif güç ayarlaması ve reaktif güç ayarlamasıdır [9]. Aktif güç kesintisi [20] ve batarya enerji depolama sistemleri uygulamaları [21], aktif güç ayarlama temelli gerilim regülasyonu çalışmaları kapsamında, genelde kullanılan tekniklerden ikisidir [22]. Aktif güç kesintisi uygulaması (yenilenebilir enerji üretim sistemlerinde) dağıtım sisteminde meydana getireceği ekonomik ve enerji verimliliği kaybı sebebiyle dağıtım

şebekesi işletmecileri tarafından tercih edilmezler [23]. Bu yüzden reaktif güç üretim enjeksiyon/emilim yeteneğine sahip cihazlar (VAr kompansatörler, kapasitör bankları vb.) veya sistemler kullanılarak reaktif güç ayarlaması yapılarak, aktif güçten feragat etmeden, gerilim regülasyonu yapmak daha avantajlı olabilmektedir [24]. YEK'lerin evircilerinin reaktif güç kapasiteleri kullanılarak YEK'leri gerilim regülasyonuna dahil etmek etkili yöntemlerden biridir [25]. Bu kısımda evirici destekli YEK'lerin reaktif güç ayarlaması yaparak gerilim regülasyonu yapan çalışmalar incelenmiştir. Bu inceleme üç ana başlık altında yapılmıştır bunlar sırasıyla şu şekildedir; merkezi, merkezi olmayan otonom ve merkezi olmayan koordineli kontrol stratejisine dayalı çalışmalar [26].

Merkezi kontrol yaklaşımında, dağıtım şebekesinin diğer bileşenlerinin durumu hakkında gerekli bilgiler merkezi kontrol ünitesinde toplanır. Bu merkezi kontrol ünitesi, gerilim regülasyonu için tüm sistem üzerinde karar alır [27]. Merkezi kontrol sistemlerinin olumsuz tarafları olarak; hızlı yanıt veren iletişim altyapısı gereksinimi ve dağıtım şebekelerinde pratik uygulama çözüm sürecini ağırlaştırma olarak ifade edilebilir [28]. Merkezi kontrol yaklaşımıyla, Şönt reaktör, şönt kapasitör, evirciler (dağıtık jeneratörlere entegre edilmiş) ve voltaj regülatörleri gibi cihazlar, voltaj sapmalarını en aza indirerek dağıtık jeneratörlerin, dinamik yüklerin vb. komponentlerin gerilim profili üzerinde oluşturabileceği negatif etkileri azaltmak için tek merkezden koordine edilir [29]. Bu merkezi çalışmalardan biri Ji ve ark. çalışmasıdır. Bu çalışmada, gerilim regülasyonu amacıyla aktif ve reaktif güç ayarlaması tek merkezden yapılmıştır. Öncelikle dağıtık jeneratörler için Q-V ve P-V eğrileri matematiksel olarak "piecewise linearization" yöntemiyle elde edilmiştir. Sonra bu matematiksel ifadeler yardımıyla dağıtık jeneratörlerin reaktif güç çıkış miktarları ve aktif güç kesinti (AGK) miktarları; gerilim sapmasını, aktif güç kaybını ve aktif güç kesintisini minimize etmek için ayarlanır (SOCP çözücüsü yardımıyla) [30]. Diğer bir merkezi kontrol temelli çalışmada ise evirici tabanlı PV'nin reaktif güç çıkış değeri V-Q (gerilim-reaktif güç) duyarlılık katsayısı tekniğine dayalı ayarlanmaktadır. Eğer reaktif güç ayarlaması yeterli değilse; V-P (gerilim-aktif güç) duyarlılık katsayısı tekniğine dayalı olarak, PV için AGK gerçekleştirilmektedir. Duyarlılık katsayısı tekniğinden lineer olmayan optimizasyona problemi lineerleştirilmektedir. Çalışmadaki ana amaç minimum reaktif güç enjeksiyonu/emilimi ve AGK yaparak, bara gerilimlerini istenen aralıkta tutmaktır [31]. OLTC ve dağıtık jeneratörlerin koordinasyonu [32]'te gerilim regülasyonu için

önerilmiştir, dağıtık jeneratörlerin reaktif güç çıkışları ve OLTC kademe konumu merkezi kontrol sistemi tarafından, bara gerilimlerini istenen aralıkta tutmak için ayarlanır. Bir diğer çalışmada ise [32]'de olduğu gibi dağıtık jeneratörlerin reaktif güç çıkış değerleri, AGK ve OLTC tap pozisyonu aktif güç kaybından ve AGK'den meydana gelen parasal kayıpları minimize ederek gerilim regülasyonu yapılması için merkezi kontrol yaklaşımıyla ayarlanmıştır [33].

Başka bir merkezi kontrol temelli çalışmada, amaç fonksiyonunda farklılaşmaya gidilerek: PV eviricilerinin dağıtım şebekesine reaktif güç desteği sağlarken oluşan kayıplarından ötürü meydana gelen parasal kaybın azaltılması ve aktif güç kaybından kaynaklanan maddi kaybın azaltılması amaç fonksiyonuna beraber dahil edilerek, bara gerilim sapma değerleri belli bir referans değerine göre minimize edilmişlerdir [34]. Ek olarak reaktif güç ayarlamasıyla gerilim regülasyonu yapan merkezi kontrol stratejisine sahip çalışma modeli mikro şebekeye de uygulanmıştır. Bu çalışmada şebekeye bağlı enerji depolama sistemleri sayesinde aktif güç desteği ve dağıtık jeneratörler tarafından reaktif güç desteği, gerilim sapması ve şebeke kayıpları azaltmak için, sağlanmıştır. Aktif ve reaktif güç ayar değerleri “master-slave” yapısındaki kontrol mekanizması tarafından, herhangi bir çözüm modelinden bağımsız olarak merkezi yaklaşımla elde edilmiştir [35]. Taipa ve ark. çalışmasında aktif güç kayıplarını minimize etmek için rüzgâr türbinlerinin reaktif güç çıkış değerlerine merkezi kontrol birimi tarafından karar verilmişti. Rüzgar türbinlerinin reaktif güç ayar değerleri ise PI kontrolcüsü tarafından güç faktörü kontrolü prensibine göre ayarlanmıştır [36].

Tablo 2.2: Reaktif güç ayarlamasıyla yapılan, merkezi kontrol stratejisine dayalı gerilim regülasyon çalışmaları.

Yazarlar	Amaç	Gerilim regülasyonu tekniği	Metot
Ji ve ark. [30]	<ul style="list-style-type: none"> Gerilim sapması minimizasyonu Aktif güç kaybı minimizasyonu Aktif güç kesintisi azaltılması 	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç kesintisi	Mixed integer SOCP
Silva ve ark. [31]	<ul style="list-style-type: none"> Minimum reaktif enjeksiyonu veya emilimi Minimum AGK Bara gerilimlerini işletme kısırları içinde tutma 	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç kesintisi	Lineer optimizasyon çözümü
Bignucolo ve ark. [32]	<ul style="list-style-type: none"> Bara gerilimlerini işletme kısırları içinde tutma 	Reaktif güç ayarlaması OLTC tap pozisyonu ayarlaması	“The distribution management system coordinated controller (DMSCC)” sistemi önerilmiştir
Kulama ve ark. [33]	<ul style="list-style-type: none"> Aktif güç kaybindan doğan parasal maliyetin minimizasyonu AGK’den meydana gelen parasal kaybı minimize etmek 	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç kesintisi	Matlab’deki “fmincom” optimizasyon çözümü
Cagnano ve ark. [34]	<ul style="list-style-type: none"> Aktif güç kaybindan doğan parasal maliyetin minimizasyonu Reaktif güç desteği sağlarken oluşan kayıplardan ötürü meydana gelen parasal kaybın azaltılması 	Reaktif güç ayarlaması	Kısıtlı dinamik optimizasyon problemi çözümü
Caldognetto ve ark. [35]	<ul style="list-style-type: none"> Gerilim sapması minimizasyonu Aktif güç kaybı minimizasyonu 	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç ayarlaması	“Mater slave” kontrol tekniği
Tapia ve ark. [36]	<ul style="list-style-type: none"> Aktif güç kaybı minimizasyonu 	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç ayarlaması	Güç faktörü kontrolü (PI kontrolcüsüyle)

Merkezi kontrol stratejisine ek olarak, merkezi olmayan otonom kontrol (DAC) stratejisine dayalı gerilim regülasyonu uygulamaları da bara gerilimlerini lokal probleme karşı istenen şekilde regüle edebilme kapasitesine sahiptirler. DAC kontrol stratejisinde, gerilim regülasyonu için kullanılacak aygıtların ayar değerleri (jeneratör barasının gerilimi, anahtarlı kapasitör, transformatörün tap pozisyonu vb.) lokal bilgilere göre ayarlanır ve bu ayarlama işlemi otonom biçimde yapılır [37]. Otonom kontrol prensibine sahip olan [38]’de herhangi bir aktif güç kesintisine ve OLTC tap pozisyonu ayarlamasına ihtiyaç olmadan PV eviricilerinin reaktif güç çıkışları ayarlanarak (çalışmada önerilen analitik temelli reaktif güç dağıtım yöntemiyle) gerilim sapması minimizasyonu sağlanmıştır. Shahin ve ark. çalışmasında [38]’de olduğu gibi, reaktif güç kompanzasyonu evirici tabanlı PV’lerin reaktif güç çıkışlarının otonom biçimde ayarlanmasıyla yapılmıştır [39]. Bu sayede gerilim sapması minimize edilmiştir ve PV barındırma kapasitesi artırılmıştır. DAC yaklaşımıyla yapılmış Wang ve ark. çalışmasında, eviricilerin VAr kapasiteleri gerilim dalgalanmalarını minimize etmek ve gerilim limit aşım problemlerini çözmek için kullanılmıştır. Ek olarak OLTC tap pozisyonu da, VAr kapasitesinin yeterli olmadığı

durumlarda ayarlanmıştır [40]. Bir diğer DAC temelli çalışma da ise yüksek-gerilim/düşük gerilim transformatörünün tap pozisyonu, dağıtık jeneratörün ve kapasitörün reaktif güç enjeksiyonu/emilimini ve esnek AC iletim sistemlerinin (FACSTs) ayarlamaları, gerilim profilinin iyileştirilmesi ve aktif güç kaybının azaltılması için yapılmıştır. Çalışmada otonom kontrol için: “Distributed fuzzy inference system” (dağıtık bulanık müdahale sistemi) önerilmiştir [41].

[42]'de mikro-şebekeler (MGs) hem aktif hem reaktif güç enjeksiyon kapasiteleriyle gerilim kontrolü yan hizmetine katılarak, gerilim regülasyonu otonom olarak yapılmıştır. MG'lerin katılımı çoklu ajan sistemi (multi-agent system MAS) ile sağlanmıştır. Çalışmada, üst seviye katılımcı olan DN operatörü ile alt seviye katılımcı olan MG'ler arasında iki seviyeli bir oyun şeması önerilmiştir. Oyuna üst düzey katılımcı olan dağıtım şebekesi operatörü, Stackelberg oyununa dayanan makul bir teşvik mekanizması ortaya koymaktadır. Alt seviyede, MG'lerin nihai kararları, MG'ler arasında statik oyun modelinin uygulanmasıyla otonom olarak elde edilir [42]. MAS'dan faydalanan bir diğer çalışmada Wang ve arkadaşlarının beraberinde derin takviyeli öğrenme (Deep Reinforcement Learning DRL) tekniğinden de faydalandığı çalışmadır [43]. Tüm MAS yapısı 3 bölüme ayrılmıştır ve bu çoklu bölmeli MAS ile otonom gerilim kontrolü yapılmıştır, ancak yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak yalnızca aktif güç ayarlaması yapılarak. Bu üç bölmede bulunan jeneratörlerin aktif güç çıkışı, diğer bara gerilimlerini sınırlar içinde tutmak için ayarlanmıştır. DRL ajanlarının öğrenmeleri merkezi olarak gerçekleştirmiştir ve iyi eğitilmiş DRL ajanları sadece yerel ölçümleri kullanarak otonom voltaj kontrol stratejisi ile voltaj regülasyonu sağlar. DAC temeline dayalı reaktif güç ayarlaması yapan çalışmalar (yalnızca bir adet aktif güç ayarlaması yapan çalışma örnek olarak değinilmiştir) özet olarak Tablo 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 2.3: Reaktif güç ayarlamasıyla yapılan, DAC stratejisine dayalı gerilim regülasyon çalışmaları.

Yazarlar	Amaç	Gerilim regülasyonu tekniği	Metot
Reshikeshan ve ark. [38]	• Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması	Önerilen analitik ve tekrara dayanan metot
Shahin ve ark. [39]	• Gerilim sapması minimizasyonu • PV barındırma kapasitesini artırma	Reaktif güç ayarlaması	“Volt/VAr Droop control” metodu
Wang ve ark. [40]	• Gerilim dalgalanmalarını minimize etmek • Gerilim limit aşım problemlerini çözmek	Reaktif güç ayarlaması OLTC tap ayarlaması	Dağıtık gerilim kontrolü
Vaccaro ve ark. [41]	• Gerilim profili iyileştirilmesi • Aktif güç kaybı minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması OLTC tap ayarlaması FACSTs ayarlanması	”Distributed fuzzy inference system”
Wang ve ark. [42]	• Bara gerilimlerini işletme kısırları içinde tutma	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç ayarlaması	“Bi-level game”(İki seviyeli oyun)
Wang ve ark. [43]	• Gerilim sapması minimizasyonu • Gerilim profili iyileştirilmesi	Aktif güç ayarlaması	Markov oyunu Derin öğrenme

Son olarak merkezi olmayan koordineli gerilim regülasyon çalışmaları incelenmiştir. Bu kontrol stratejisinde dağıtık jeneratörler, diğer dağıtık jeneratörlerle ve gerilim regülasyonuna dahil olan komponentlerle iletişime geçerler [44]. Bu çalışmalardan biridir ve dağıtık-PV eviricilerinin reaktif güç kapasiteleri gerilim sapması minimizasyonu amacıyla koordine edilerek, VAr/Volt kontrolü (lineer programlama yardımıyla) yapılmıştır [44]. Enerji depolama birimlerinin gerilim regülasyonuna dahil edildiği merkezi olmayan koordineli kontrol stratejisini temel alan çalışmalara, [45], [46] ve [47]’ler örnek gösterilebilir. [45] ve [46]’da enerji depolama birimleri tarafından sağlanan aktif güç desteği ve dağıtık jeneratörler tarafından sağlanan reaktif güç desteğinden faydalanmak için “Model Predictive Control (MPC)” yöntemi önerilmiştir. [47]’de ise LTC ile tap pozisyonu ayarlaması, SVR ve şönt kapasitörler ile reaktif güç desteği ve enerji depolama birimleriyle de aktif güç desteği gerilim sapması ve aktif güç kaybı minimizasyonu için, koordineli biçimde, yapılmıştır. İlgili komponentlerin optimum ayar değerleri “Evolutionary Algorithm (EA) ve “Particle Swarm Optimization (PSO) kullanılarak bulunmuştur. PV eviricilerinin reaktif güçlerinin koordineli ayarlamasına OLTC tap pozisyonu ayarlamasının eşlik ettiği çalışmalar olarak; [48] ve [49] örnek gösterilebilir.

Bir diğer çalışmada, esnek bir elektronik cihaz (flexible electronic device) olan yumuşak açık nokta (Soft Open Point, (SOP)), hızlı tepkili gerilim regülasyonu sağlamak için sürekli bir reaktif güç kaynağı olarak kullanılır. SOP'nin kapasitör banklarıyla koordinasyonu ve OLTC'nin koordineli gerilim kontrol bileşenlerine eşlik etmesi ile işletme maliyeti en aza indirilir ve optimizasyon probleminin SOCP modeli

olarak basitleştirilerek formüle edilmesiyle bara gerilimleri istenen sınırlarda tutulur [50]. [51]'deki çalışmada MAS, aktif güç kaybını azaltmak, ortalama gerilim sapmasını en aza indirmek ve DG baralarının gerilimini istenen değerlere ayarlamak için gerilim düzenlemesine katılan akıllı ajanlar (dağıtık jeneratörlerden veya kapasitör bankalarından vb. sorumlu ajanlar) arasında bilgi alışverişi ve koordinasyon sağlamak için kullanılmaktadır. Ek olarak, [52]'de DG'lerin aktif ve reaktif güç çıkışlarını ve OLTC'yi koordine etmek için MAS uygulanmıştır. Fider kontrol bölümü (FCS) ajanları dağıtık jeneratörlerin aktif ve reaktif güçlerini belirlemek için atanmıştır. Benzer şekilde, her bir fider üzerinde kontrol yetkisine sahip ajan OLTC'ye atanır. Her bir FCS ajanı, kendi sorumlu olduğu dağıtık jeneratörlerin reaktif ve aktif güç çıkışına göre, gerilim sapma ifadesini matematiksel olarak eğri uydurma tekniği kullanarak elde eder (gerekli yük akış analizi sonuçlarını kullanarak). İstenen bara gerilimlerine yalnızca reaktif güç ayarlamasıyla ulaşılamaması durumunda, FCS ajanı OLTC ajanına arıza mesajı gönderir ve bara gerilimlerini ayarlamak için OLTC'nin kademe konumunu değiştirir.

Koordineli gerilim regülasyonu uygulamalarında derin öğrenme temelli tekniklerden de faydalanılmıştır. Bunlardan biri [22]'dir ve bu çalışmada çoklu-ajan derin takviyeli öğrenme yaklaşımı (MADRL) ile dağıtık PV eviricilerinin reaktif güç kapasitesinin koordinasyonu gerçekleştirilmiştir. Eğitilmiş ajanlar, optimizasyon problemini çözmeye gerek kalmadan, gerçek zamanlı olarak voltaj regülasyonu için koordineli voltaj stratejisi sağlar. [22]'de olduğu gibi, SVC'lerin ve PV eviricilerin koordinasyonu için MADRL yöntemini yazarlar [53]'de kullanmışlardır, bu çalışmada yazarlar dağıtım şebekesindeki her bir alt ağa atanan ajanlara, gerilim regülasyonu için PV eviricilerinin ve SVC'lerin reaktif gücünü koordineli olarak ayarlama eğitimini vererek uygulamaktadırlar.

Tablo 2.4: Reaktif güç ayarlamasıyla yapılan, merkezi olmayan koordineli kontrol stratejisine dayalı gerilim regülasyon çalışmaları.

Yazarlar	Amaç	Gerilim regülasyonu tekniği	Metot
Rabih ve ark. [44]	• Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması	Lineer programlama
Wang ve ark. [45]	• Bara gerilimlerini işletme kısırları içinde tutma • Elektrikli araç şarj gücü sapması minimizasyonu • PV inverterlerden gelen reaktif güç desteği	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç ayarlaması	MPC
Feng ve ark. [46]	• Aktif güç kaybı minimizasyonu • Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç ayarlaması	SCOP
Aryanezhad ve ark. [47]	• Aktif güç kaybı minimizasyonu • Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç ayarlaması LTC tap ayarlaması	EA ve PSO
Ammar ve ark. [48]	• Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması OLTC tap ayarlaması	“The interior-point optimization algorithm”
Jafari ve ark. [49]	• Bara gerilimlerini işletme kısırları içinde tutma	Reaktif güç ayarlaması OLTC tap ayarlaması	Merkezi olmayan kontrol planı
Li ve ark. [50]	• Bara gerilimlerini işletme kısırları içinde tutma • İşletme maliyetini minimize etmek	Reaktif güç ayarlaması OLTC tap ayarlaması SOP	SOCP
Andreotti ve ark. [51]	• Aktif güç kaybı minimizasyonu • Gerilim sapması minimizasyonu • Dağıtık jeneratör baralarının gerilimini istenen değerlere ayarlamak	Reaktif güç ayarlaması OLTC tap ayarlaması	Dinamik MAS
Wu ve ark. [52]	• Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması Aktif güç ayarlaması OLTC tap ayarlaması	MAS
Cao ve ark. [22]	• Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması	MADRL
Cao ve ark. [53]	• Gerilim sapması minimizasyonu	Reaktif güç ayarlaması	MADRL

Özetle, Tablo 2.4 incelendiğinde literatürde reaktif güç ayarlamasıyla yapılan koordineli gerilim regülasyonu çalışmalarının tek veya çok amaçlı amaç fonksiyonu temelinde uygulandığı görülür. Reaktif güç ayarlamasına bazı çalışmalarda, aktif güç ayarlaması ve/veya diğer gerilim regülasyon cihazlarının kullanımının eşlik ettiği görülmüştür. Koordineli gerilim regülasyonu stratejisinde iletişim alt yapısı gerekliliği merkezi kontrol stratejine göre daha basit düzeydedir, çünkü koordineli gerilim regülasyonu lokal sistem bilgilerine ihtiyaç duyar. Tablo 2.4’ten görüleceği üzere, çalışmalarda tanımlanan optimizasyon problemi konveksleştirilerek, daha basit hale getirilip çözülmüştür, lineer olmayan optimizasyon çözüm algoritmalarından faydalanılmıştır ve son olarak öğrenme temelli çözüm yöntemi uygulanmıştır.

3. OLTC İLE GERİLİM REGÜLASYON METODOLOJİSİ

Tez çalışmasının bu bölümünde ilk olarak, gerilim regülasyonu ve gerilim profilini iyileştirmek için OLTC kademe pozisyonunu ayarlamaya yardımcı olan analitik ifade çıkartılmıştır. Bu analitik ifade ile gerilim regülasyonu için OLTC tap pozisyonunu ayarlayan eğri uydurma tekniğine dayalı metodun tanıtımı yapılmıştır. Metot test sisteminde uygulanarak, doğruluğu ortaya konulmuştur. İkinci olarak, OLTC tap pozisyonunu gerilim profili iyileştirmek için önerilen metot sunulmuştur. Benzer şekilde, bu metotta test sistemi üzerinde uygulanarak, etkinliği ortaya konmuştur.

3.1. Analitik İfade ve OLTC ile Gerilim Regülasyonu

Bu bölümün ilk kısmında, radyal dağıtım şebekelerinde bara gerilim saplamalarını bulan ifadenin elde edilme adımları gösterilmiştir. Dağıtım şebekelerinde hat akımları, baradan çekilen akımların fonksiyonları olarak yazılabilirler. Teng ve arkadaşlarının çalışmasında, dağıtım şebekelerinin topolojik yapısını temel alınarak, hat akımlarını ve bara gerilimlerini baradan çekilen akımlar cinsinden elde eden iki matris geliştirilmiştir [54]. Bu çalışmada türetilen ifade, Teng ve arkadaşları tarafından geliştirilen; Bara Akımından Hat Akımı (BIBC - Bus-Injection to Branch-Current), Hat Akımından Bara Gerilim (BCBV - Branch-Current to Bus-Voltage) matrislerine ihtiyaç duymaktadır. BIBC matrisi bara akımlarından hat akımlarını elde etmek için kullanılmaktadır. BCBV matrisi ise, hat akımlarından bara gerilimlerini elde etmek için kullanılmaktadır. Ek olarak, BIBC ve BCBV matrisleri vasıtasıyla elde edilebilen DLF olarak isimlendirilen matriste yeni ifadeyi türetmek için gereklidir. Bu yüzden; BIBC, BCBV, DLF matrislerinin oluşturulması adımları detaylı olarak sunulmuştur.

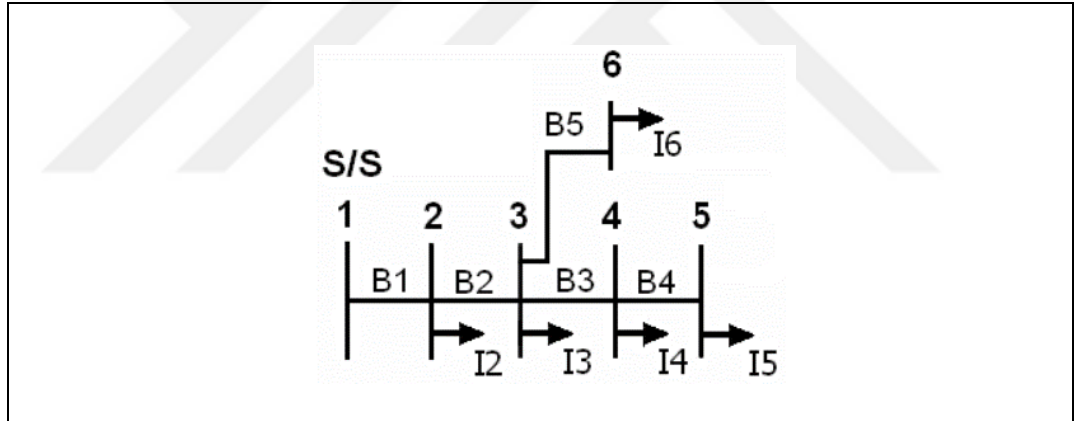
Bu bölümün ikinci kısmında, OLTC tap pozisyonu ayarlamasıyla gerilim regülasyonu yapan eğri uydurma temelli ifadenin elde edilme adımları verilmiştir. Birinci kısımdaki bara gerilim sapmalarını bulan ifade, eğri uydurma tekniğini kullanarak, OLTC'nin geriliminin ifadeye dahil edilmesiyle yeni bir ifade türetilmiştir. Bu türetilen ifade, eğri uydurma aşamasında, yalnızca iki defa yük akışına ihtiyaç duymaktadır. Bu iki yük akışında da hat akımlarından bulunan bara akımları değerleri

ve salınım barası gerilim değerleri kullanılmaktadır. Birinci ifadeye benzer şekilde BIBC, BCBV ve DLF matrisleri de bu ifadenin elde edilmesi aşamalarında doğrudan veya dolaylı olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümün üçüncü kısmında, OLTC tap pozisyonu ayarlamasıyla gerilim regülasyonu yapmaya yarayan ifade, test dağıtım sistemi üzerinde denemiştir ve sonuçları sunulmuştur. Test dağıtım sisteminde farklı durumlar altında gerilim regülasyonu gerçekleştirilmiştir ve bu ifadenin performansı ve doğruluğu karşılaştırmalı olarak, ortaya konulmuştur.

3.1.1. Bara Gerilim Düşümünün Analitik İfadesi

Radyal yapıda olan dağıtım şebekelerinde Kirchhoff akım kuralları vasıtasıyla hat akımları, bara akımları cinsinden yazılabilir. Kısaca, hat akımları hatta bağlı bulunan baraların akımlarının toplamına eşittir.



Şekil 3.1: Örnek radyal yapıya sahip olan dağıtım şebekesi devre şeması.

$$\begin{aligned}
 B_5 &= I_5 \\
 B_4 &= I_4 + I_5 \\
 B_3 &= I_4 + I_5 \\
 B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Şekil 3.1’de örnek bir radyal dağıtım şebekesinin devre şeması verilmiştir, B sembolü ile hat akımları ve I sembolü ile bara akımları temsil edilmiştir. Bara akımları vasıtasıyla, hat akımları Şekil 1’deki devre için Eşitlik 3.1’deki gibi bulunur. Hat

akımları bir başka şekilde, Bara akımından Hat Akımı (BIBC) matrisi kullanılarak da elde edilebilir. Eşitlik 3.2’de, hat akımları, BIBC matrisi ve bara akımları kullanılarak bulunmuştur.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Hat akımları genel manada:

$$[B]_{(n-1) \times 1} = [BIBC]_{nb \times (n-1)} \cdot [I]_{(n-1) \times 1} \quad (3.3)$$

ile vektörel olarak Eşitlik 3.3’teki gibi ifade edilebilir. Burada B kat akım vektörü, nb ise hat sayısıdır. Eşitlikteki [I], salınım barası haricindeki baraların oluşturduğu (n-1) boyutundaki bara akımlarının vektörüdür. [BIBC] ile gösterilen matris, ikili sistem sayılardan meydana gelmiştir, nb × (n – 1) boyutundadır ve nb tane hattı, n adet barası olan radyal dağıtım şebekesinin BIBC matrisidir. BIBC matrisindeki her bir satır dağıtım şebekesindeki hattı temsil etmektedir, matrisindeki “0” ve “1” sayıları ise sırasıyla hattın bağlı olmadığı ve bağlı olduğu barayı göstermektedir. BIBC matrisi yapısal olarak ilişki matrisine (incidence matrix) benzemektedir, BIBC matrisinin oluşturma prosedürü adımları aşağıda verilmiştir:

- Adım 1. Tüm elemanları sıfırdan meydana gelen, nb × (n – 1) boyutunda bir matris oluştur (salınım barası dışında kalan baraları matrisin sütunları temsil etmektedir).
- Adım 2. k’ye 1 değerini ver.
- Adım 3. k numaralı hattın bağlı bulunduğu i. barayı ve j. barayı bul.
- Adım 4. i. bara sütunundaki değerleri, j. bara sütununa kopyala.
- Adım 5. j. bara sütunun k numaralı satırını bir yap.
- Adım 6. Dağıtım şebekesindeki her hat için 3-5 numaralı adımlardaki işlemleri tekrarlayarak BIBC matrisini oluştur.

BIBC matrisi radyal yapıdaki dağıtım şebekesinde hat akımlarını, bara gerilimlerini ve hat güç kayıpları vb. şebeke ile ilgili parametrelerin hesaplamasını daha pratik hale getirmektedir.

Dağıtım şebekesinde salınım barası ile her bir bara arasındaki gerilim farkını, Hat Akımından Bara Gerilim (BCBV) matrisini ve hat akımları matrisini kullanarak, bulan ifade Eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$$[\Delta V]_{(n-1) \times 1} = [BCBV]_{(n-1) \times (n-1)} \cdot [B]_{(n-1) \times 1} \quad (3.4)$$

BCBV olarak isimlendirilen matris bara gerilimleri ve hat akımları arasındaki ilişkiyi sağlamak için kullanılır. Bu matris elemanları hat empedans değerlerini içermektedir ve bu matristeki her bir satır tek bir hattı, her bir sütun da hat empedansını temsil etmektedir. BCBV matrisini oluşturma prosedürü aşağıda adım adım, şu şekilde verilmiştir.

- Adım 1. $(n - 1) \times nb$ boyutlarında bir matrisin oluşturulması
- Adım 2. Adım 1'de oluşturulan matrisin tüm elemanlarının sıfır yapılması.
- Adım 3. i 'ye 2 değerinin atanması, ($i=1$).
- Adım 4. i . barayla salınım barası arasında kalan baraların belirlenmesi ve belirlenen hatlara karşılık gelen sütunlara hat empedansı değerlerin yerleştirilmesi.
- Adım 5. Salınım barası dışındaki kalan baralar için 3. adımın tekrarlanarak BCBV matrisinin oluşturulması.

Yukarıda adımları verilen yöntemin dışında BCBV matrisi BIBC matrisi kullanılarak da oluşturulabilir, bu yöntemin adımları şu şekildedir:

- Adım 1. BIBC matrisi, hat empedans vektörü ve Z_b 'nin oluşturulması.
- Adım 2. Hat empedansı vektörü ve Z_b 'nin diyagonal matrise dönüştürülmesiyle primitif empedans matrisi Z 'nin elde edilmesi.
- Adım 3. BCBV matrisinin, BIBC matrisinin transpozesi ve primitif empedans matrisi olan Z ile çarpılarak elde edilmesi (Eşitlik 3.5).

$$[BCBV] = [BIBC]^T \cdot [Z] \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.3'te ki B matrisi, Eşitlik 3.4'te yerine konular ve bara gerilim düşümleri DLF matrisi ve hat akımları cinsinden hesaplanabilir hale gelmektedir (Eşitlik 3.6).

$$[\Delta V] = [DLF] \cdot [I] \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6'da bahsi geçen DLF matrisi BIBC ve BCBV matrislerinin çarpımı ile elde edilmektedir ve Eşitlik 3.7'de sunulmuştur.

$$[DLF] = [BIBC] \cdot [BCBV] \quad (3.7)$$

Şekil 2.1'de verilen örnek radyal dağıtım sistemi için, BIBC matrisi vasıtasıyla BCBV matrisi elde edilmiştir, bunun için ilk önce hat akım vektörü (Zb) diyagonal matrise (Z) evrilmiştir. Eşitlik 3.8'de bu evrilme işlemi sunulmuştur.

$$Zb = \begin{bmatrix} Z_{12} \\ Z_{23} \\ Z_{34} \\ Z_{45} \\ Z_{56} \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Hat empedans bilgilerini barındıran diyagonal matrisi, Z, oluşturulduktan sonra bu matrisin BIBC matrisi ile çarpılmasıyla örnek dağıtım sistemi için BCBV matrisi Eşitlik 3.9'daki şekilde elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
[BCBV] &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{56} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

BCBV matrisi elde edildikten sonra BCBV matrisi, BIBC matrisi ve bara akımları cinsinden bulunmuş hat akımları matrisiyle çarpılarak, örnek dağıtım sistemi için salınım barasına göre bara gerilim düşümleri Eşitlik 3.10'daki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
[\Delta V] &= \begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

3.1.2. Radyal Dağıtım Şebekelerinde OLTC ile Gerilim Regülasyonu için Önerilen Metot

Bu kısımda, dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu için uygun tap pozisyon ayarını bulmaya yarayan yeni metot tanıtılmıştır. Tanıtım iki kısımda yapılmıştır: ilk olarak bara, gerilimleri salınım barası gerilimine göre formüle edilmiştir (Bölüm 3.1.2.1) ve ikinci olarak, bu formülasyonu kullanarak, OLTC tap pozisyonu ayarlayan algoritma sunulmuştur (Bölüm 3.1.2.2).

3.1.2.1. OLTC Kademe Pozisyonuna Bağlı Bara Gerilim İfadesinin Elde Edilmesi

Radyal yapıdaki dağıtım şebekelerinde bara gerilimleri salınım barası gerilimine bağlı olarak, Eşitlik 3.11'deki ifade temelinden türetilerek ifade edilmiştir. Bu yeni ifade DLF matrisi, bara akımları matrisi ve salınım barası gerilim değerlerinden oluşmaktadır. Bunların yanında ifade elde edilirken, eğri uydurma metodundan da faydalanılmaktadır. Bölüm 3.1.1'de DLF ve bara akımları matrisi elde edilmesi aşamaları ayrıntılı biçimde verilmiştir.

$$[\Delta V]_{(n-1) \times 1} = [DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot [I]_{(n-1) \times 1} \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.11'de vektörel gösterimi verilen bara gerilim düşümlerinin (salınım barası hariç), Eşitlik 3.12'de matrisel açılımı verilmiştir. Örneğin bu açılımdaki; ΔV_2 2. baradaki gerilim düşümü anlamında gelmektedir ve $DLF(1, k)$ ifadesi, DLF matrisinin 1. sütun ve k. satıra gelen elemanını, $I(k)$ ifadesi ise bara akımları matrisindeki k. satırdaki elemanı temsil etmektedir. Herhangi bir bara gerilim düşümü değeri DLF ve bara akım matrislerinin çarpımının, k'ye göre seri toplamıdır.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1} \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n-1} DLF(1, k) \times I(k) \\ \sum_{k=1}^{n-1} DLF(2, k) \times I(k) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} DLF(i-1, k) \times I(k) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} DLF(n-2, k) \times I(k) \\ \sum_{k=1}^{n-1} DLF(n-1, k) \times I(k) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

DLF ve I matrislerinin elemanları karmaşık sayılardan meydana gelmektedir, gerçek ve sanal kısımlarına ayrılabilirler. Eşitlik 3.13'te DLF ve I matrisleri gerçek ve sanal kısımlarına ayrılmıştır. Bu eşitlikteki, $real[DLF]$ ve $imag[DLF]$ ifadeleri DLF matrisinin gerçek ve sanal kısımlarını, $real[I]$ ve $imag[I]$ ifadeleri ise bara akımları

matrisinin gerçek ve sanal kısımlarını temsil etmektedirler. Aynı şekilde, $real[V]$ ve $imag[V]$ is bara gerilim düşümü matrisinin sanal ve gerçek kısımlarıdır.

$$\begin{aligned}
[V]_{(n-1) \times 1} &= real[V]_{(n-1) \times 1} + j \cdot imag[V]_{(n-1) \times 1} \\
&= (real[DLF]_{nb \times (n-1)} + j \cdot imag[DLF]_{nb \times (n-1)}) \\
&\quad \cdot (real[I]_{(n-1) \times 1} + j \cdot (imag[I]_{(n-1) \times 1}))
\end{aligned} \tag{3.13}$$

DLF ve I matrislerinin gerçek ve sanal kısımlarına ayrıldıktan sonra, Eşitlik 3.13'ün en sağındaki ifade için çarpım işlemi gerçekleştirilmiştir. Eşitlik 3.14'te çarpım işlemi sonucu oluşan ve bara gerilim düşümü temsil eden ifade gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
[\Delta V]_{(n-1) \times 1} &= ((real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot real[I]_{(n-1) \times 1} \\
&\quad - imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot imag[I]_{(n-1) \times 1}) \\
&\quad + j \cdot ((imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot real[I]_{(n-1) \times 1} \\
&\quad + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot imag[I]_{(n-1) \times 1}))
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Eşitlik 3.14'te vektörel gösterimi verilen ifadenin matrisel açılımı Eşitlik 3.15'te sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \text{real}\Delta V_2 + j.\text{imag}\Delta V_2 \\ \text{real}\Delta V_3 + j.\text{imag}\Delta V_3 \\ \vdots \\ \text{real}\Delta V_i + j.\text{imag}\Delta V_i \\ \vdots \\ \text{real}\Delta V_{n-1} + j.\text{imag}\Delta V_{n-1} \\ \text{real}\Delta V_n + j.\text{imag}\Delta V_n \end{bmatrix} \\
= & \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n-1} (\text{realDLF}(1,k) \times \text{real}I(k) - \text{imagDLF}(1,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{realDLF}(2,k) \times \text{real}I(k) - \text{imagDLF}(2,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{realDLF}(i-1,k) \times \text{real}I(k) - \text{imagDLF}(i-1,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{realDLF}(n-2,k) \times \text{real}I(k) - \text{imagDLF}(n-2,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{realDLF}(n-1,k) \times \text{real}I(k) - \text{imagDLF}(n-1,k) \times \text{imag}I(k)) \end{bmatrix} \\
& + j \cdot \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n-1} (\text{imagDLF}(1,k) \times \text{real}I(k) + \text{realDLF}(1,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{imagDLF}(2,k) \times \text{real}I(k) + \text{realDLF}(2,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{imagDLF}(i-1,k) \times \text{real}I(k) + \text{realDLF}(i-1,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{imagDLF}(n-2,k) \times \text{real}I(k) + \text{realDLF}(n-2,k) \times \text{imag}I(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (\text{imagDLF}(n-1,k) \times \text{real}I(k) + \text{realDLF}(n-1,k) \times \text{imag}I(k)) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Bara gerilim düşümleri, Eşitlik 3.15'te ifade edildiği şekliyle, halihazırda salınım barası gerilim değerine bağlı değildir. OLTC tap pozisyonu ayarlamasıyla gerilim regülasyonu yapan ifadeyi elde etmek için bara gerilim düşümleri ifadesi (Eşitlik 3.15) salınım barası gerilim değerine bağlı olarak yazılmalıdır. Eşitlik 3.15'teki ifadelerden DLF matrisi hat empedanslarına ve bara bağlantılarına göre değişmektedir. Bu ifadede yalnızca bara akımları, yüklerin sabit tanımlandığı varsayımı altında, salınım barası gerilim değerine göre değişmektedir. Bu sayede bara akımları, salınım barası gerilim değerine göre matematiksel olarak ifade edilebilir.

Eğer gerilim regülasyonu yapılacak barada gerilim düşümü problemi: $V_i < V_{min}$, (V_{min} : *minimum işletme gerilimi*) varsa salınım barası gerilimi artırılmalıdır veya eğer yüksek gerilim problemi $V_i > V_{max}$, (V_{max} : *maksimum işletme gerilimi*) varsa salınım barası gerilimi düşürülmelidir. Bu bilgiye istinaden gerilim regülasyon problemini çözebilecek aday salınım barası gerilim değerleri ($[V_{tap}]_{tn \times 1}$) Eşitlik 3.16'da verilmiştir, tn toplam tap sayısıdır. Bu eşitlikteki $V_{tap_{pos}}$, $V_{tap_{min}}$ ve $V_{tap_{max}}$ sırasıyla mevcut, minimum ve maksimum OLTC tap pozisyonlarına karşılık gelen salınım barası gerilim değerleridir. Eşitlikteki V_{tap} ise salınım barası gerilimini temsil eden değişkendir. Eğri uydurma yönteminden faydalanabilmek için $[V_{tap}]_{tn \times 1}$ matrisinden iki salınım barası gerilim değeri seçilir ve bu iki salınım barası değeri için bara akımları yük akışı yapılarak bulunur.

$$V_i < V_{min} \rightarrow [V_{tap}]_{tn \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ V_{tap_{pos}} \\ \vdots \\ V_{tap_{max-1}} \\ V_{tap_{max}} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$V_i > V_{max} \rightarrow [V_{tap}]_{tn \times 1} = \begin{bmatrix} V_{tap_{min}} \\ V_{tap_{min+1}} \\ \vdots \\ V_{tap_{pos}} \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Yük akışı ile ilde edilen bara akımları değerleri kullanılarak, eğri uydurma yöntemi uygulanır ve bara akımlarının gerçek ve sanal kısımları, Eşitlik 3.17-a'daki klasik doğru denklemi temel alınarak, V_{tap} değişkenine bağlı olarak Eşitlik 3.17-b ve Eşitlik 3.17-c'deki gibi yazılır. Eşitlik 3.17'deki m ve n tek değişkenli doğrusal denklemin katsayılarıdır.

$$y(x) = mx + n \quad (3.17.a)$$

$$real[I]_{(n-1) \times 1} = coef[a]_{(n-1) \times 1} V_{tap} + coef[b]_{(n-1) \times 1} \quad (3.17.b)$$

$$imag[I]_{(n-1) \times 1} = coef[c]_{(n-1) \times 1} V_{tap} + coef[d]_{(n-1) \times 1} \quad (3.17.c)$$

Eşitlik 3.17-b ve Eşitlik 3.17-c'deki katsayı matrisleri olan $coef[a]$ ve $coef[b]$, bara akımlarının V_{tap} değişkenine göre ayırık lineer fonksiyon olarak yazılmış halinin gerçek kısmının katsayılarıdır, $coef[c]$ ve $coef[d]$ ise de sanal kısmının katsayılarıdır (sırasıyla Eşitlik 3.17-a'daki m ve n katsayılarına denk gelmektedir.). Bu katsayıların matrisel gösterimleri Eşitlik 3.18'de verilmiştir, salınım barası hariç her bara için katsayılar, eğri uydurma yöntemi vasıtasıyla bulunmuştur.

$$coef[c]_{(n-1) \times 1} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_k \\ \vdots \\ c_{n-2} \\ c_{n-1} \end{bmatrix}, coef[d]_{(n-1) \times 1} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_k \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.17'de V_{tap} değişkenine göre ifade edilen bara akımlarının sanal ve gerçek kısımları Eşitlik 3.14'te yerine konularak, Eşitlik 3.19'da bara gerilim düşümleri V_{tap} değişkenine göre vektörel gösterim ile ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} [\Delta V]_{(n-1) \times 1} = & (real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot (coef[a]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\ & + coef[b]_{(n-1) \times 1}) \\ & - imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot (coef[c]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\ & + coef[d]_{(n-1) \times 1})) \\ & + j \cdot (imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot (coef[a]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\ & + coef[b]_{(n-1) \times 1}) \\ & + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot (coef[c]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\ & + coef[d]_{(n-1) \times 1})) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19'daki çarpım durumundaki ifadeler açılmıştır ve Eşitlik 3.20'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
[\Delta V]_{(n-1) \times 1} = & (real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[a]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\
& + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[b]_{(n-1) \times 1} \\
& - imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[c]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\
& + imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[d]_{(n-1) \times 1}) \\
& + j. (imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[a]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\
& + imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[b]_{(n-1) \times 1}) \\
& + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[c]_{(n-1) \times 1} V_{tap} \\
& + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[d]_{(n-1) \times 1})
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Yukarıdaki eşitlik $a + j.b$ formatında Eşitlik 3.21’de düzenlemiştir.

$$\begin{aligned}
[\Delta V]_{(n-1) \times 1} = & ((real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[a]_{(n-1) \times 1} \\
& - imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[c]_{(n-1) \times 1}) V_{tap} \\
& + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[b]_{(n-1) \times 1} \\
& + imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[d]_{(n-1) \times 1}) \\
& + j. ((imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[a]_{(n-1) \times 1} \\
& + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[c]_{(n-1) \times 1}) V_{tap} \\
& + imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[b]_{(n-1) \times 1} \\
& + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[d]_{(n-1) \times 1})
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Eşitlik 3.21’de düzenlenen ifadenin gerçekte ve sanal kısmının katsayıları sadeleştirilerek toplam 4 parametre ($real_p1$, $real_p2$, $imag_p1$ ve $imag_p2$) ile ifade edilmiştir ve bu parametreler Eşitlik 3.22’de vektörel gösterimle sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
& [real_p1]_{nb \times 1} V_{tap} \\
& = (real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[a]_{(n-1) \times 1} \\
& \quad - imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[c]_{(n-1) \times 1}) \\
[real_p2]_{nb \times 1} = & real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[b]_{(n-1) \times 1} \\
& + imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[d]_{(n-1) \times 1} \\
& [imag_p1]_{nb \times 1} V_{tap} \\
& = (imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[a]_{(n-1) \times 1} \\
& \quad + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[c]_{(n-1) \times 1})
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
& [imag_p2]_{nb \times 1} \\
& = imag[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[b]_{(n-1) \times 1} \\
& + real[DLF]_{nb \times (n-1)} \cdot coef[d]_{(n-1) \times 1}
\end{aligned}$$

Bu dört parametrenin matrisel açılımları sırasıyla: Eşitlik 3.23, Eşitlik 3.24, Eşitlik 3.25 ve Eşitlik 3.26'da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} real_p1_1 \\ real_p1_2 \\ \vdots \\ real_p1_i \\ \vdots \\ real_p1_{n-1} \\ real_p1_n \end{bmatrix} V_{tap} \\
= V_{tap} & \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(1, k) \times coefa(k) - imagDLF(1, k) \times coefc(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(2, k) \times coefa(k) - imagDLF(1, k) \times coefc(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(i-1, k) \times coefa(k) - imagDLF(i-1, k) \times coefc(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(n-2, k) \times coefa(k) - imagDLF(n-2, k) \times coefc(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(n-1, k) \times coefa(k) - imagDLF(n-1, k) \times coefc(k)) \end{bmatrix} \quad (3.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} real_p2_1 \\ real_p2_2 \\ \vdots \\ real_p2_i \\ \vdots \\ real_p2_{n-1} \\ real_p2_n \end{bmatrix} \\
= & \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(1,k) \times coefb(k) - imagDLF(1,k) \times coefd(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(2,k) \times coefb(k) - imagDLF(1,k) \times coefd(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(i-1,k) \times coefb(k) - imagDLF(i-1,k) \times coefd(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(n-2,k) \times coefb(k) - imagDLF(n-2,k) \times coefd(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (realDLF(n-1,k) \times coefb(k) - imagDLF(n-1,k) \times coefd(k)) \end{bmatrix} \quad (3.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} imag_p1_1 \\ imag_p1_2 \\ \vdots \\ imag_p1_i \\ \vdots \\ imag_p1_{n-1} \\ imag_p1_n \end{bmatrix} V_{tap} \\
= & V_{tap} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(1,k) \times coefa(k) - realDLF(1,k) \times coefc(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(2,k) \times coefa(k) - realDLF(1,k) \times coefc(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(i-1,k) \times coefa(k) - realDLF(i-1,k) \times coefc(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(n-2,k) \times coefa(k) - realDLF(n-2,k) \times coefc(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(n-1,k) \times coefa(k) - realDLF(n-1,k) \times coefc(k)) \end{bmatrix} \quad (3.25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} imag_p2_1 \\ imag_p2_2 \\ \vdots \\ imag_p2_i \\ \vdots \\ imag_p2_{n-1} \\ imag_p2_n \end{bmatrix} \\
= & \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(1, k) \times coefb(k) - realDLF(1, k) \times coefd(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(2, k) \times coefb(k) - realDLF(1, k) \times coefd(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(i-1, k) \times coefb(k) - realDLF(i-1, k) \times coefd(k)) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{n-1} (imagDLF(n-2, k) \times coefb(k) - realDLF(n-2, k) \times coefd(k)) \\ \sum_{k=1}^{n-1} (iamgDLF(n-1, k) \times coefb(k) - realDLF(n-1, k) \times coefd(k)) \end{bmatrix} \quad (3.26)
\end{aligned}$$

Bara gerilim sapma değerleri vektörel biçimde, V_{tap} 'e bağlı ve sadeleştirilmiş şekilde Eşitlik 3.27'de ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
& [\Delta V(V_{tap})]_{(n-1) \times 1} \\
& = \left((V_{tap} [real_{p1}]_{nb \times 1} + [real_{p2}]_{nb \times 1}) \right) \\
& + j. (V_{tap} [imag_{p1}]_{nb \times 1} + [imag_{p2}]_{nb \times 1}) \quad (3.27)
\end{aligned}$$

Yukarıda vektörel biçimde verilen bara gerilim düşümleri, Eşitlik 3.28'de matrisel gösterimle sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \Delta V_2(V_{tap}) \\ \Delta V_3(V_{tap}) \\ \vdots \\ \Delta V_i(V_{tap}) \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1}(V_{tap}) \\ \Delta V_n(V_{tap}) \end{bmatrix} \\
= & \begin{bmatrix} (V_{tap}real_p1_1 + real_p2_1) + j.(V_{tap}imag_p1_1 + imag_p2_1) \\ (V_{tap}real_p1_2 + real_p2_2) + j.(V_{tap}imag_p1_2 + imag_p2_2) \\ \vdots \\ (real_p1_{i-1} + real_p2_{i-1}) + j.(V_{tap}imag_p1_{i-1} + imag_p2_{i-1}) \\ \vdots \\ (V_{tap}real_p1_{n-2} + real_p2_{n-2}) + j.(V_{tap}imag_p1_{n-2} + imag_p2_{n-2}) \\ (V_{tap}real_p1_{n-1} + real_p2_{n-1}) + j.(V_{tap}imag_p1_{n-1} + imag_p2_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (3.28)
\end{aligned}$$

Son olarak, Eşitlik 3.28'deki bara gerilim düşüm ifadeleri salınım barası geriliminden (V_{tap}) çıkartılarak, bara gerilim değerleri salınım barası gerilimine bağlı olarak Eşitlik 3.29'da elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_2(V_{tap}) \\ \vdots \\ V_i(V_{tap}) \\ \vdots \\ V_n(V_{tap}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{tap} - \Delta V_2(V_{tap}) \\ \vdots \\ V_{tap} - \Delta V_i(V_{tap}) \\ \vdots \\ V_{tap} - \Delta V_n(V_{tap}) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Bara gerilimleri salınım barası gerilimine bağlı olarak ifade edildikten sonra bu ifade kullanılarak, $[V_{tap}]_{tn \times 1}$ matrisindeki her tap pozisyonu (bu matris muhtemel tap pozisyonunu içerir) için bara gerilimleri hesaplanır ve Eşitlik 3.30'daki $[M(V_{tap})]$ (çözüm uzayı matrisi) elde edilir.

$$\begin{aligned}
V_i < V_{min} &\rightarrow \left\{ [M(V_{tap})]_{nb \times tn} \right. \\
&= \left. \begin{bmatrix} V_2(V_{tap_{pos}}) & \cdots & V_2(V_{tap_{max-1}}) & V_2(V_{tap_{max}}) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ V_i(V_{tap_{pos}}) & \cdots & V_i(V_{tap_{max-1}}) & V_i(V_{tap_{max}}) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ V_n(V_{tap_{pos}}) & \cdots & V_n(V_{tap_{max-1}}) & V_n(V_{tap_{max}}) \end{bmatrix} \right\} \\
V_i > V_{max} &\rightarrow \left\{ [MV_{tap}]_{nb \times tn} \right. \\
&= \left. \begin{bmatrix} V_2(V_{tap_{min}}) & V_2(V_{tap_{min+1}}) & \cdots & V_2(V_{tap_{pos}}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ V_i(V_{tap_{min}}) & V_i(V_{tap_{min+1}}) & \cdots & V_i(V_{tap_{pos}}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ V_n(V_{tap_{min}}) & V_n(V_{tap_{min+1}}) & \cdots & V_i(V_{tap_{pos}}) \end{bmatrix} \right\}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Çözüm uzay matrisini (çalışmada önerilen eğri uydurma tekniği vasıtasıyla elde edilmiştir) kullanarak OLTC tap pozisyonu ayarlaması yapan metot Bölüm 3.1.2.2’de tanıtılmıştır.

3.1.3. Algoritma Tanıtımı

Gerilim regülasyonu için OLTC tap pozisyonu ayarlaması, Bölüm 3.1.2.1’de elde edilen Eşitlik 3.29 kullanılarak yapılmıştır. Önerilen OLTC tap pozisyon ayarlama metodunun algoritma aşamaları Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Gerilim regülasyonu algoritması: OLTC kullanılarak.

A3.1.1	Güç akışı analizi yap
A3.1.2	Eğer $ V_i - 1.00 > 0.05$, daha sonra
A3.1.3	$[M(V_{tap})]_{tn \times tap_s}$ matrisini oluştur
A3.1.4	$f_{obj} = \min\{ V_i - 1.00 - 0.05\}$
A3.1.5	{Şu şartlara tabi $0.95 < V_k < 1.05$
A3.1.6	$0.9 < V_{ref} < 1.1$
A3.1.7	$Tap_{min} - Tap^{int} < \Delta Tap < Tap_{max} - Tap^{int}$ }
A3.1.8	OLTC tap pozisyonu ayarla ($[M(V_{tap_t})]_{nb \times tn}$ 'den en uygun tap pozisyonunu seç)
A3.1.9	Eğer son
A3.1.10	Algoritmayı sonlandır

Algoritma aşama A3.1.1'de güç akış analizi yapılması ile başlar. Aşama A3.1.2'de gerilim ihlali kontrol edilir ve en şiddetli gerilim problemi olan bara i . bara olarak atanır. A3.1.3'te gerilim ihlali tipine göre (düşük gerilim veya yüksek gerilim problemi) $[V_{tap}]_{tn \times 1}$ matrisindeki her V_{tap_t} değerine karşılık gelen bara gerilimleri hesaplanarak çözüm uzay matrisi ($[M(V_{tap})]$) oluşturulur. Gerilim regülasyonu amaç fonksiyonu A3.1.4'te verilmiştir ve aşama A3.1.5, A3.1.6 ve A3.1.7'de sırasıyla; bara gerilim kısıtları, salınım barası gerilimi kısıtı ve OLTC tap hareket kısıtı verilmiştir. Tap_{min} ve Tap_{max} OLTC minimum ve maksimum ayarlanabilecek tap pozisyonlarıdır. Tap^{int} ise gerilim regülasyonundan önceki tap pozisyonudur ve ΔTap ise OLTC'nin tap hareket sayısıdır. Algoritma, A3.1.4 amaç fonksiyonu için A3.1.5- A3.1.7 şartları altında en uygun tap pozisyonunu, A3.1.8 aşamasında, $[M(V_{tap})]$ matrisinden seçilerek ayarlar. Sonrasında, gerilim regülasyonu A3.1.9'da biter ve algoritma A3.1.10'da sonlandırılır.

3.1.4. Analiz Sonuçları

Çalışmada analizler iki durum altında gerçekleştirilmiştir: Bunlar, düşük gerilim ve yüksek gerilim probleminin önerilen metotla çözüldüğü durumlardır. Bölüm 3.1.4.1'de test sistemi ve analiz durumları tanıtımı yapılmıştır ve Bölüm 3.1.4.2 ve Bölüm 3.1.4.3'te analiz sonuçları verilmiştir.

3.1.4.1. Test sistemi ve Durumların Tanıtımı

Analizler 33 baralı test sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir [55]. Baz gerilim 12.66 kV olarak ve baz güç 100 MVA olarak seçilmiştir ve yük akışı için Thukoram iteratif güç akışı metodu kullanılmaktadır. Test sisteminde toplam aktif yük miktarı 3.715 MW'tır ve toplam reaktif güç miktarı 2.3 MVAr'dır. En düşük gerilim bara 18'dedir ve değeri 0.9037 pu'dur. OLTC tap pozisyonu başlangıçta sıfır konumundadır.

Analizler iki durum için gerçekleştirilmiştir: Bunlar sırasıyla, düşük gerilim (Durum-1) ve yüksek gerilim (Durum-2) probleminin çözüldüğü durumlardır. Durum-1'de sistemde herhangi bir dağıtık üretim sistemi bulunmamaktadır. Durum-1'de gerilim problemlili bara numarası 18'dir. Bu bara salınım barasına en uzak ve hat sonundadır bu yüzden düşük gerilim problemi meydana gelmesi muhtemeldir. Durum-2'de dağıtım sistemine 2 adet DG yerleştirilmiştir. Yerleri bara 5 ve 26'dır, büyüklükleri 2.572 MW'tır ve güç faktörleri sıfırdır. Durum-2'de gerilim problemlili bara numarası 26'dır ve gerilim değeri 1.0713 pu'dur. Yüksek gerilim problemi dağıtım sistemindeki fazla DG penetrasyonu sebebiyle meydana gelmiştir. Test sistemi ve analiz durumları ile ilgili özet bilgilendirme Tablo 3.2'de yapılmıştır.

Tablo 3.2: Test sistemi ve analiz durumları özeti.

Test sistemi bilgileri		
Toplam aktif güç	3.715 MW	
Toplam reaktif güç	2.3 MVAr	
Minimum bara gerilimi	0.9058 pu	
Maksimum bara gerilimi	1 pu	
Durum bilgileri		
Durum numarası	1	2
DG yeri	-	5. ve 26. Bara
DG büyüklüğü	-	2.5720 MW ve 2.5720 MW
Gerilim problem türü	Düşük gerilim	Yüksek gerilim
Gerilim problemlili bara (en şiddetli olan)	18. bara	26. bara

Analizlerde eğri uydurma temelli yöntem sonuçları, ızgara arama algoritması (IAA) ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin geçerliliği doğrulanmıştır ve referans yöntem olarak kabul görmüştür. IAA ile OLTC tap pozisyonu gerilim regülasyonu için şu şekilde yapılır: ilk olarak yük akışı yapılır ve

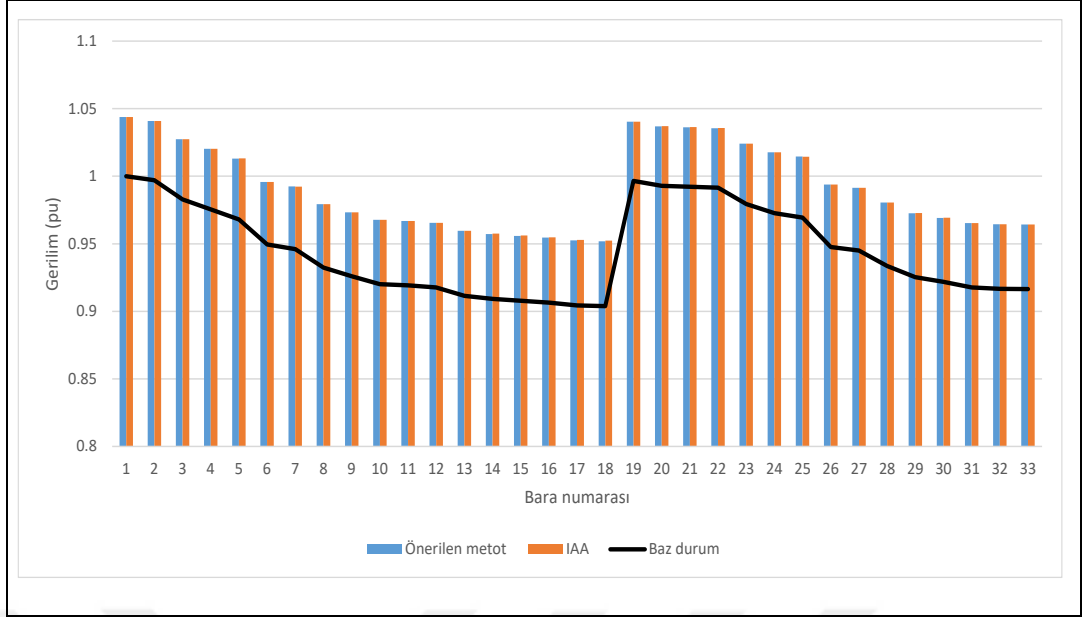
buna göre gerilim problemi türü belirlenir. Sonrasında OLTC tap pozisyonu hareket yönü gerilim problemi türüne göre belirlenir (düşük gerilim problemi: yukarı yön veya yüksek gerilim problemi: aşağı yön). OLTC'nin belirlenen hareket yönündeki tüm tap pozisyonları için dağıtım sisteminde yük akışı analizi yapılır ve bara gerilim sonuçları kaydedilir. Son olarak, A3.1 algoritmasındaki A3.1.4-A3.1.7'deki amaç fonksiyonunu sağlayan en uygun tap pozisyonu kaydedilen sonuçlar arasından seçilir. IAA yöntemi akışı kısaca

- Adım 1: Yük akışı yapılması,
- Adım 2: Gerilim problemi türünün belirlenmesi,
- Adım 3: Gerilim problemi türüne göre OLTC hareket yönünü belirlenmesi,
- Adım 4: Hareket yönündeki her tap pozisyonu için yük akışı analizi yapılması ve bara gerilim sonuçlarının kaydedilmesi,
- Adım 5: Amaç fonksiyonunu uygun tap pozisyonunun kaydedilen sonuçlar içinden seçilmesi ve algoritmanın sonlandırılması

şeklinde verilmiştir.

3.1.4.2. Durum 1

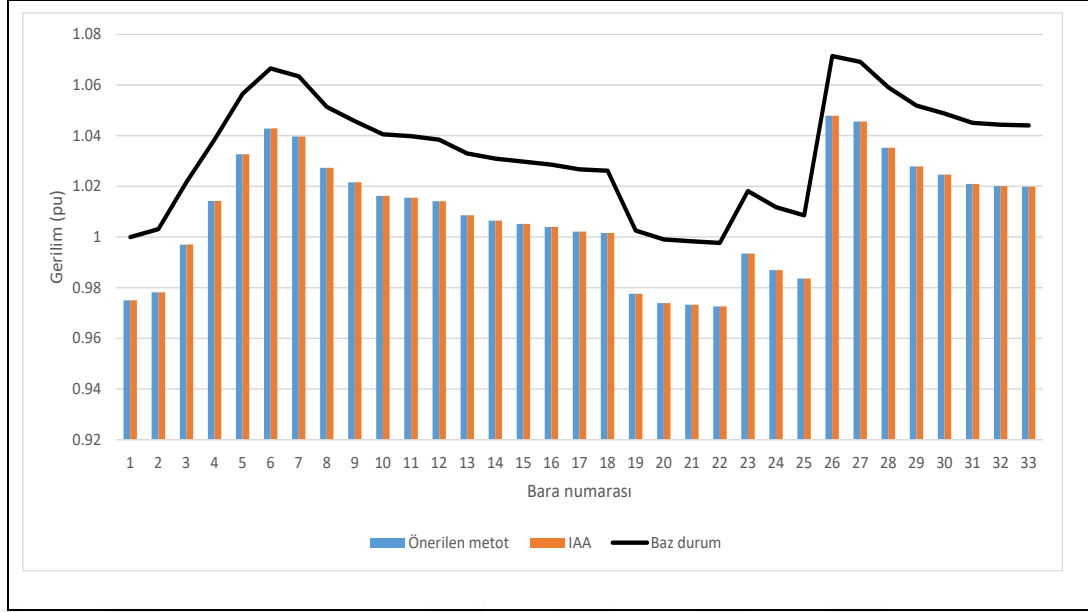
Durum 1'de düşük gerilim problemi, önerilen metot yardımıyla, OLTC tap pozisyonu ayarlanarak çözülmüştür. En şiddetli gerilim problemleri olan bara 18'dir ve regülasyondan önceki bara gerilim değeri 0.9037 pu'dur. OLTC tap pozisyonu önerilen metotta da, IAA'da da tap 7 olarak bulunmuştur. Durum 1 için bara gerilimleri Şekil 3.2'de sunulmuştur. Bu şekilde görüleceği üzere önerilen metotta düşük gerilim problemi yaşanan baraların gerilimleri regüle edilerek gerilim işletme alt sınırı olan 0.9500 pu'nun üzerine getirilmiştir. Gerilim problemi en şiddetli olan 18. baranın gerilimi regülasyondan sonraki değeri, önerilen metotta 0.9518 pu iken IAA'da ise 0.9522 pu'dur. Önerilen metotta hata oranı % 0.042'dir.



Şekil 3.2: Durum 1 bara gerilim değerleri.

3.1.4.3. Durum 2

Durum 2’de yüksek gerilim problemi, önerilen metot vasıtasıyla, OLTC tap pozisyonu ayarlanarak çözülmüştür. En şiddetli gerilim problemlili olan bara 26’dır ve regülasyon öncesi gerilim değeri 0.9713 pu’dur. Önerilen metotta regülasyon için ayarlanan tap pozisyonu -4’tür, IAA’da ise benzer şekilde tap pozisyonu -4’tür. Durum 2 için bara gerilim sonuçları Şekil 3.3’de verilmiştir, şekilden görüleceği üzere tüm bara gerilimleri işletme kısıtları içindedir. En şiddetli gerilim problemi olan bara 26’nın gerilimi, önerilen metotta da IAA’da da 1.0478 pu olarak elde edilmiştir. Önerilen metotta hara oranı Durum 2’de sıfırdır.



Şekil 3.3: Durum 2 bara gerilim değerleri.

3.2. OLTC ile Gerilim Profili İyileştirilmesi

Gerilim profili iyileştirilmesi elektrik tüketicilerinin kaliteli elektrik enerjisi kullanması için önemli bir husustur. Bu yüzden, çalışmanın bu bölümünde gerilim regülasyon gerilim profili iyileştirmek için, OLTC tap pozisyonu ayarlaması yapılmıştır. Bunun için gerilim sapması endeksi modifiye edilmiştir ve bu yeni ifade kullanılarak gerilim profili iyileştiren metot ortaya konmuştur. Bölüm 3.2.1’de modifiye edilerek türetilen gerilim sapması endeksinin elde edilme adımları verilmiştir. Bölüm 3.2.2’de bu yeni ifade vasıtasıyla OLTC tap pozisyonu ayarlamasını yapan algoritma tanıtılmıştır. Bölüm 3.2.3’te önerilen metot test sistemi üzerinde uygulanarak, analiz sonuçları sunulmuştur.

3.2.1. Gerilim Sapması Endeksi İfadesinin Salınım Barasına Göre İfade Edilmesi

Bu bölüme gerilim sapması ifadesi, salınım barası gerilimine bağlı olarak ifade edilmiştir. Bu sayede OLTC tap pozisyonu değişimine bağlı olarak gerilim sapması endeksi değeri değişimi, ek bir yük akışı analizine ihtiyaç duyulmadan, elde edilebilmektedir. Eşitlik 3.31’de değiştirilecek gerilim sapması endeksi ifadesi verilmiştir. Bu ifadedeki V_{rf} (referans gerilim değeri) çalışmada 1 pu olarak alınmaktadır.

$$VDA = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |V_{rf} - V_i| \quad (3.31)$$

Bu ifade temel halinde salınım barası gerilimine bağlı değildir. Bunu sağlamak için Bölüm 3.1.2’de verilen eşitlikler kullanılmaktadır. VDA ifadesindeki V_i , kısaca i . baradaki gerilim, yerine Eşitlik 3.29’daki salınım barasına bağlı olan i . bara gerilimi yazılarak VDA ifadesi, salınım barası gerilimine bağlı olarak ifade edilir. Bunun için, Eşitlik 3.16 hariç Eşitlik 3.11- Eşitlik 3.29 arası tüm adımların gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir, bu aralıktaki tüm işlemler Bölüm 3.1.2’de detaylıca sunulduğu için bu bölümde açıklama yapılmamıştır. Gerilim sapması ifadesinin salınım barasına göre türetilmiş hali Eşitlik 3.32’de verilmiştir.

$$VDA(V_{tap}) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |V_{rf} - V_i(V_{tap})| \quad (3.32)$$

3.2.2. Algoritma Tanıtımı

OLTC tap pozisyonu ayarlayarak gerilim profili iyileştirilmesi, Eşitlik 3.32’de salınım barası gerilimine göre türetilmiş VDA ifadesi kullanılarak yapılmıştır. Bu ifadeyi kullanarak gerilim profili iyileştirilmesi algoritması adımları Tablo 3.3’te sunulmuştur.

Tablo 3.3: Gerilim profili iyileştirilmesi algoritması: OLTC kullanılarak.

A3.2.1	Eşitlik 2.32’deki denklemleri oluştur
A3.2.2	$sayaç = 1$
A3.2.3	$for\ tap_t = tap_{min} : \Delta tap : tap_{max} > 0.05$
A3.2.4	$ MVDA(V_{tap})(sayaç, 1) = VDA(V_{tap_t}), (Eşitlik\ 2.32'\ deki\ VDA\ ifadesi)$
A3.2.5	Döngü sonu
A3.2.6	$\min \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n 1 - V_i(V_{tap_t}) \right\}$
A3.2.7	Şu şartlar altında: $0.95 < V_k < 1.05$
A3.2.8	$0.9 < V_{ref} < 1.1$
A3.2.9	$Tap_{min} - Tap^{int} < \Delta Tap < Tap_{max} - Tap^{int} \}$
A3.2.10	OLTC tap pozisyonu ayarla $MVDA(V_{tap})$ ’den en uygun tap pozisyonunu seç
A3.2.11	Algoritmayı sonlandır

Algoritma A3.2.1 adımıyla, Eşitlik 3.32'deki, gerilim sapması endeksinin salınım barası gerilimine göre denkleminin oluşturulmasıyla başlamaktadır. A3.2.2'de sayaç değişkenine 1 atanır, bu değişken her OLTC tap pozisyonu için gerilim sapması endeksi değerinin bulunması aşamasında sayaç rolü oynayacaktır. A3.2.3-A3.2.5 arasında, OLTC'nin her pozisyonu için gerilim sapması endeksi, A3.2.2 adımıyla oluşturulan salınım barası gerilimine bağımlı gerilim sapması endeksi denklemini kullanılarak, ek bir yük akışı analizi yapmadan hesaplanır. Hesaplanan gerilim sapması endeksi değerleri $MVDA(V_{tap})$ matrisine kaydedilir. A3.2.10 adımıyla ise $MVDA(V_{tap})$ matrisi içinden, A.3.2.6-A3.2.9'da amaç ve kısıt fonksiyonları tanımlanmış optimizasyon problemini çözen en uygun OLTC tap pozisyonu seçilir. Algoritma A3.2.11'de sonlandırılır.

3.2.3. Analiz Sonuçları

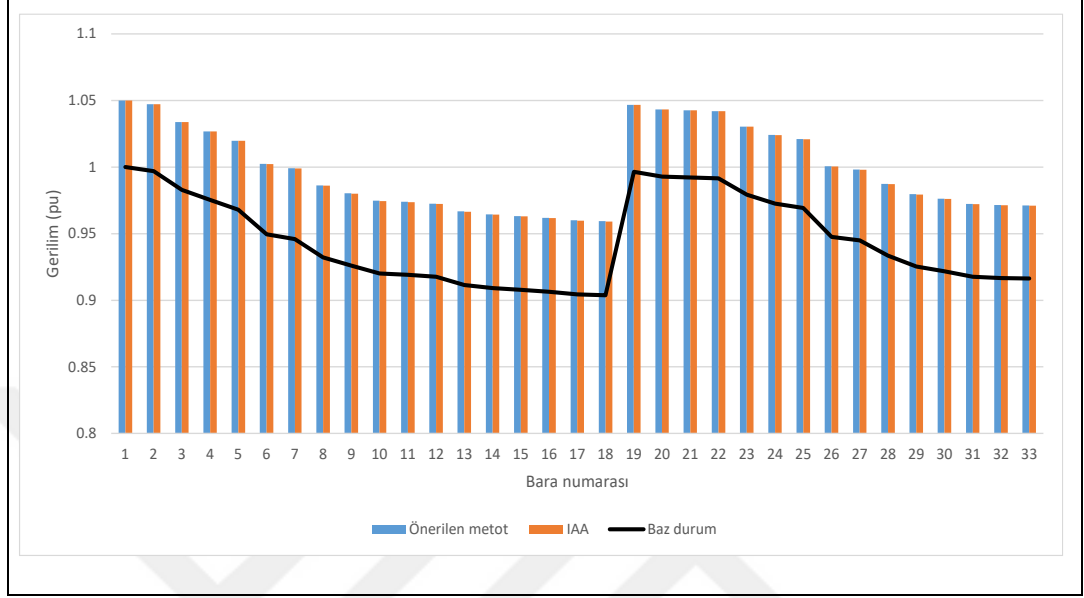
Analizde 33 baralı test sistemi kullanılmıştır, test sistemi detayları Tablo 3.2'de sunulmuştur. Test sisteminde herhangi bir dağıtık üretim elamanı bulunmamaktadır. Gerilim sapması minimizasyonu için önerilen metodun sonuçları, IAA'nın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. IAA metodunun işlem adımları

- Adım 1: OLTC tap pozisyonunu Tap_{min} olarak ayarla,
- Adım 2: Güç akış analizi yap,
- Adım 3: Bara gerilim değerlerini kaydet ve gerilim sapması endeksi değerini hesapla ve kaydet (Eşitlik 3.31),
- Adım 4: OLTC tap pozisyonu Tap_{max} 'dan büyük ise algoritmayı bitir, değilse tap pozisyonunu 1 arttır ve adım 2'ye dön

şeklinde öz olarak aşağıda verilmiştir.

Şekil 3.4'te önerilen metod ve IAA metoduyla, gerilim sapması minimizasyonu için yapılan OLTC tap pozisyonu ayarlaması sonrasında elde edilen bara gerilim değerleri verilmiştir. Baz durum VDA minimizasyonu için gerilim regülasyonu yapılmadan önceki durumdur. Her iki metotta da minimum gerilim sapması endeksi tap 9 pozisyonunda elde edilmektedir. Önerilen metotta gerilim sapması endeks değeri regülasyondan sonra 0.000925 pu'dur, IAA'da ise 0.000903 pu'dur. Önerilen metotta hata oranı %2.4363 mertebesinde dir. Şekil 3.4 incelendiğinde, önerilen metottaki bara

gerilim sonuçlarının, IAA'daki bara gerilimlerine neredeyse eşittir. Örneğin; 18 baradaki gerilim değeri önerilen metotta: 0.9594 pu'dur, IAA'da ise: 0.9591 pu'dur, hata oranı %0.031'dir. Tüm bara gerilimleri 0.9500 pu-1.0500 pu arasındadır.



Şekil 3.4: Bara gerilimleri.

3.3. Sonuç

Bölüm 3'te, gerilim regülasyonu ve gerilim profili iyileştirilmesi için OLTC tap pozisyonunu belirlemeye yardımcı olan analitik ifade çıkartılmış ve bu analitik ifade kullanılarak eğri uydurma temelli metot geliştirilmiştir. Tap pozisyonu ayarlaması, bu çalışmada önerilen, eğri uydurma temelli-yarı analitik metotla ve IAA'yla yapılmıştır. Metotlar 33 baralı test sistemi üzerinde uygulanmıştır.

Önerilen metot sayesinde yalnızca iki sefer yük akış yapılarak regülasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir ve bu gerekli yük akış analizi sayısı, her durum altında aynı kalmaktadır. IAA ve benzeri arama-temelli algoritmalarda ise ihtiyaç duyulan yük akışı analizi sayısı her durumda farklılık göstermektedir ve OLTC tap sayısı arttıkça artmaktadır. Özellikle, OLTC tap sayısının fazla olduğu sistemlerde ihtiyaç duyulan yük akışı analizi sayısının, önerilen metot sayesinde, yalnızca 2 olması regülasyon işlemi için harcanan işlem yükünü oldukça azaltmaktadır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, önerilen metotla elde edilen bara gerilim değerlerinin hata oranı %0.5'in altında ve gerilim sapması endeks değerlerinin hata oranının %2.5'in altında

kaldığı görülmüştür. Özetle, işlem yükünü azaltmanın yanında, önerilen metodun doğruluk oranının da oldukça yüksek olduğu ortaya konulmuştur.



4. Reaktif Güç Ayarlaması ile Gerilim Regülasyonu

Sıklıkla tercih edilen gerilim regülasyonu uygulamalarından biri de reaktif güç ayarlamasıyla bara gerilim problemini çözmektir. Bu bölümde, evirici destekli dağıtık jeneratörün reaktif güç kapasitesi kullanılarak gerilim regülasyonu gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, gerekli reaktif güç ayarlaması için kullanılacak eğri uydurma temelli analitik ifade türetilmiştir. Sonrasında, bu türetilen ifadeyi kullanarak gerilim regülasyonu yapan algoritma tanıtılmıştır.

Bölüm düzeni şu şekildedir, Bölüm 4.1’de eğri uydurma temelli analitik ifadenin elde edilmesi açıklanmıştır, Bölüm 4.2’de bu ifadeyi kullanarak gerilim regülasyonu yapan algoritma tanıtılmıştır, Bölüm 4.3’te önerilen yöntem test sisteminde uygulanmıştır ve son olarak Bölüm 4.4’te bölüm özeti sunulmuştur.

4.1. Evirici Destekli Dağıtık Jeneratörün Reaktif Güç Çıkışını Gerilim Regülasyonu Amacı için Ayarlayan İfade

Gerilim problemi türüne göre dağıtım şebekesinde reaktif güç ayarlamasıyla gerilim regülasyonu yapılabilmektedir. Düşük gerilim problemi durumda: evirici destekli dağıtık jeneratör şebekeye doğru miktarda reaktif güç enjekte ederek veya benzer şekilde yüksek gerilim problemi durumda: şebekeden doğru miktarda reaktif güç tüketimi yaparsa gerilim regülasyonunda önemli rol üstlenebilir. Bu yüzden, çalışmanın bu kısmında evirici destekli dağıtık jeneratörün reaktif güç kapasitesinden faydalanarak, DG’nin reaktif güç çıkışını gerilim regülasyonu için ayarlamaya yarayan ifade türetilmiştir. İfade temel olarak Eşitlik 4.1’deki güç formülasyonunun modifiye edilmesiyle elde edilmiştir. Eşitlik 4.1, i . bara için görünür gücün modülünün, i . bara akım ve gerilim değerlerinin modüllerinin çarpımına eşit olduğunu göstermektedir.

İfade türetilmesi için, tüm baraların akım değerleri, dağıtık jeneratörün reaktif güç değerine bağlı şekilde matematiksel olarak tanımlanmıştır. Bunun için ilk olarak Eşitlik 4.1’de ki i . baraya ait bara gerilimi olan V_i , gerçek ve sanal taraflarına ayrılarak Eşitlik 4.2’deki gibi yazılmıştır.

$$|S_i| = |V_i| \times |I_i| \quad (4.1)$$

I_i , gerçek ve sanal kısımlarına ayrıldıktan sonra, V_i ifadenin sol kısmına taşınır (Eşitlik 4.3).

$$|S_i| = |V_i|(|real(I_i) + j.imag(I_i)|) \quad (4.2)$$

Bara akımının gerçek ve sanal kısımları, dağıtım sisteminde bulunan dağıtık jeneratörün reaktif gücüne lineer bağlıdır. Böylece, m. bara'daki dağıtık jeneratörün reaktif güç değeri (Q_{dg_m}) cinsinden lineer bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Bu tanımlamayı yapabilmek için eğri uydurma yönteminden faydalanılmaktadır.

$$\frac{|S_i|}{|V_i|} = |real(I_i) + j.imag(I_i)| \quad (4.3)$$

Eğri uydurma yöntemini uygulamak için evirici-temelli dağıtık jeneratörün reaktif güç kapasitesi sınırları içinde iki reaktif güç değeri için (Q_{dg_val1} ve Q_{dg_val2}), yük akışı analizi sonucuna ihtiyaç duyulmaktadır. Yük analizlerinden elde edilen bara akımları değerleri (I_{i_val1} ve I_{i_val2}) eğri uydurma yöntemi uygulamasında kullanılacaktır. Bara akımının gerçek ve sanal kısmının eğri uydurma yöntemi uygulaması sonrasında, m. baradaki dağıtık jeneratörün reaktif güç çıkışına bağlı şekilde ifade edilmiş hali Eşitlik 3.4'te verilmiştir. Bu eşitlikteki a_i ve b_i , i. baradaki akımın gerçek kısmının, Q_{dg_m} 'e göre lineer bağımlı olarak ifade edilmesiyle elde edilen fonksiyonun katsayılarıdır, benzer şekilde: c_i ve d_i ise sanal kısmının katsayılarıdır.

$$\frac{|S_i|}{|V_i|} = |a_i Q_{dg_m} + b_i + j(c_i Q_{dg_m} + d_i)| \quad (4.4)$$

Bara akımları Q_{dg_m} 'ye göre ifade edildikten sonra, bara akımına (4.4 eşitliğinin sağ tarafı) modülünü alma işlemi uygulanır, uygulama sonrasında elde edilen ifade Eşitlik 4.5'te verilmiştir.

$$\frac{|S_i|}{|V_i|} = \sqrt{a_i^2 Q_{dg_m}^2 + 2a_i b_i Q_{dg_m} + b_i^2 + c_i^2 Q_{dg_m}^2 + 2c_i d_i Q_{dg_m} + d_i^2} \quad (4.5)$$

Eşitlik 3.5'teki ifadenin sağ tarafındaki karekök işlemini ortadan kaldırmak için eşitliğin iki tarafının karesi alınır (Eşitlik 3.6).

$$\frac{|S_i|^2}{|V_i|^2} = a_i^2 Q_{dg_m}^2 + 2a_i b_i Q_{dg_m} + b_i^2 + c_i^2 Q_{dg_m}^2 + 2c_i d_i Q_{dg_m} + d_i^2 \quad (4.6)$$

Eşitlik 3.6'nın sol tarafındaki ifade eşitliğin sağ tarafına taşınır ve aynı dereceden değişkenlerin katsayıları paranteze alınarak, ifade sadeleştirilerek yazılır (Eşitlik 3.7).

$$0 = (a_i^2 + c_i^2)Q_{dg_m}^2 + 2Q_{dg_m}(a_i b_i + c_i d_i) + (b_i^2 + d_i^2 - \frac{|S_i|^2}{|V_i|^2}) \quad (4.7)$$

Eşitlik 3.7'deki i . barada çekilen kompleks gücü ifade eden S_i parametresi dağıtık jeneratörün Q_{dg_m} 'e göre değişmemektedir, ancak V_i parametresi, Q_{dg_m} 'e değişmektedir. Çalışmanın temel amacı gerilim problemi en şiddetli olan barada (i . bara) gerilim regülasyonu yapmaktır, bu yüzden V_i değerini düşük gerilim problemi durumda: gerilim işletme alt sınırı veya yüksek gerilim problemi durumda: gerilim işletme üst sınıra getirmek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Eşitlik 4.7'de V_i 'nin yerine V_{set} parametresi yazılmıştır (Eşitlik 4.8). V_{set} i . baranın geriliminin, Q_{dg_m} değeri ayarlanarak, olması istenen değeridir: düşük gerilim problemi durumda 0.95 pu veya yüksek gerilim problemi durumda 1.05 pu olmaktadır.

$$0 = (a_i^2 + c_i^2)Q_{dg_m}^2 + 2Q_{dg_m}(a_i b_i + c_i d_i) + (b_i^2 + d_i^2 - \frac{|S_i|^2}{V_{set}^2}) \quad (4.8)$$

Yukarıdaki tüm işlemlerden sonra Eşitlik 4.8'in sağ tarafındaki ifade Q_{dg_m} 'e değişkenine bağlı tek bilinmeyenli ikinci dereceden polinom denklem haline gelmiştir. Bu sebeple, kuadratik denklem çözme yaklaşımı ile kökleri bulunabilir: çözüm

sonucunda, Eşitlik 4.9’da iki adet kök bulunur ($Q_{dg_m_1}$ ve $Q_{dg_m_2}$) ve köklerden biri aranan Q_{dg_m} değeridir.

$$e_i = (a_i^2 + c_i^2), f_i = 2(a_i b_i + c_i d_i), \quad g_i = (b_i^2 + d_i^2 - \frac{|S_i|^2}{V_{set}^2})$$

$$V_{set} = V_{min} \text{ için } Q_{dg_mi_1} \text{ ve } Q_{dg_mi_2} = \frac{-f_i \pm \sqrt{f_i^2 - 4e_i \times g_i}}{2 \times f_i} \quad (4.9)$$

$$V_{set} = V_{max} \text{ için } Q_{dg_mi_3} \text{ ve } Q_{dg_mi_4} = \frac{-f_i \pm \sqrt{f_i^2 - 4 \times e_i \times g_i}}{2 \times f_i}$$

Bu bölümde hangi kökün aranan Q_{dg_m} değeri olduğunun bulunması aşamaları ve diğer baraların gerilim kısıtları ihlallerinin kontrol yöntemi verilmemiştir. Bunlar bir sonraki bölümde (Bölüm 4.2’de) anlatılmaktadır.

4.2. Algoritma Tanıtımı

Dağıtık jeneratörün reaktif güç çıkışı ayarlamasını, gerilim regülasyonu için yapan algoritmanın tanıtımı bu bölümde yapılmıştır. Algoritma, DG’nin reaktif gücünü ayarlarken Eşitlik 3.9’daki ifade kullanmaktadır. Önerilen algoritma Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1: Reaktif güç ayarlamasıyla gerilim regülasyonu algoritması: DG vasıtasıyla.

A4.1	Q_{dg_val1} için yük akış analizi yap ve bara akımlarını kaydet
A4.2	Gerilim problemi türünü ve gerilim probleminin en şiddetli olduğu baranın belirlenmesi
A4.3	Q_{dg_val2} için yük akış analizi yap ve bara akımlarını kaydet
A4.4	$V_{set} = V_{min}$
A4.5	for $i = 2: 1: n$
A4.6	Eşitlik 3.9'daki i . bara için e_i , f_i ve g_i katsayılarını bul (A3.1 ve A3.2' deki yük akışı sonuçlarını kullanarak eğri uydurma yöntemini uygulayarak).
A4.7	$MQdg(i - 2,1) = Q_{dg_mi_1}$ ve $MQdg(i - 2,2) = Q_{dg_mi_2}$
A4.8	Döngü sonu
A4.9	$V_{set} = V_{max}$
A4.10	for $i = 2: 1: n$
A4.11	Eşitlik 3.9'daki i . bara için e_i , f_i ve g_i katsayılarını bul (A3.1 ve A3.2' deki yük akışı sonuçlarını kullanarak eğri uydurma yöntemini uygulayarak).
A4.12	$KQdg(i - 2,1) = Q_{dg_mi_3}$ ve $MQdg(i - 2,2) = Q_{dg_mi_4}$
A4.13	Döngü sonu
A4.14	$f_{obj} = \min\{ V_f - 1.00 - 0.05\}$
A4.15	Şu şartlar altında: $Q_{dg_min} < Q_{dg_m} < Q_{dg_max}$
A4.16	$0.95 < V_k < 1.05$
A4.17	En uygun Q_{dg_m} 'i belirle
A4.18	Algoritmayı sonlandır

A4.1'de yük akış analizi yapılması ile başlar. A4.2'de ise gerilim probleminin türü (yüksek veya düşük gerilim problemi) tespit edilir ve gerilim probleminin en şiddetli yaşandığı bara belirlenir. İlk yük akışı gerilim probleminin tespitinin yanında ileride kullanılacak eğri uydurma yöntemi için, DG'nin mevcut reaktif güç değerine göre bara akımlarını hesaplar. Mevcut reaktif güç çıkış değeri Q_{dg_val1} değeri notasyonu ile verilmiştir. Bir sonraki adımda, $Q_{dg_mi_2}$ değeri için yük akışı analizi gerçekleştirilir ve bara akımları sonuçları benzer şekilde eğri uydurma yönteminde kullanılmak üzere kaydedilir (not olarak: $Q_{dg_mi_2}$ değeri Q_{dg_min} - Q_{dg_max} (evirici destekli dağıtık jeneratörün alt ve üst reaktif güç limitleridir) arasında bir değer seçilmelidir). Ardından A4.4'te V_{set} değeri V_{min} ' e (şebeke gerilim işletim alt sınırı) eşitlenir. A4.5-A4.8 arasında her bara için eğri uydurma yöntemi vasıtasıyla, A4.1 ve A4.3 adımlarında yapılan yük akışı sonuçlarını kullanarak e_i , f_i ve g_i katsayıları bulunur. Bu katsayılar kullanılarak salınım barası dışındaki baralar için, m . baradaki dağıtık jeneratörün ilgili baraların gerilimini V_{min} değerine regüle edebilecek $Q_{dg_mi_1}$ ve $Q_{dg_mi_2}$ reaktif güç miktarları bulunur ve bu değerler $MQdg$ matrisinde tutulur. Sonrasında, A4.9'da V_{set} , V_{max} değerine eşitlenir. A4.5-A4.8 adımları arasındaki gibi,

A4.10-A4.13 arasında her bara için eğri uydurma yöntemi kullanılarak e_i , f_i ve g_i katsayıları bulunur. Bu katsayılar kullanılarak salınım barası dışındaki baralar için, m. baradaki dağıtık jeneratörün ilgili baraların gerilimini V_{max} değerine regüle edebilecek $Q_{dg_mi_3}$ ve 4 reaktif güç miktarları bulunur ve bu değerler $KQdg$ matrisinde tutulur.

Dağıtım şebekesinde gerilim şiddeti en yüksek olan bara f. bara olarak varsayılırsa: dağıtım şebekesinde düşük gerilim problemi varsa, $Q_{dg_mf_1}$ ve $Q_{dg_mf_2}$ değerleri gerilim regülasyonu için aday reaktif güç değerleridir. Eğer dağıtım şebekesinde yüksek gerilim problemi varsa muhtemel çözüm adayları $Q_{dg_mf_3}$ ve $Q_{dg_mf_4}$ 'dür. A4.14-4.17 adımlarında, gerekli Q_{dg_m} değeri, A4.15 ve A4.16 kısıtları dikkate alınarak, eğer düşük gerilim problemi varsa: $Q_{dg_mf_1}$, $Q_{dg_mf_2}$ ve $KQdg$ matrisi kullanılarak veya yüksek gerilim problemi varsa: $Q_{dg_mf_3}$, $Q_{dg_mf_4}$ ve $MQdg$ matrisi kullanılarak belirlenir. A4.16'da düşük gerilim problemi durumunda $Q_{dg_mf_1}$ ve $Q_{dg_mf_2}$ çözüm adaylarından, reaktif güç kapasitesi alt (Q_{dg_min}) ve üst (Q_{dg_max}) limitlerinde olmayan değer elimine edilir, ancak her iki aday değerinde kısıt dışında ise $Q_{dg_mf_1}$ ve $Q_{dg_mf_2}$ 'den biri elimine edilir ve kalanına reaktif güç aday değeri olarak Q_{dg_max} atanır. Eğer yüksek gerilim problemi varsa: $Q_{dg_mf_3}$ ve $Q_{dg_mf_4}$ reaktif güç çözüm aday adaylarından $Q_{dg_min} - Q_{dg_max}$ arasında olmayana elimine edilir, ancak her iki aday değerinde kısıt dışında ise $Q_{dg_mf_3}$ ve $Q_{dg_mf_4}$ 'den biri elimine edilir ve kalanına reaktif güç aday değeri olarak Q_{dg_min} atanır. Benzer şekilde, eliminasyon işlemi $MQdg$ ve $KQdg$ matrisindeki f. bara dışındaki baralara denk gelen ve reaktif güç kısıtları içinde olmayan elemanlara da uygulanır.

DG'nin reaktif güç kapasite kısıtı sağlandıktan sonra, A4.16'da gerilim kısıtı kontrolü yapılır. Düşük gerilim problemi durumunda yalnızca f. bara dışındaki baralarda, Q_{dg_m} ayarlamasının gerilim üst limiti ihlalinin kontrolü yapılması yeterlidir. Hâlihazırda, düşük gerilim problemi yaşayan baranın gerilimi reaktif güç enjeksiyonu ile regüle edileceği için f. bara dışındaki diğer baralarda reaktif güç ayarlaması sonucunda düşük gerilim problemi açığa çıkması olanaksızdır. Benzer durum yüksek gerilim problemi durumunda da geçerlidir ve bu durumda yalnızca, f. bara dışındaki baralarda gerilim alt sınırı ihlali kontrol edilmesi yeterlidir. Bu durum bir örnekle açıklanacak olursa: düşük gerilim problemi durumunda çözüm adayı reaktif güç değerinin 1 MVar olduğu varsayılınsın. Ek olarak, f. bara dışındaki bir barada gerilimi üst sınırı değerine taşıyan değer, $KQdg$ matrisi vasıtasıyla 0.8 MVar olarak

tespit edildiği düşünülün. Böyle bir durumda aday çözüm değeri 0.8 MVAr olarak revize edilir. Bu yolla, f. bara dışındaki herhangi bir barada bir gerilim ihlali oluşturulmaz, m. baradaki düşük gerilim problemi tam olarak çözülmese de problemin şiddeti azaltılmış olur. Benzer şekilde yüksek gerilim problemi durumunda ise, f. bara dışındaki bir barada düşük gerilim problemi oluşup oluşmayacağı $KQdg$ matrisinden belirlenir ve buna göre reaktif güç çözüm adayı değeri yenilenir. Tüm eliminasyon ve revizyon işlemlerinden sonra A4.17’de Q_{dg_m} değeri ayarlanır ve algoritma A3.18’de sonlandırılır.

4.3. Analiz Sonuçları

Analizler 33 baralı test sisteminde ve iki durum için gerçekleştirilmiştir. Bunlar, düşük ve yüksek gerilim problemlerinin, eğri uydurma temelli ifade kullanılarak türetilen metotla çözüldüğü durumlardır. Test sistemi ve durumların özeti Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Test sistemi ve durumların açıklaması.

Test sistemi bilgileri		
Toplam aktif güç	3.715 MW	
Toplam reaktif güç	2.3 MVAr	
Durum bilgileri		
Durum numarası	1	2
DG yeri	5	5. ve 26. bara
DG büyüklüğü (MVA)	5	7.5/7.5
DG aktif güç çıkışı (MW)	3.715	5.572 ve 5.572
DG aktif güç çıkışı, regülasyon öncesi (MVAr)	0	0
DG eviricilerin reaktif güç alt ve üst limiti (MVAr)	-3.3435/3.3435	-5.0125/5.0125
Gerilim problem türü	Düşük gerilim	Yüksek gerilim
Gerilim problemlili bara yeri ve gerilim değeri (en şiddetli olan)	18. bara ve 0.9377 pu	26. bara

Önerilen metodun sonuçları, IAA’nın sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve önerilen metodun başarımı değerlendirilmiştir. Gerilim regülasyonu için DG reaktif güç ayarlaması IAA ile

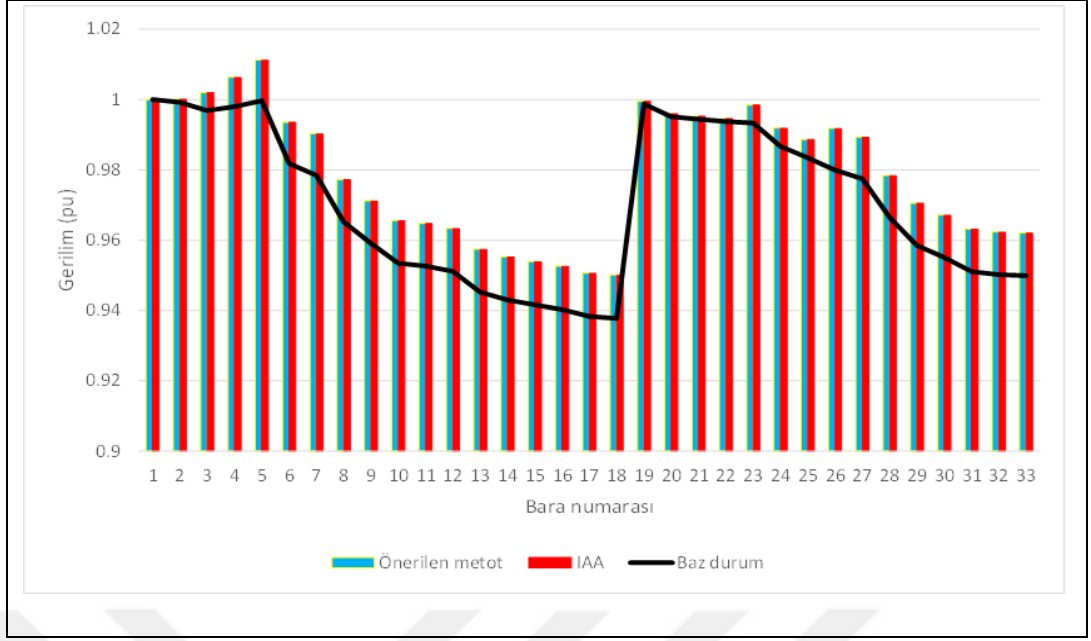
- Adım 1: Güç akış analizi yapılması ve gerilim probleminin ve problemin en şiddetli yaşandığı baranın belirlenmesi (Tablo 4.1'deki f. bara),
- Adım 2: DG'nin reaktif gücünü Q_{dg_min} 'e ayarla ve Q_{dg_max} ' a kadar %0.1 reaktif güç arttırmalarla, güç akışı analizi yap ve bara gerilimlerini ve reaktif değerlerini kaydet,
- Adım 3: Kısıtları sağlayan (A4.15 ve A4.16'yı sağlayan), en uygun reaktif güç değerini (A3.14'u sağlayan) kaydedilen sonuçlardan kontrol ederek seç,
- Adım 4: Reaktif güç değerini ayarla ve algoritmayı durdur

şeklinde yapılmaktadır.

Analizler iki başlık altında incelemiştir. Bunlar; düşük gerilim probleminin (durum-1) ve yüksek probleminin (durum-2) çözüldüğü durumlardır ve sırasıyla Bölüm 4.3.1 ve Bölüm 4.3.2'de verilmiştir.

4.3.1. Durum-1

Durum-1'de düşük gerilim problemi, 5. baradaki DG'nin reaktif güç çıkışının önerilen eğri uydurma temelli metotla, ayarlanmasıyla çözülmüştür. Gerilim probleminin en şiddetli yaşandığı bara numarası 18'dir ve değeri 0.9377 pu'dur. Gerilim regülasyonu öncesi, DG'nin reaktif güç çıkışı 0 MVar ve aktif güç çıkışı 3.715 MW'tır. Eğri uydurma tekniği uygulaması için seçilen reaktif değerleri: sırasıyla 0 MVar ve 3.3435 MVar'dır. Bu analizde DG'nin yerinin 5. bara seçilmesinin sebebi: ilgili baranın dağıtım şebekesinin gerilim profili üzerine en etkili bara olmasıdır [56].

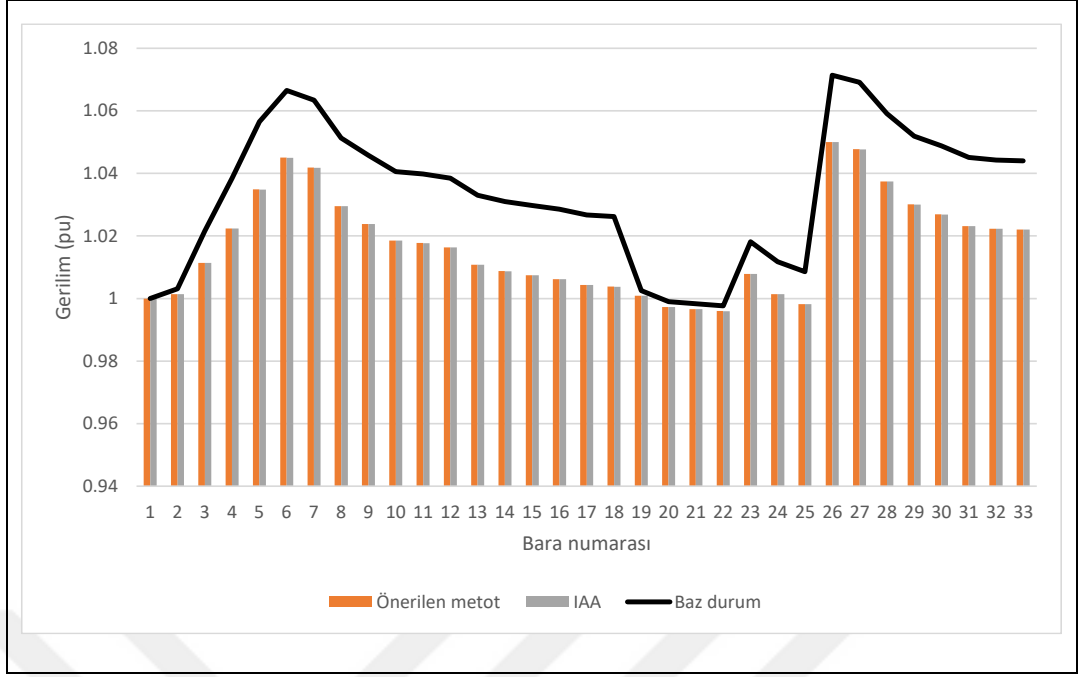


Şekil 4.1: Durum-1 analiz sonuçları.

18. baradaki gerilimi regüle edebilecek reaktif güç değeri (5. baradaki DG ile), önerilen metotta 2.7136 MVar ve IAA ise 2.6949 MVar olarak bulunmuştur. Önerilen metotta hata oranı %0.6939 olarak elde edilmiştir. Önerilen metotta regülasyon sonrasında 18. baradaki gerilim 0.95 pu olarak bulunmuştur ve benzer şekilde, IAA'da ise aynı değer bulunmuştur. Ek olarak, Şekil 4.1 incelendiğinde, 18. bara dışındaki baralarda herhangi bir gerilim ihlali durumu meydana gelmeden, önerilen metotla gerilim probleminin çözüldüğü görülmüştür.

4.3.2. Durum-2

Durum-2'de yüksek gerilim problemi, 5. baradaki DG'nin reaktif güç çıkışının önerilen eğri uydurma temelli metotla, ayarlanmasıyla çözülmüştür. Gerilim probleminin en şiddetli yaşandığı bara numarası 26'dır ve değeri 1.0714 pu'dur. Gerilim regülasyonu öncesi, DG'nin reaktif güç çıkışı 0 MVar ve aktif güç çıkışı 5.572 MW'tır. Eğri uydurma tekniği uygulaması için seçilen reaktif değerleri: sırasıyla 0 MVar ve -5.0125 MVar'dır. Bu analizde DG'nin yerlerinin 5. ve 26. bara seçilmesinin sebebi: sırasıyla, ilgili baraların dağıtım şebekesinin gerilim profili üzerine en etkili 1. ve 2. bara olmasındandır [56]. 26. baradaki DG gerilim regülasyonuna dahil edilmemiştir, gelecek çalışmada bunun için yeni bir metot üretilecektir.



Şekil 4.2: Durum-2 analiz sonuçları.

26. baradaki gerilimi regüle edebilecek reaktif güç değeri (5. baradaki DG ile), önerilen metotta -4.9044 MVar ve IAA ise -4.9118 MVar olarak bulunmuştur. Önerilen metotta hata oranı %0.1507 olarak elde edilmiştir. Önerilen metotta regülasyon sonrasında 26. baradaki gerilim 1.05 pu olarak bulunmuştur ve benzer şekilde, IAA'da ise aynı değer bulunmuştur. Ek olarak, Şekil 4.2 incelendiğinde, 26. bara dışındaki baralarda herhangi bir gerilim ihlali durumu meydana gelmeden, önerilen metotla gerilim probleminin çözüldüğü görülmüştür.

4.4. Sonuç

Bölüm 3'te, DG'nin reaktif güç ayarlaması gerilim probleminin çözümü için yapılmıştır. Reaktif güç ayarlaması, bu çalışmada önerilen, eğri uydurma temelli yarı analitik metotla ve IAA'yla yapılmıştır. Metotlar 33 baralı test sistemi üzerinde uygulanmıştır ve önerilen metodunun sonuçları, IAA'da elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Önerilen metot sayesinde yalnızca iki defa yük akış yapılarak gerilim regülasyonu gerçekleştirilmiştir ve gerekli yük akış analizi sayısı, değişen koşullar altında da aynı olmaktadır. Halbuki, IAA ve benzeri arama-temelli algoritmalarda ise gerekli yük akışı analizi sayısı dağıtım şebekesindeki durumlara farklılık

göstermektedir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, önerilen metotla elde edilen bara gerilim değerlerinin hata oranı neredeyse sıfırdır. Önerilen metotta, gerilim regülasyonu için ayarlanan reaktif güç değerinin hata oranı ise incelenen iki durum için sırasıyla; %0.1507 ve %0.6939 olmaktadır. Özet olarak, önerilen metodun yalınlığı ve işlem yükünü azaltmasının yanında, oldukça düşük hata oranına sahip olduğu sonucunda varılmıştır.



5. GERİLİM REGÜLASYONU: DAĞITIK JENERATÖR VE OLTC'NİN KOORDİNASYONU İLE

Bu bölümde dağıtım şebekesinde gerilim regülasyonu: evirici destekli DG'nin reaktif güç çıkışı ayarlaması ve OLTC tap pozisyonunun koordineli biçimde ayarlaması ile yapılmıştır. Gerilim probleminin çözümünü ilk olarak reaktif güç ayarlamasıyla çözülmeye çalışılmıştır. Reaktif güç ayarlamasının yeterli olmadığı durumda da OLTC devreye alınarak tap pozisyonu ayarlaması yapılmıştır. İnvörtör tabanlı DG ve OLTC arasındaki koordinasyonu sağlayan yeni bir algoritma ortaya konulmuştur.

Bu bölümün, ilk kısmında, evirici destekli DG ve OLTC koordinasyonuna dayanan gerilim regülasyonu stratejisi tanıtılmıştır.

Önerilen algoritma ikinci kısımda tanıtılmıştır. Algoritma iki evre olarak tasarlanmıştır, ilk evre reaktif güç ayarlama evresi, ikinci evre ise de OLTC tap pozisyonu ayarlama evresidir. Reaktif güç ayarlama evresi: üç aşama olarak tasarlanmıştır. Bu evrede, reaktif güç ayarlaması ve şebeke kısıtlarına uyma işlemleri, eğri uydurma temelli analitik çözüm yaklaşımı ve buna bağlı kısıt kontrol fonksiyonları ile gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü kısımda ise IAA temelli koordineli gerilim regülasyon metodu sunulmuştur. Metot iki evreden oluşmaktadır bunlar reaktif güç ayarlaması ve OLTC tap pozisyonu ayarlaması evreleridir. Her iki evrede de gerekli ayarlama için IAA yöntemi kullanılmıştır.

Dördüncü kısımda ise önerilen metot ve IAA'nın sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur ve önerilen metodun performansı doğrulaması yapılmıştır.

5.1. Koordineli Gerilim Regülasyon Stratejisi

Bu çalışmada öne sürülen koordineli gerilim regülasyon stratejisi temel olarak reaktif güç ayarlaması ve OLTC tap pozisyonu ayarlamasına dayanmaktadır. İlk olarak gerilim ihlali, DG'nin reaktif ayarlamasıyla giderilmeye çalışılır, reaktif güç kapasitesinin yeterli olmadığı durumda ise OLTC tap pozisyonu ayarlaması süreci

başlatılır. Önerilen koordineli gerilim regülasyon metodunun algoritma aşamaları Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1: Koordineli gerilim regülasyon strateji algoritması.

A5.1.1	Yük akışı gerçekleştir ve bara gerilimlerini kontrol et
A5.1.2	Eğer $ V_i - 1.00 > 0.05$ sonrasında;
A5.1.3	$f_{obj1} = minimize\{ V_i - 1.00 - 0.05\}$ {
A5.1.4	kısıtlara tabi: $0.95 < V_k < 1.05, i \neq k, k = 2, \dots, N_{bus}$
A5.1.5	$ pf_{DG} < 0.9$ }
A5.1.6	DG'nin reaktif güç çıkışını ayarla
A5.1.7	eğer hala $ V_i - 1.00 > 0.05$ ve $ pf_{DG} = 0.9$ sonrasında;
A5.1.8	$f_{obj2} = min\{ V_i - 1.00 - 0.05\}$ {
A5.1.9	kısıtlara tabi: $0.95 < V_k < 1.05, i \neq k, k = 2, \dots, N_{bus}$
A5.1.10	$0.9 < V_{ref} < 1.1$
A5.1.11	$Tap_{min} - Tap^{int} < \Delta Tap < Tap_{max} - Tap^{int}$ }
A5.1.12	OLTC tap pozisyonunu ayarla
A5.1.13	Eğer sonu
A5.1.14	Eğer sonu
A5.1.15	Algoritmayı sonlandır

Algoritma (Tablo 5.1’de) iki optimizasyon probleminden meydana gelmektedir. Bunlardan ilki, A5.1.3-A5.1.6 adımları arasında gerilim ihlali giderilmesi probleminin, optimal reaktif güç ayarlaması yapılarak çözülmesidir. İkincisi ise, eğer gerilim ihlali reaktif güç ayarlamasıyla giderilemediyse, A5.1.8-A5.1.11 arasında ise OLTC tap pozisyonu ayarlaması yapılarak gerilim ihlali probleminin çözülmesidir. A5.1.4 ve A5.1.5, reaktif güç ayarlama evresindeki, sırasıyla bara gerilim ve DG'nin güç faktörü kısıtlarıdır. OLTC ayarlama evresindeki kısıtlar ise A5.1.9-A5.1.11 arasında tanımlanmıştır, bunlar sırasıyla; bara gerilim kısıtları, OLTC gerilim kısıtı ve OLTC tap pozisyonu yukarı veya aşağı kaç adım hareket edebileceğini belirleyen kısıtlardır.

Algoritma, reaktif güç ayarlama ve OLTC tap pozisyonu ayarlama evreleri olarak, detaylarıyla aşağıda açıklanmıştır

Reaktif güç ayarlama evresi:

Koordineli gerilim regülasyonu algoritması, A5.1.1’de yük akış analizi yapar ve bara gerilimlerini gerilim problemi durumunun tespiti için kontrol edip (bara gerilimlerinin 0.95 pu ve 1.05 pu arasında olup olmadığı), bara gerilim değerlerini kaydeder ve gerilim problemi en şiddetli olan bara (V_i) belirlenir. Sonrasında algoritma

evirici destekli DG'nin reaktif güç ayarlamasıyla, f_{obj1} amaç fonksiyonu, V_i değerini; düşük gerilim problemi varsa, 0.95 pu değerine veya eğer yüksek gerilim problemi varsa 1.05 pu değerine regüle etmeye çalışır (A5.1.3-A5.1.5 arasında). A5.1.4'te i. bara dışındaki baraların (V_k) gerilimlerinin 0.95-1.05 pu arasında kalmasını sağlamaktadır. A5.1.5'te ise, DG'nin güç faktörünün mutlak değerinin 0.9'dan küçük tutulmasıyla, eviricinin reaktif güç kapasitesi koşulu sağlanmaktadır. Algoritma, A5.1.6'da reaktif güç ayarlamasını yapar ve eğer hala gerilim ihlali tam olarak giderilmedi ise OLTC tap pozisyon ayarlaması evresi başlatılır.

OLTC tap pozisyon ayarlama evresi:

A5.1.7-A5.1.12 arasında, reaktif güç ayarlaması ile giderilemeyen gerilim ihlali durumu, OLTC tap pozisyonu ayarlamasıyla çözülmeye çalışılır. Bu evrede f_{obj2} amaç fonksiyonu, A5.1.9-A5.1.11 kısıtlarına tabi minimize edilmektedir. A5.1.9-A5.1.11 kısıtlar sırasıyla; i. bara dışındaki gerilimleri sınırla içinde tutmayı, OLTC'nin gerilimini işletim sınırları içinde tutmayı ve OLTC yukarı ve aşağı tap hareketi kontrolünü sağlamaktadırlar. A4.1.11'deki, Tap_{min} , Tap_{max} ve Tap^{int} sırasıyla; minimum, maksimum ve mevcut tap pozisyonudurlar. Çalışmadaki OLTC 32 tap pozisyonuna sahiptir (-16-+16) ve bir tap pozisyonu yukarı hareket OLTC çıkış geriliminde 0.0625 pu'luk bir artışı meydana getirmektedir.

Bu çalışmada OLTC tap pozisyonu ayarlama aşaması her iki metotta da IAA yöntemi ile gerçekleştirildiğinden dolayı, bu OLTC tap pozisyonu ayarlama evresinin açıklaması bu kısımda yapılmıştır. OLTC gerilim regülasyonu için devreye alındığında, algoritma OLTC yukarı mı ve aşağı mı hareket edecek gerilim problemi türüne göre karar verir. Eğer yüksek gerilim problemi varsa tap hareketi aşağı doğru veya eğer düşük gerilim problemi varsa tap hareketi aşağıya doğru olur. OLTC hareket yönü belirlendikten sonra, OLTC belirtilen tap pozisyonunda harekete başlar ve her tap pozisyonunda yük akışı analizi yapılır ve kısıt ihlalleri kontrol edilir. Kısıt ihlallerinin olmadığı ilk durumda veya tap pozisyonu üst veya alt sınıra geldiğinde ise, algoritma kendini sonlandırır.

5.2. Koordineli Eğri Uydurma Temelli Gerilim Regülasyonu Metodu

Önerilen metot, üç aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada, z. baradaki DG'nin reaktif gücü ile i. baranın gerilim değeri arasındaki matematiksel ilişki kurulmaktadır. Bu VAr/Volt ilişkisi kullanılarak muhtemel reaktif güç çözüm adayları bulunmaktadır. İkinci aşamada ise i. bara dışındaki baralarda (k. baralarda) gerilim ihlali engellemek için evirici destekli DG'nin reaktif güç kısıtları güncellenmektedir. Üçüncü aşamada ise, muhtemel çözüm adayları (aşama-1' de bulunan) ve güncellenen kısıt değerleri (aşama-2'de yapılan) kullanılarak en uygun reaktif güç değeri belirlenir. Eğer, reaktif güç ayarlaması sonrasında, halen gerilim ihlali devam ederse: OLTC tap pozisyonu ayarlaması işlemine üçüncü aşamada geçilir ve gerilim regülasyonu OLTC ile gerçekleştirilir.

5.2.1. Aşama-1

Aşama-1'de reaktif güç ayarlaması, z. baradaki DG'nin reaktif güç ve i. bara gerilimi arasındaki VAr/Volt ilişkisinin matematiksel ifadesi kullanılarak yapılmıştır. Bunun için ilk olarak bu fazda, VAr/Volt ilişkisi eğri uydurma tekniği kullanılarak matematiksel olarak, kuadratik denklem ile Eşitlik 4.1'deki gibi, ifade edilmiştir.

$$f_{|V_i|}(Q_{DG,z}) = aQ_{DG,z}^2 + bQ_{DG,z} + c \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1'de a, b ve c kuadratik denklemin katsayılarıdır ve $Q_{DG,z}$ ise z. baradaki DG'nin reaktif güç çıkışıdır. Katsayılar (a, b ve c) eğri uydurma tekniği yardımıyla bulunmaktadır. Eğri uydurma tekniğini kullanabilmek için, evirici alt ($Q_{DG,invlow}$) ve üst ($Q_{DG,invup}$) reaktif güç kapasitesi arasında birbirine eşit uzaklıkta 5 $Q_{DG,z}$ değeri seçilmiştir. Bu beş nokta Eşitlik 5.2 ve Eşitlik 5.3'teki gibi belirlenmiştir. Eşitlik 5.2'de iki nokta arasındaki uzaklık ($\Delta Q_{DG,pt}$) bulunmuştur, n: nokta sayısıdır. Eşitlik 5.3'te ise $\Delta Q_{DG,pt}$ kullanılarak bu beş noktaya ($Q_{DG,z,ptn}, n = 1 \dots 5$) karar verilmiştir.

$$\Delta Q_{DG,pt} = \frac{Q_{DG,invup} - Q_{DG,invlow}}{n - 1} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{DG,z_{pt_1}} \\ Q_{DG,z_{pt_2}} \\ \dots \\ Q_{DG,z_{pt_{n-1}}} \\ Q_{DG,z_{pt_n}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{DG,invlow} \\ Q_{DG,low} + \Delta Q_{DG,pt} \\ \dots \\ (Q_{DG,invlow} + (n-2)\Delta Q_{DG,pt}) \\ Q_{DG,invup} = (Q_{DG,invlow} + (n-1)\Delta Q_{DG,pt}) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Genel anlatımla, aşama-1’de gerilim problemi en şiddeti olan i. baranın gerilimini reaktif güç ayarlamasıyla regüle edilmeye çalışılır. Bunun için ilk olarak, DG’nin reaktif güç çıkışı ve i. bara gerilimi arasındaki ilişki Eşitlik 5.1’deki kuadratik denklem ile bulunur. Bu denklemin katsayıları eğri uydurma tekniği kullanılarak bulunmaktadır. Katsayılar bulunduktan sonra bu kuadratik denklemin kökleri, reaktif güç çözüm adayları olarak belirlenir. Aşama-1’in adımları detaylı şekilde Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: Koordineli eğri uydurma temelli gerilim regülasyonu algoritması: aşama-1.

A5.2.1	Yük akışı yap ve gerilim problemi en şiddetli olan barayı belirle (i. bara)
A5.2.2	Eğer $ V_i - 1 > 0.05$ sonrasında;
A5.2.3	Eşitlik 1’deki $\Delta Q_{DG,pt}$ ‘i hesapla
A5.2.4	Eşitlik 2’deki Q_{DG,pt_n} $n=1 \dots 5$ için belirle
A5.2.5	$Q_{DG,z_{pt_n}}$ noktaları için güç akışı analizi yap ve sonuçları kaydet
A5.2.6	a, b ve c katsayılarını bulmak için eğri uydurma tekniği uygula
A5.2.7	$V_i < 0.95 \rightarrow V_{set} = 0.95$ veya $V_i > 1.05 \rightarrow V_{set} = 1.05$
A5.2.8	$f_{ V_i }(Q_{DGz}) = aQ_{DG,z}^2 + bQ_{DG,z} + c = V_{set}$
A5.2.9	$Q_{DG,z_{1,2}} = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4a(c - V_{set})}}{2a}$
A5.2.10	Eğer son

A5.2.1’de yük akışı yapılarak, en şiddetli gerilim problemi olan baranın tespitiyle başlamaktadır. Algoritma i. baranın belirlenmesinden sonra, A5.2.3’te $\Delta Q_{DG,pt}$ hesaplar ve bir sonraki adımda ise yük akışı yapılacak reaktif güç değerlerini belirler (A5.2.4). A5.2.5’te belirlenen noktalar ($Q_{DG,z_{pt_n}}$) için yük akışı yapılır ve i. baranın gerilimleri kaydedilir. Yük akışından sonra, A5.2.6’da $Q_{DG,z_{pt_n}}$ değerleri ve bir önceki adımda bulunan bara gerilimleri kullanılarak a, b ve c katsayıları eğri uydurma tekniği kullanılarak bulunur. A5.2.7’de V_{set} (regüle edilmek istenen gerilim değeri) düşük gerilim probleminde 0.95 pu’ya, yüksek gerilim probleminde ise 1.05

pu'ya eşitlenir. A5.2.8'de ise Eşitlik 4.1'deki kuadratik ifade V_{set} 'e eşitlenir. Takip eden adımda ise i. barayı V_{set} değerine regüle edebilecek aday reaktif güç çözüm değeri, A5.2.8'deki denklemin köklerinin hesaplanması bulunur. Aday reaktif güç değerleri elde edildikten sonra, ilk aşama A5.2.10'da sonlanır.

5.2.2. Aşama-2

Aşama-2'de DG'nin reaktif güç alt ve üst limiti, i. bara dışındaki baraların gerilimlerini ihlal etmeyecek şekilde uyarlanmıştır. Bunun için eğri uydurma tekniğine dayalı algoritma önerilmiştir. Reaktif güncellemesi yapan bu algoritmanın adımları (A5.3.1-A5.3.16 arasında) Tablo 5.3'de sunulmuştur. A5.3.1 adımında, DG'nin eviricisinin üst ve alt reaktif güç limitleri, aktif güç çıkışı miktarına göre belirlenir. A5.3.2'de ise bir üst adımda belirlenen $Q_{DG,invlow}$ ve $Q_{DG,invlow}$ değerleri $Q_{DG,low}$ ve $Q_{DG,up}$ değişkenlerine atanır. Bu belirlemeden sonra $Q_{DG,low}$ ve $Q_{DG,low}$ değişkenleri dağıtım sisteminde i. ve salınım barası dışındaki baralarda gerilim yeni bir ihlal yaratmamak için A5.3.4-A5.3.12 arasında güncellenecektir. Güncelleme işlemi A5.3.4'te k. bara için Eşitlik 5.1'deki katsayıların bulunması ile başlar, bunlar sırasıyla; a_k , b_k ve c_k 'dir. Bu katsayıları bulmak için Eşitlik 5.3'teki noktalarda güç akışı yapılarak bara gerilim değerleri elde edilmiştir ve sonrasında eğri uydurma tekniği kullanılarak ilgili baraların VAR/volt denklemleri çıkarılmıştır. Eğri uydurma tekniği için Matlab'daki polyfit fonksiyonu kullanılmaktadır. Aday üst ($Q_{DG,root_{k,1,2}}$) ve alt ($Q_{DG,root_{k,3,4}}$) reaktif güç limitleri, i. bara dışındaki baralarda gerilim ihlali yaratmamayı amaçlayan, adım A5.3.5 ve A5.3.6'da: k. bara için VAR/Volt denkleminin diskriminant formülü ile köklerinin bulunmasıyla elde edilirler. İlerleyen adımlarda da bu aday köklerin yeni alt ve üst limit olup olmadığı kontrol edilir. Aday kök (gerçek sayı), k. baraya için r. kök değeri, gerçek sayı ve $Q_{DG,low}-Q_{DG,up}$ arasında ise $Q_{DG,low}$ veya $Q_{DG,up}$ değişkenlerinden birinin yerine geçerek yeni üst veya alt limit olacaktır. $Q_{DG,root_{k,1,2}}$ Kökleri alt reaktif güç limitini belirlemektedir, $Q_{DG,root_{k,3,4}}$ kökleri ise de üst reaktif güç limitini belirlemektedir. A5.3.9'da eğer, r=1 ve r=2 için, $Q_{DG,root_{k,r}}$ mevcut $Q_{DG,low}$ 'den büyük ise $Q_{DG,root_{k,r}}$ 'nin değeri $Q_{DG,low}$ 'a atanır. A5.3.12'de eğer, r=3 ve r=4 için, $Q_{DG,root_{k,r}}$ mevcut $Q_{DG,up}$ 'den küçük ise $Q_{DG,root_{k,r}}$ 'nin değeri $Q_{DG,up}$ 'a atanır. Yukarıdaki açıklanan adımlar, i. ve salınım

barası dışındaki tüm baralar için for döngüsü (A5.3.4-A5.3.16 arasında) ile tekrarlanır ve DG'nin reaktif güç ayarlamasından kaynaklı bir gerilim ihlali olması engellenir.

Tablo 5.3: Koordineli eğri uydurma temelli gerilim regülasyonu algoritması: aşama-2.

A5.3.1	$Q_{DG,invlow} = -0.9 \times P_{DG}$ ve $Q_{DG,invup} = +0.9 \times P_{DG}$
A5.3.2	$Q_{DG,low} = Q_{DG,invlow}$ ve $Q_{DG,up} = Q_{DG,invup}$
A5.3.3	for ($k = 2; k \leq N_{bus}; k++; k \neq i$)
A5.3.4	$f_{ V_k }(Q_{DG,j}) = a_k Q_{DG,j}^2 + b_k Q_{DG,j} + c_k$
A5.3.5	$Q_{DG,rootk,1,2} = \frac{-b_k \pm \sqrt{b_k^2 - 4a_k(c_k - 0.95)}}{2a_k}$
A5.3.6	$Q_{DG,rootk,3,4} = \frac{-b_k \pm \sqrt{b_k^2 - 4a_k(c_k - 1.05)}}{2a_k}$
A5.3.7	for ($r = 1; r \leq N_{root}; r++$)
A5.3.8	Eğer (gerçeksayı($Q_{DG,rootk,r}$)) ve ($Q_{DG,low} < Q_{DG,rootk,r} < Q_{DG,up}$) then
A5.3.9	Eğer ($Q_{DG,low} > Q_{DG,rootk,r}$ ve $k = 1$ veya 2) sonrasında;
A5.3.10	$Q_{DG,low} = Q_{DG,rootk,r}$
A5.3.11	aksihalde ($Q_{DG,rootk,r} < Q_{DG,up}$ ve $k = 3$ veya 4)
A5.3.12	$Q_{DG,up} = Q_{DG,rootk,r}$
A5.3.13	Eğer son
A5.3.14	Eğer son
A5.3.15	Döngü son
A5.3.16	Algoritma son

5.2.3. Aşama-3

Aşama-3'te, Aşama-1'de bulunan muhtemel reaktif güç çözüm adayları ve Aşama-2'de bulunan DG reaktif güç üst ve alt limitleri kullanılarak reaktif güç ayarlaması yapılmaktadır. Eğer reaktif güç ayarlaması gerilim ihlalinin gidermeye yeterli değilse, OLTC tap pozisyonu ayarlaması da bu aşamada yapılmaktadır. Tablo 5.4'te bu işlemlerin adımları verilmiştir. A5.4.1'de, iki reaktif güç çözüm adayından biri olan $Q_{DG,z1}$ 'in üst ve alt reaktif güç limitleri içinde olup olmadığı ve ikinci aday

çözüm olan Q_{DG,z_2} 'nin üst ve alt reaktif güç limitleri dışında olup olmadığı kontrol edilir. Eğer: Q_{DG,z_1} limitler içinde ancak, Q_{DG,z_2} limitler içinde değilse aranan reaktif güç değeri ($Q_{DG,z}$), Q_{DG,z_1} 'dir (A5.4.2). Benzer şekilde, Q_{DG,z_2} Aşama-2'de güncellenen reaktif güç limitleri içinde ancak Q_{DG,z_1} değilse aranan reaktif güç değeri Q_{DG,z_2} 'dir (A5.4.3-A5.4.4). A5.4.5-A5.4.13 arasında, yalnızca reaktif güç ayarlaması yeterli olmadığı, köklerin ikisinde reaktif güç limitleri dışında olduğu durum için gerilim regülasyonu işlemleri açıklanmaktadır. Eğer şebekede düşük gerilim problemi varsa ($V_{set} = 0.95$, adım A5.4.6) ve sadece reaktif güç ayarlamasıyla gerilim ihlali giderilemiyorsa, $Q_{DG,z}$ 'ye $Q_{DG,up}$ 'ın değeri atanır (A5.4.7). Sonrasında, A5.4.8'de ve OLTC tap pozisyonu ayarlaması işlemi yapılır. Eğer şebekede yüksek gerilim problemi varsa ($V_{set} = 1.05$, adım A5.4.9) ve sadece reaktif güç ayarlamasıyla gerilim ihlali giderilemiyorsa, $Q_{DG,z}$ 'ye $Q_{DG,low}$ 'ın değeri atanır (A5.4.10). Sonrasında, A5.4.11'de ve OLTC tap pozisyon ayarlaması işlemi yapılır. OLTC tap pozisyonu ayarlamasından sonra Aşama-3 biter ve gerilim regülasyonu tamamlanmış olur.

Tablo 5.4: Koordineli eğri uydurma temelli gerilim regülasyonu algoritması: aşama-3.

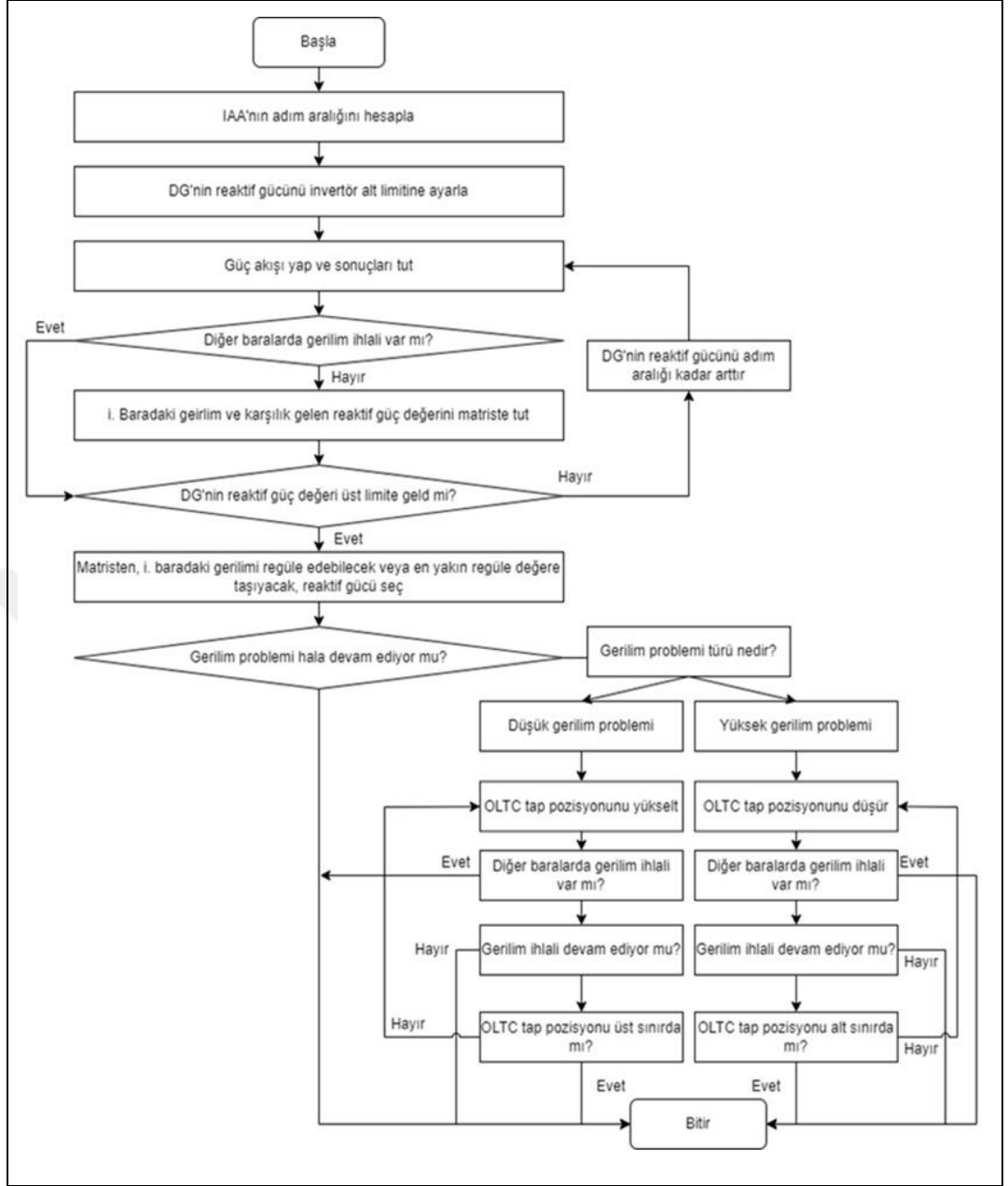
A5.4.1	Eğer ($Q_{DG,low} < Q_{DG,z_1} < Q_{DG,up}$) ve ($Q_{DG,low} > Q_{DG,z_1}$ or $Q_{DG,z_1} > Q_{DG,up}$) sonrasında;
A5.4.2	$Q_{DG,z} = Q_{DG,z_1}$
A5.4.3	Aksihalde eğer ($Q_{DG,low} < Q_{DG,z_2} < Q_{DG,up}$) ve ($Q_{DG,low} > Q_{DG,z_2}$ or $Q_{DG,z_2} > Q_{DG,up}$) sonrasında;
A5.4.4	$Q_{DG,z} = Q_{DG,z_2}$
A5.4.5	Aksihalde eğer ($Q_{DG,low} > Q_{DG,z_1}$ or $Q_{DG,z_1} > Q_{DG,up}$) ve ($Q_{DG,low} > Q_{DG,z_2}$ or $Q_{DG,z_2} > Q_{DG,up}$) sonrasında;
A5.4.6	Eğer $V_{set} = 0.95$ sonrasında;
A5.4.7	$Q_{DG,z} = Q_{DG,up}$
A5.4.8	OLTC tap pozisyonunu ayarla
A5.4.9	Aksihalde eğer $V_{set} = 1.05$ sonrasında;
A5.4.10	$Q_{DG,z} = Q_{DG,low}$
A5.4.11	OLTC tap pozisyonunu ayarla
A5.4.12	Eğer son
A5.4.13	Algoritma son

Bir sonraki kısımda (Bölüm 5.3), IAA uygulanarak koordineli gerilim regülasyonu açıklanacaktır.

5.3. IAA ile Koordineli Gerilim Regülasyonu

IAA, eviricinin alt ve üst reaktif limitleri arasında i. baradaki gerilim regülasyonunu giderecek en uygun reaktif güç değerini arama temelli yaklaşımla bulmaya çalışır. Reaktif ayarlaması ile gerilim problemi çözilemiyorsa, bu durumda da en uygun OLTC tap pozisyon konumunu aynı şekilde arama temelli yaklaşımla elde etmeye çalışır. IAA ile gerilim regülasyonu adımları Şekil 5.1’de verilmiştir.





Şekil 5.1: Koordineli gerilim regülasyonu metodu: IAA ile.

Başlangıçta, algoritma bir güç akışı analizi gerçekleştirir ve baralar, gerilim ihlali açısından kontrol eder. Eğer gerilim ihlali tespit edilirse, algoritma reaktif güç adım aralığını Eşitlik 5.4'teki gösterilen şekilde hesaplar.

$$\Delta Q_{DG.GSA} = \frac{|Q_{DG,invup} - Q_{DG,invlow}|}{1000} \quad (5.4)$$

$$M = \begin{bmatrix} V_{i,1} & Q_{DG,j,1} \\ V_{i,2} & Q_{DG,j,2} \\ \vdots & \vdots \\ V_{i,nm} & Q_{DG,j,nm} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Adım aralığı bulunduktan sonra, eviricinin alt reaktif güç limitinden bağlanarak üst limite kadar, bir adım aralığı artışla, yük akışı analizi yapılır. Her güç akışı analizi sonrasında i. bara dışındaki baralarda gerilim sapsması ihlali olup olmadığı kontrol edilir. Eğer gerilim ihlali saptanmazsa, i. bara gerilimi ve buna karşılık gelen reaktif güç değeri, Eşitlik 5.5'teki M matrisinin içinde tutulur. Matris içinden gerilim ihlalini tamamen bitirecek reaktif güç değeri seçilir. Reaktif güç kapasitesinin yeterli olmadığı durumda ise gerilim regülasyonu şiddetini en aza indirecek reaktif güç değeri DG reaktif güç çıkışı olarak ayarlanır, ardından OLTC tap pozisyon ayarlaması aşamasında geçilir.

OLTC tap pozisyon ayarlama aşamasında, ilk olarak gerilim problemi türü tespit edilir ve buna göre OLTC tap hareket yönü tayin edilir. Düşük gerilim problemi var ise hareket yönü yukarı, yüksek gerilim problemi var ise hareket yönü aşağıdır. Her tap pozisyon değişiminde gerilim ihlalinin giderilip giderilmediği kontrol edilir eğer varsa arama OLTC tap pozisyonu ayarlama aşaması bitirilir. Diğer baralarda gerilim ihlali oluşmuyorsa, i. baradaki ihlal durumu kontrol edilir. Eğer ihlal giderildiyse algoritma sonlanır. Aksi durumda OLTC tap hareketine belirlenen yönde devam alt ve üst tap pozisyon limitine ulaşana kadar devam eder. Bu sayede OLTC tap pozisyon ayarlamasıyla gerilim ihlal problemi tam olarak çözülemediği durumlarda (OLTC tap pozisyonu alt veya üst sınıra ulaşması durumunda), gerilim ihlali şiddeti azaltılmış olur.

5.4. Analiz Sonuçları

Koordineli gerilim regülasyonu analizleri 33 baralı sistem üstünde gerçekleştirilmiştir. Düşük ve yüksek gerilim problemleri için ayrı ayrı 2 durum altında analizler uygulanmıştır. Test sistemi ve durumların tanıtımı Tablo 5.5'te yapılmıştır.

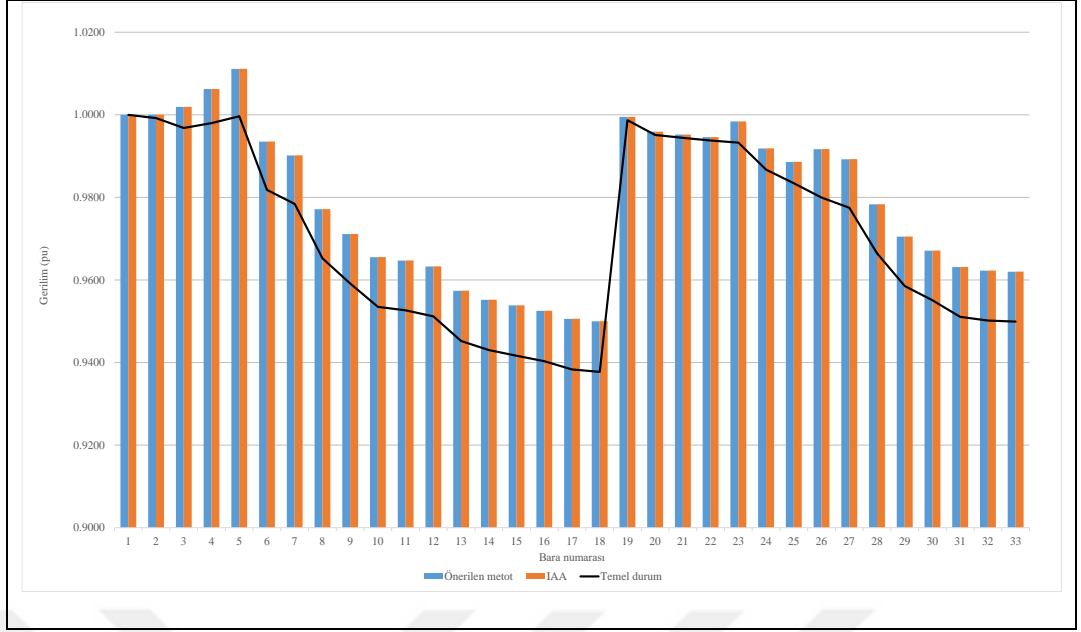
Tablo 5.5: Test sistemi durum bilgileri.

Test sistemi bilgileri				
Toplam aktif güç	3.715 MW			
Toplam reaktif güç	2.3 MVar			
Durum bilgileri				
Durum numarası	1	2	3	4
DG yeri (bara)	5.	5.	5. ve 26.	5. ve 26.
DG büyüklüğü (MVA)	5	2.5	7.5/7.5	8.75/8.75
DG aktif güç çıkışı (MW)	3.7150	1.8570	5.5720/5.5720	6.501/6.501
DG aktif güç çıkışı, regülasyon öncesi (MVar)	0	0	0	0
DG eviricinin reaktif güç alt ve üst limiti (MVar)	-3.3435/3.3435	-1.6881/1.6881	-5.0125/5.0125	-5.8518/5.8518
Gerilim problem türü	Düşük gerilim	Düşük gerilim	Yüksek gerilim	Yüksek gerilim
Gerilim problemlili bara yeri ve gerilim değeri (en şiddetli olan)	18. bara ve 0.9377 pu	18. bara ve 0.9211 pu	26. bara ve 1.0714 pu	26. bara ve 1.0894 pu
OLTC tap pozisyonu, regülasyon öncesi	Tap 0	Tap 0	Tap 0	Tap 0

Durum 1’de düşük gerilim problemi önerilen metotla yalnızca reaktif güç ayarlamasıyla çözülmektedir. Durum 2’de ise düşük gerilim problemi reaktif güç ayarlaması ve OLTC tap pozisyonunun koordineli biçimde ayarlanmasıyla çözülmektedir. Durum 3’te yüksek gerilim problemi önerilen metotla yalnızca reaktif güç ayarlamasıyla çözülmektedir. Durum 4’te ise yüksek gerilim problemi reaktif güç ve OLTC tap pozisyonunun koordineli biçimde ayarlanmasıyla çözülmektedir.

5.4.1. Durum-1

Durum-1’de gerilim ihlali (düşük gerilim problemi), DG’nin yeterli reaktif güç kapasitesine sahip olması sebebiyle, sadece reaktif güç ayarlamasıyla giderilebilmektedir. Gerilim problemi en şiddetli olan bara 18. baradır ve gerilim regülasyonundan önce değeri 0.9377 pu’dur. Şekil 5.2’den görüleceği üzere önerilen eğri uydurma temelli metotla gerilim problemi en şiddetli olan baranın gerilimi ve diğer baraların gerilimleri, 0.95 pu-1.05 pu arasına taşınmışlardır.

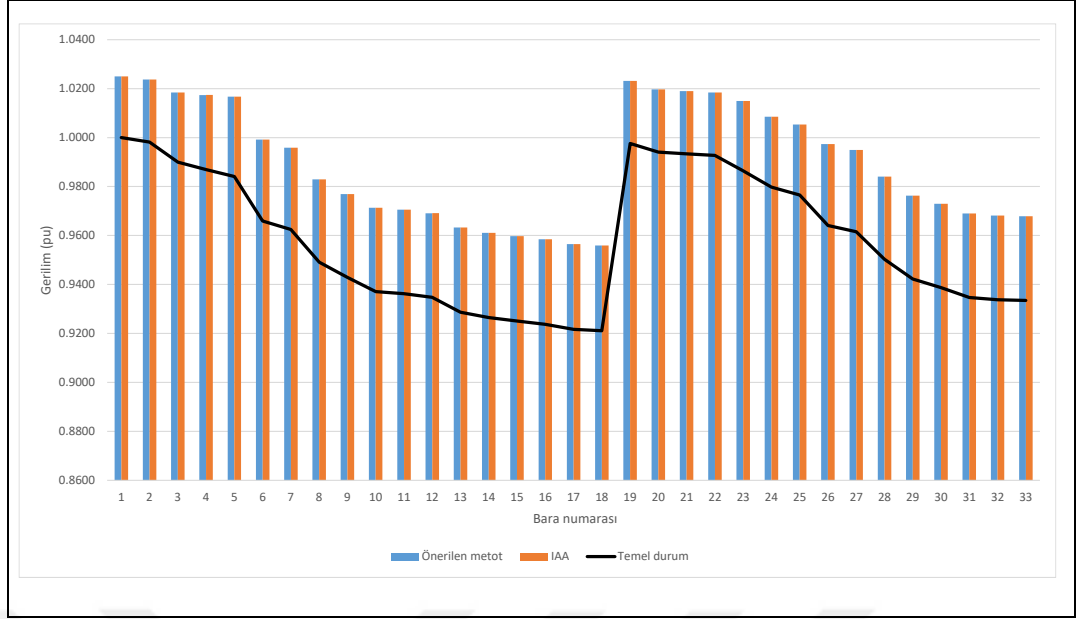


Şekil 5.2: Durum 1 bara gerilimleri.

Eğri uydurma temelli yöntemde reaktif güç 2.6949 MVar değerine ayarlanmıştır, IAA'da ise bu değer 2.7057 MVar'dır. Her iki yöntemde de OLTC tap pozisyonu sıfırdadır, herhangi bir değişim olmamıştır. Önerilen metotta, reaktif güç değeri için hata oranı %0.39'dur. Her iki yöntemde de gerilim regülasyonu sonrasında 18. baradaki gerilim değeri 0.95 pu olmuştur.

5.4.2. Durum-2

Durum-2'de gerilim ihlali (düşük gerilim problemi), DG'nin yeterli reaktif güç kapasitesine sahip olmaması sebebiyle, reaktif güç ve OLTC tap pozisyon ayarlamasıyla çözülmüştür. Gerilim problemi en şiddetli olan bara 18. baradır ve gerilim regülasyonundan önce değeri 0.9211 pu'dur. Şekil 5.3'ten görüleceği üzere önerilen eğri uydurma temelli metotla gerilim problemi en şiddetli olan baranın gerilimi ve diğer baraların gerilimleri, 0.95 pu-1.05 pu arasına taşınmışlardır.



Şekil 5.3: Durum 2 bara gerilimleri.

Eğri uydurma temelli yöntemde reaktif güç 1.6713 MVar değerine ayarlanmıştır, IAA'da ise bu değer 1.6718 MVar'dır. Reaktif güç değeri evirici üst limitine ayarlanmıştır, bu sayede gerilim regülasyonu için, OLTC tap pozisyonu hareket sayısı azaltılmaktadır. Her iki yöntemde de OLTC tap pozisyonu 4 konumundadır. Önerilen metotta, reaktif güç değeri için hata oranı %0.3'dur. Her iki yöntemde de gerilim regülasyonu sonrasında 18. baradaki gerilim değeri 0.9559 pu olmuştur.

5.4.3. Durum-3

Durum-3'te yüksek gerilim problemi, DG'nin yeterli reaktif güç kapasitesine sahip olması sebebiyle, sadece reaktif güç ayarlamasıyla giderilebilmektedir. Gerilim problemi en şiddetli olan bara 26. baradır ve gerilim regülasyonundan önce değeri 1.0714 pu'dur. Şekil 5.4'ten görüleceği üzere önerilen eğri uydurma temelli metotla gerilim problemi en şiddetli olan baranın gerilimi ve diğer baraların gerilimleri, 0.95 pu-1.05 pu arasına taşınmışlardır.

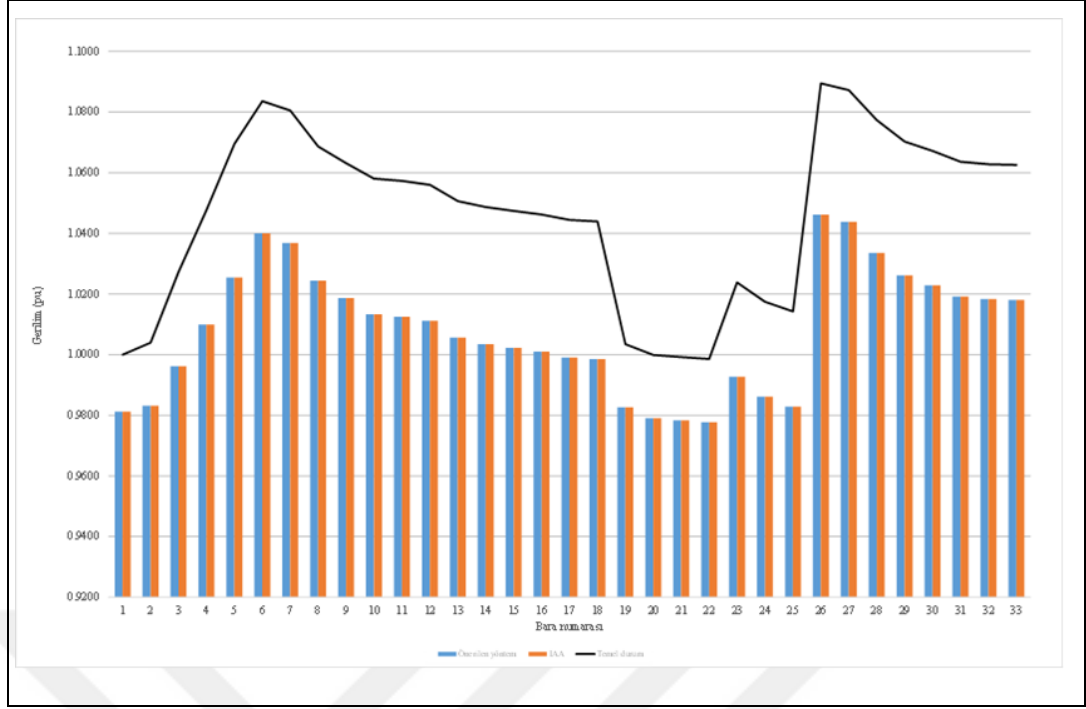


Şekil 5.4: Durum 3 bara gerilimleri.

Eğri uydurma temelli yöntemde reaktif güç -4.9118 MVar değerine ayarlanmıştır, IAA'da ise bu değer -4.9148 MVar'dır. Her iki yöntemde de OLTC tap pozisyonu sıfıradır, herhangi bir değişim olmamıştır. Önerilen metotta, reaktif güç değeri için hata oranı $\%0.06$ 'dır. Her iki yöntemde de gerilim regülasyonu sonrasında 26. baradaki gerilim değeri 1.05 pu olmuştur.

5.4.4. Durum-4

Durum-4'te gerilim ihlali (yüksek gerilim problemi), DG'nin yeterli reaktif güç kapasitesine sahip olmaması sebebiyle, reaktif güç ve OLTC tap pozisyonu ayarlamasıyla çözülmüştür. Gerilim problemi en şiddetli olan bara 26. baradır ve gerilim regülasyonundan önce değeri 1.0894 pu'dur ve OLTC tap pozisyonu sıfıradır. Şekil 5.5'ten görüleceği üzere önerilen eğri uydurma temelli metotla gerilim problemi en şiddetli olan baranın gerilimi ve diğer baraların gerilimleri, 0.95 pu-1.05 pu arasına taşınmışlardır.



Şekil 5.5: Durum 4 bara gerilimleri.

Eğri uydurma temelli yöntemde reaktif güç -5.8511 MVar değerine ayarlanmıştır, IAA'da ise bu değer -5.8511 MVar'dır. Reaktif güç değeri evirici alt limitine ayarlanmıştır, bu sayede gerilim regülasyonu için, OLTC tap pozisyonu hareket sayısı azaltılmaktadır. Her iki yöntemde de OLTC tap pozisyonu -3 konumundadır. Önerilen metotta, reaktif güç değeri için hata oranı %0'dır. Her iki yöntemde de gerilim regülasyonu sonrasında 26. baradaki gerilim değeri 1.0461 pu olmuştur.

Tüm durumların sonuçlarını içeren özet niteliğinde tablo, Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Tüm durumların sonuçları.

Durum numarası	1	2	3	4
Metotlar	Önerilen Metot/IAA			
i. bara regülasyon öncesi gerilimi (pu)	0.9211	0.9211	1.0714	1.0894
i. bara regülasyon sonrası gerilimi (pu)	0.9500	0.9559	1.0500	1.0461
Gerilim regülasyon öncesi reaktif güç değeri (MVar)	0	0	0	0
Gerilim regülasyon sonrası reaktif güç değeri (MVar)	2.6949/2.7057	1.6713/1.9718	-4.9118/-4.9148	--5.8511
Gerilim regülasyon öncesi OLTC tap pozisyonu	0	0	0	0
Gerilim regülasyon sonrası OLTC tap pozisyonu	0	4	0	-3

Analiz sonuçları incelendiğinde, önerilen eğri uydurma temelli ve analitik ifadeye dayalı yöntemle reaktif güç ayarlaması %0.06-%0.39 arasında hata payıyla gerçekleştirildiği görülür. Ek olarak, reaktif güç ayarlama işlemine ek olarak OLTC tap pozisyonu ayarlaması koordineli bir biçimde yapılarıyla OLTC tap pozisyonu hareket sayısının, gerilim regülasyonunda reaktif güç ayarlamasının olmadığı duruma göre, azaltıldığı sonucu ortaya sürülebilir. Son olarak önerilen metodun yüksek doğruluk (reaktif güç ayar değerlerine dayanarak ileri sürülmüştür) oranına sahip olmasından kaynaklı, önerilen metotta regülasyon sonrasında elde edilen bara gerilim değerleri IAA'daki bara gerilimleri ile neredeyse aynı olmaktadır.

5.5. Sonuç

Çalışmanın bu bölümde reaktif güç ayarlaması ve OLTC tap pozisyonu ayarlaması koordineli bir biçimde gerilim regülasyonu amacıyla yapılmıştır. Reaktif güç ayarlaması için eğri uydurma analitik temelli, algoritmik yapıda bir metot önerilmiştir. Önerilen metot arama temelli IAA algoritması ile karşılaştırılmıştır. Önerilen metodun hata oranı %0.4'ten az olmuştur.

Önerilen metot sayesinde reaktif güç ayarlama aşamasında yalnızca 5 güç akış akışı analizine ihtiyaç duyulmuştur. İhtiyaç duyulan yük akışı IAA'da ise, örneğin:

Durum 3 için 904'tür. Ek olarak, ihtiyaç duyulan yük akışı analizi önerilen metotta her Durumda 5'tir, ancak IAA ve benzeri arama temelli algoritmalarda, durumlara ve dağıtım sisteminin yapısına göre değişmektedir.



6. METOTLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde çalışmada ileri sürülen metotlar birbirleri ile metodolojik, performans ve analiz şartları kriterleri dikkate alınarak kıyaslanmıştır.

Bölüm 3'te OLTC tap pozisyonu, gerilim regülasyonu ve gerilim sapması minimizasyonu için eğri uydurma destekli ve analitik temelli bir metotla yapılmıştır. Bu önerilen metot, arama tabanlı olan IAA ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'te reaktif güç ayarlaması, gerilim regülasyonu amacıyla eğri uydurma tekniğinden faydalanılarak türetilen analitik ifadenin uygulanmasıyla, yapılmıştır. Metodun performans testi ise IAA ile yapılmıştır. Bölüm 5'te koordineli gerilim regülasyonu yaklaşımıyla, reaktif güç ayarlaması ve OLTC tap pozisyonu ayarlaması yapılmıştır. Ek bilgi olarak, Bölüm 4'tekine benzer şekilde, koordineli gerilim regülasyonunun reaktif güç ayarlama aşamasında eğri uydurma tekniğinden faydalanılmıştır ve bu sayede, bara gerilimleri dağıtık jeneratörün reaktif gücüne göre kuadratik ifadeler olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu ifadeler, reaktif güç ayarlama aşamasında kullanılmıştır. Koordineli metodun reaktif güç ayarlama aşamasında performans karşılaştırması da benzer şekilde IAA ile yapılmıştır. Koordineli gerilim regülasyonunun OLTC tap ayarlama aşamasında ise, reaktif güç ayarlama aşamasından farklı olarak: arama tabanlı algoritma olan IAA uygulanarak yapılmıştır. Bölüm 3 ve Bölüm 4'teki metotların analizleri yalnızca iki durum için gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5'teki metodun uygulaması ise dört durum için yapılmıştır.

Yukarıda bahsedilen metotlar belli başlı noktalarda birbirlerine benzemektedirler ve birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Benzer noktalarından biri: 3 metotta eğri uydurma tekniğinden faydalanmaktadır. Eğri uydurma tekniği; Bölüm 3'teki gerilim regülasyonu ve gerilim sapması minimizasyonu yöntemlerinde: bara akımlarının OLTC dağıtım şebekesi tarafı gerilim çıkışı (salınımın barası gerilimi) cinsinden ifade edilmesi için kullanılmıştır. Salınım barası gerilimi cinsinden bara akımlarının gerçek ve sanal kısımları cinsinden matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bölüm 4'te de benzer şekilde, eğri uydurma tekniği, ancak burada bara akımları dağıtım şebekesindeki evirici destekli DG'nin reaktif güç çıkışına bağlı olarak ifade etmek amacıyla uygulanmıştır.

Bölüm 3 ve 4'te de öne sürülen metotların ihtiyaç duyduğu yük akış analizi sayısı (gerilim ihlali tespiti, eğri uydurma tekniği uygulaması vb. için) ikidir. Bölüm 3'te

bara gerilimleri analitik olarak DLF ve bara akımları matrisi kullanılarak ifade edilmiştir, ancak Bölüm 4'te geliştirilen metotta ise DG'nin en uygun reaktif gücünü bulan ifadeyi türetmek için klasik görünür güç eşitliğinden (Eşitlik 4.1'den) faydalanılmıştır. Dahası, Bölüm 3 ve 4'te bara gerilim ve reaktif güç kısıtları, türetilen analitik ifadeler vasıtasıyla herhangi bir ek yük akışı analizi ihtiyacı oluşturmayan metotlarla sağlanmıştır. Bölüm 3'te ki metotta en uygun salınım barası gerilimi, türetilen analitik ifade kullanılarak oluşturulan çözüm adaylarını barındıran durum uzay matrisinden seçilmiştir, halbuki Bölüm 4'te en uygun reaktif güç miktarı türetilen analitik ifadenin köklerinin bulunup bunların belli kısıt filtrelerinden geçirilmesiyle: kısaca durum uzay matrisi oluşturulmadan bulunmuştur.

Bölüm 5'te ki gerilim regülasyonu için uygulanan metot Bölüm 3 ve 4'teki metotlarla karşılaştırılırsa, aşağıdaki tespitler ortaya konabilir. Bölüm 5'te eğri uydurma tekniği yardımıyla, bara gerilimleri DG'nin reaktif güç çıkışına bağlı olarak kuadratik fonksiyon olarak doğrudan elde edilmiştir. Ancak bara gerilimlerini Bölüm 3'te salınım barası gerilimine ve Bölüm 4'te de DG'nin reaktif gücüne göre ifade etmek için: bara akımlarının gerçek ve sanal kısımları, Bölüm 3'te salınım barasına göre ve Bölüm 4'te de DG reaktif güç çıkışına göre ifade edilmiştir. Kısaca, Bölüm 5'te bara gerilimleri doğrudan ilgili değişene göre ifade edilmiştir; ama Bölüm 3 ve 4'te bara gerilimleri dolaylı olarak ilgili değişkene göre matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bölüm 5'teki metotta, Bölüm 3'te olduğu gibi herhangi bir durum uzay matrisi oluşturulmamıştır, Bölüm 4'tekine benzer şekilde en uygun reaktif güç değeri türetilen analitik ifadenin köklerinin bulunup, bunların çeşitli kısıt filtrelerinden geçirilmesiyle doğrudan bulunmaktadır. Eğri uydurma tekniğini uygulamak için 5. Bölümdeki metotta beş sefer yük akışı analizi yapılır, halbuki bu Bölüm 3 ve 4'te ki metotlarda sadece ikiydi. Bu yönüyle diğer bölümlerdeki metotlara kıyasla daha fazla yük akışına ihtiyaç duyar.

Çalışmada önerilen tüm metotlar yöntemsel olarak kıyaslanmanın yanında, performansları dikkate alınarak kıyaslandığında şu noktalar ifade edilebilir; Bölüm 2'de gerilim regülasyon için önerilen metodun hata oranının %0.05'ten az olmaktadır, en düşük hata oranı bu metoda aittir. Bölüm 3 ve 4'tek ileri sürülen metotların hata oranları ise sırasıyla durumlara bağlı olarak; %0.4 ve %0.7'den az olmaktadır. Bölüm 2'de gerilim sapması minimizasyonu için önerilen metotta hata oranı yaklaşık %2.5 çıkmıştır. Metotlar arasında en yüksek hata oranına sahip olmaktadır. Özetle, önerilen metotların performansları kabul edilebilir seviyede olmaktadır.

6.1. Sonuç

Bu bölümde metotların birbirleri arasında kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama benzer ve farklı oldukları taraflarının sunulmasıyla yapılmıştır. Kıyaslama ilk olarak, metodolojik bağlamda yapılmıştır. Sonrasında ise metotlar performans (hata oranı temel alınarak) bağlamında kıyaslanmıştır. Özetle, Bölüm 3'teki OLTC tap pozisyon ayarlaması ve Bölüm 4'teki reaktif güç ayarlaması çalışmada türetilen analitik ifadelerin kullanılmasıyla yapılmıştır. Her iki bölümde de analitik ifadeleri türetmek için eğri uydurma tekniğinden faydalanılmıştır ve bunun için 2 adet yük akışı yapılması gereklidir. Bölüm 5'teki koordineli gerilim regülasyonunda ise reaktif güç ayarlaması aşaması için VAr/Volt eğrileri kullanılarak yapılmıştır. Bu eğrilerin oluşturulması için eğri uydurma tekniği kullanılmıştır ve 5 adet yük akışına ihtiyaç duyulmuştur. Koordineli gerilim regülasyonun OLTC tap pozisyonu ayarlaması ise arama temelli olan IAA ile yapılmıştır. Her üç metodun sonuçları doğrulu kanıtlanmış IAA'nın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, ortaya sürülen metotların hata oranları oldukça düşüktür. Ek olarak Metotlar herhangi bir optimizasyon problemi çözücüsüne ihtiyaç duymadıkları için hesaplama yükü oldukça az olmaktadır ve kolaylıkla uygulanabilmektedirler.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Dağıtım şebekeleri teknolojik gelişmelere dayalı olarak değişmekte, dağıtık jeneratörler, enerji depolama sistemleri, elektrikli araçlar, ısı pompaları vb. yeni enerji teknoloji sistemleri şebekeye dahil olmaktadır. Modern sistemlerle donatılan dağıtım şebekelerinde gerilim problemleri daha sıklıkla meydana gelmektedir. Bu sebeple, gerilim regülasyonu dağıtım şebekelerinin işletimi açısından çok önemli bir husus olmaktadır. Hatta, bu yeni sistemlerinin de gerilim regülasyonuna katılması için geliştirilen metotlar yüksek önem arz etmektedir.

Literatürde, gerilim regülasyonu için yapılan çalışmalarda; aktif güç ayarlaması, reaktif güç ayarlaması ve gerilim kontrol cihazlarının kullanılması metotları tercih edilmiştir. Tercih edilen metotların uygulanması, dağıtım şebekesinde kontrol edilebilen komponentlerin (OLTC tap pozisyonu, dağıtık jeneratörler, enerji depolama sistemleri vb.) gerilim regülasyonu için gerekli ayar değerlerinin bulunmasıyla yapılmıştır. Kontrol edilebilen komponentlerin gerilim regülasyonu için gerekli ayar değerleri, halihazırdaki çalışmalarda mevcut çözüm tekniklerinin (optimizasyon çözüm algoritmaları, derin öğrenme vb.) uygulanması yollarıyla bulunduğu görülmüştür. Bara gerilimlerini salınım barası gerilimine göre ve dağıtık jeneratörün reaktif gücüne göre ifade eden analitik ifadelerin ve bu ifadelerin kullanılmasıyla OLTC tap pozisyonu ve reaktif güç ayarlaması yapan metotların eksikliği tespit edilmiştir. Benzer şekilde reaktif güç ayarlaması yapan uygulaması kolay ve çözüme hızla ulaşan algoritmaların da kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı, OLTC tap pozisyonu ayarlaması bu çalışmada türetilen analitik ifadeden faydalanarak yapılmıştır. Bunun yayın sıra, reaktif güç ayarlaması, bu tez çalışması kapsamında türetilen analitik ifadeden faydalanılarak yapılmıştır. Ek olarak, reaktif güç ayarlaması yapan kullanışlı bir algoritma da geliştirilmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak, OLTC dağıtım şebekesinde gerilim ihlalini gidermek için uygun tap pozisyonunu bulan analitik temelli metot, eğri uydurma tekniğinden faydalanılarak ve sistem kısıtlarını da gözeterek, geliştirilmiştir. Ek olarak bu metot üzerinden gidilerek gerilim sapsmasını minimize eden analitik temelli metot da geliştirilmiştir. Çalışmada ikinci olarak ortaya sürülen metot şu şekildedir; dağıtım şebekesinde, dağıtık jeneratör evircisinin reaktif güç kapasitesi kullanılarak, reaktif

güç ayarlaması yapılmıştır. Gerilim regülasyonu için eviricinin en uygun reaktif güç çıkış değerini bulan analitik ifade, eğri uydurma tekniğinden faydalanılarak ve sistem kısıtlarını dikkate alarak, yalnızca iki sefer yük akışı analiz ile elde edilen sistem bilgilerini kullanarak elde edilmiştir. Son olarak, dağıtık jeneratör eviricisinin reaktif güç değerini ve OLTC tap pozisyonunu koordineli biçimde ayarlayan algoritma temelli metot türetilmiştir. Bu metot reaktif güç ayarlama aşamasında yalnızca 5 adet güç akışına ihtiyaç duymaktadır ve OLTC tap pozisyonu aşamasında ise ihtiyaç duyulan güç akışı sayısı maksimumum OLTC tap pozisyon sayısı kadardır.

Özetle, bu çalışmada gerilim regülasyonu ve gerilim profili iyileştirmesi için OLTC tap pozisyonu ile ilgili analitik ifade elde edilmiştir. OLTC tap pozisyonu ayarlaması ve dağıtık jeneratör eviricisinin reaktif güç ayarlaması analitik temelli yaklaşımla yapılarak çözüme çok daha az hesaplama süresi harcanarak ulaşılmıştır. Bunun sebebi analitik ifade ile problem çözüm doğru bir şekilde formülasyonun zahmetli olmasına karşın, problem çözüm ifadesinin formüle edildikten sonra yalnızca cebirsel işlemler kullanılarak çözüme ulaşılabilmektedir. Ek olarak, OLTC ve dağıtık jeneratör koordineli olarak gerilim regülasyonuna katılmıştır. Bu sayede reaktif güç ayarlamasının yeterli olmadığı durumlarda OLTC devreye girerek gerilim ihlali ortadan kaldırılmıştır ve bu koordinasyon ile ilk olarak reaktif güç ayarlaması yapılarak OLTC tap hareket sayısı azaltılmıştır. Koordineli yaklaşımda reaktif güç ayarlamasının algoritmik yaklaşımla yapılmasıyla doğru çözüme hızlı ve kolay hesaplarla ulaşılmıştır.

7.2. İleriye Yönelik Çalışmalar

Bu çalışmada yapılan geliştirilen metotlar radyal dağıtım şebekelerinde gerilim ihlal problemlerinin üstesinden hızlı ve güvenilir şekilde üstesinden gelmeyi sağlamaktadır. Çalışma aşağıdaki alanlara uygulanabilir ve çalışma genişletilebilir;

- OLTC tap pozisyonu ayarlamasını yapan analitik temelli metot (DLF matrisini kullanan), aktif güç kaybı minimizasyonu, reaktif güç minimizasyonu veya çoklu amaç kapsamında hepsinin dahil edildiği probleme uygulanabilir.
- Gerilim regülasyonu için uygulanan analitik temelli metot, aynı yaklaşımla aktif güç ayarlaması (AGK ayarlaması, enerji depolama birimlerinin aktif güç çıkışını ayarlamak vb.) içinde kullanılabilir.

- Tekli dağıtık jeneratör için geliştirilen reaktif güç ayarlayan analitik temelli metot, çoklu dağıtık jeneratörler için uyarlanıp koordineli şekilde uygulanabilir. Ek olarak bu ifade aktif güç ayarlaması için ufak değişikliklerle uyarlanabilir.
- Tek bir dağıtık jeneratör için reaktif güç ve OLTC tap pozisyonu ayarlamasını koordineli biçimde yapan algoritma temelli metot, birden fazla dağıtık jeneratör olduğu durum için uyarlanabilir.
- Koordineli gerilim regülasyonu yapan metot, bara gerilimlerini belli aralıklarda tutma amacının yanında, beraberinde aktif ve/veya reaktif güç kaybı minimizasyonu içinde uyarlanabilir.
- Bu tez kapsamında önerilen metotlar dengeli ve sabit yüklerin olduğu dağıtım şebekeleri içindir, bu metotlar dengesiz yük durumlarının olduğu ve dinamik yüklerin olduğu dağıtım şebekeler için uyarlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Harrison G. P., Wallace A. R., “Network Integration of CHP or It ’s the Network, Stupid !”, Technical Report No: GR/NO4744), Institute for Energy Systems, University of Edinburgh, UK.
- [2] Aslan A., Ocal O., Ozsolak B., Ozturk I., (2022), “Renewable energy and economic growth relationship under the oil reserve ownership: Evidence from panel VAR approach”, *Renewable Energy*, 188, 402-410.
- [3] Naqvi S., Wang J., Ali R., (2022), “Towards a green economy in Europe: does renewable energy production has asymmetric effects on unemployment?” *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (13), 18832-18839.
- [4] Oskouei M. Z., Şeker A. A., Tunçel S., Demirbaş E., Gözel T., Hocaoğlu M. H., Abapour M., Mohammadi-Ivatloo B. , (2022),“A Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network,” *Sustainability*, 14 (4).
- [5] Stecca M., Elizondo L. R., Soeiro T. B., Bauer P., Palensky P., (2020), “A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks,” *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, (1) 1, 46-65.
- [6] Gözel T., Hocaoglu M. H., (2009), “An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems,” *Electric power systems research*, 79 (6), 912-918.
- [7] Piccolo A., Siano P., (2009), “Evaluating the impact of network investment deferral on distributed generation expansion,” *IEEE Transaction on Power System*, 24 (3), 1559-1567.
- [8] Maradin D., (2021), “Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization”, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11 (3), 176-183.
- [9] Howlader A. M., Sadoyama S., Roose L. R., Chen Y., (2020), “Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters,” *Applied Energy*, 258, 114000.
- [10] Mahmud N., Zahedi A., (2016), “Review of control strategies for voltage regulation of the smart distribution network with high penetration of renewable distributed generation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 582-595.
- [11] Benabid R., Berizzi A., Bovo C., Ilea V., Boudour M., (2014), “A new modeling

and placement of shunt FACTS devices in the secondary voltage regulation environment”, *Electrical Engineering*, vol. 96 (4), 359-366.

- [12] Sarimuthu C. R., Ramachandaramurthy V. K., Agileswari K. R., Mokhlis H., “A review on voltage control methods using on-load tap changer transformers for networks with renewable energy sources”, (2016), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1154-1161.
- [13] Stanelytė D., Radziukynas V., (2022), “Analysis of Voltage and Reactive Power Algorithms in Low Voltage Networks”, *Energies*, 15 (5), 1843.
- [14] Robbins B. A., Zhu H., Dominguez-Garcia A. D., (2016), “Optimal tap setting of voltage regulation transformers in unbalanced distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31 (1), 256-267.
- [15] Lu M., Bao Y., (2021), “Multi-objective Optimization of Distribution Network Based on On-Load-Tap Changer”, *The 5th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, 2197-2201, Taiyuan, China, 22-25 October.
- [16] Wu W., Tian Z., Zhang B., (2017), “An Exact Linearization Method for OLTC of Transformer in Branch Flow Model”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32 (3), 2475-2476.
- [17] Li C., Disfani V. R., Pecenak Z. K., Mohajeryami S., Kleissl J., (2018), “Optimal OLTC voltage control scheme to enable high solar penetrations”, *Electric Power Systems Research*, 160, 318-326.
- [18] Xu H., Domínguez-García A. D., (2019), “Optimal tap setting of voltage regulation transformers using batch reinforcement learning”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(3), 1990-2001.
- [19] Salman S. K., Wan Z. G., (2007), “Voltage control of distribution network with distributed/embedded generation using fuzzy logic-based AVC relay”, *42nd International Universities Power Engineering Conference*, 576-579, Brighton, UK, 4-6 September.
- [20] Ghosh S., Rahman S., Pipattanasomporn M., (2017), “Distribution Voltage Regulation Through Active Power Curtailment With PV Inverters and Solar Generation Forecasts,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8 (1), 13-22.
- [21] Li B., Chen M., Cheng T., Li Y., Hassan M. A., Ruilin X. U., Chen T., “Distributed Control of Energy-Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Network with High PV Penetration”, (2018), *2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*, 9 (4), 169-173, Sheffield, UK, 5-7 September.
- [22] Cao D., Hu W., Zhao J., Huang Q., Chen Z., Blaabjerg F., (2020), “A Multi-Agent deep reinforcement learning based voltage regulation using coordinated pv inverters”, *IEEE Transactions Power Systems*, 35 (5), 4120-4123.

- [23] Jahangiri P., Aliprantis D. C., (2013), “Distributed Volt/VAR control by PV inverters”, IEEE Transactions on Power Systems, 28 (3), 3429-3439.
- [24] Ma W., Wang W., Chen Z., Wu X., Hu R., Tang F., Zhang W., (2021), “Voltage regulation methods for active distribution networks considering the reactive power optimization of substations”, Applied Energy, 284 (November 2020), 116347.
- [25] Weckx S., Gonzalez C., Driesen J., “Combined central and local active and reactive power control of PV inverters,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5 (3), 776-784.
- [26] El Moursi M. S., Zeineldin H. H., Kirtley J. L., Alobeidli K., (2014), “A dynamic master/slave reactive power-management scheme for smart grids with distributed generation”, IEEE Trans. Power Deliv., 29 (3), 1157-1167.
- [27] Sun H., Guo Q., Qi J., Ajjarapu V., Bravo R., Chow J., Li Z., Moghe R., Nasr-Azadani E., Tamrakar U., Taranto GN., “Review of Challenges and Research Opportunities for Voltage Control in Smart Grids”, (2019), IEEE Transactions on Power Systems, 34 (4), 2790-2801.
- [28] Farag H. E. Z., El-Saadany E. F., (2013), “A novel cooperative protocol for distributed voltage control in active distribution systems,” IEEE Transactions on Power Systems, 28 (4), 1645-1656.
- [29] Rogers K. M., Klump R., Khurana H., Aquino-Lugo A. A., T. J. Overbye, (2010), “An authenticated control framework for distributed voltage support on the smart grid”, IEEE Transactions on Smart Grid, 1 (1), 40-47.
- [30] Ji H., Wang C., Li P., Zhao J., Song G., Ding F., Wu J. A., (2018), “A centralized-based method to determine the local voltage control strategies of distributed generator operation in active distribution networks”, Applied Energy, 228 (June), 2024-2036.
- [31] Da Silva E. L., Lima A. M. N., Corrêa M. B. R., Vitorino M. A., Barbosa L., (2016), “A new centralized active and reactive power control strategy for voltage regulation in power distribution networks with high penetration of photovoltaic generation,” 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 823–828, Belo Horizonte, Brazil, 16-19 October.
- [32] Bignucolo F., Caldon R., Prandoni V., (2008), “Radial MV networks voltage regulation with distribution management system coordinated controller”, Electric Power Systems Research, 78 (4), 634-645.
- [33] Kulmala A., Repo S., (2014), “Including Several Distributed Energy Resources”, IEEE Transactions on Smart Grid, 5 (4), 2010-2020.
- [34] Cagnano A., De Tuglie E., (2015), “Centralized voltage control for distribution networks with embedded PV systems”, Renewable Energy, 76, 173-185.

- [35] Caldognetto T., Buso S., Tenti P., Brandao D. I., (2015), “Power-Based Control of Low-Voltage Microgrids”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3 (4), 1056-1066.
- [36] Tapia G., Tapia A., Ostolaza J. X., (2007), “Proportional-integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22 (2), 488-498.
- [37] Q. Yang, L. Jiang, H. Zhao, and H. Zeng, “Autonomous voltage regulation and current sharing in islanded multi-inverter DC Microgrid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6429–6437, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2712658.
- [38] Reshikeshan S. S. M., Matthiesen S. L., Illindala M. S., Renjit A. A., Roychowdhury R., (2021), “Autonomous Voltage Regulation by Distributed PV Inverters with Minimal Inter-node Interference”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57 (3), 2058-2066.
- [39] Shahin M., Topriska E., Gormley M., Nour M., (2022), “Design and field implementation of smart grid-integrated control of PV inverters for autonomous voltage regulation and VAR ancillary services,” *Electric Power Systems Research*, 208 (August 2021).
- [40] Wang Y., Xu Y., Tang Y., Syed M. H., Guillo-Sansano E., Burt G. M., “Decentralised-distributed hybrid voltage regulation of power distribution networks based on power inverters”, (2019), *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13 (3), 444-451.
- [41] Vaccaro A., Zobaa A. F., (2011), “Cooperative fuzzy controllers for autonomous voltage regulation in Smart Grids”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2 (1), 1-10.
- [42] Wang X., Wang C., Xu T., Guo L., Li P., Yu L., Meng H., (2018), “Optimal voltage regulation for distribution networks with multi-microgrids”, *Applied Energy*, 210 (July 2017), 1027-1036, 2018.
- [43] Wang S., Duan J., Shi D., Xu C., Li H., Diao R., Wang Z., (2020), “A Data-Driven Multi-Agent Autonomous Voltage Control Framework Using Deep Reinforcement Learning”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 35 (6), 4644-4654.
- [44] Jabr R. A., (2019), “Robust volt/VAr control with photovoltaics,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 34 (3), 2401-2408.
- [45] Wang L., Dubey A., Gebremedhin A. H., Srivastava A. K., Schulz N., (2022), “MPC-Based Decentralized Voltage Control in Power Distribution Systems with EV and PV Coordination”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13 (4), 2908-2919.
- [46] Feng C., Li Z., Shahidehpour M., Wen F., Liu W., Wang X., (2018),

- “Decentralized short-term voltage control in active power distribution systems”, IEEE Transactions on Smart Grid, 9 (5), 4566-4576.
- [47] Aryanezhad M., (2018), “Management and coordination of LTC, SVR, shunt capacitor and energy storage with high PV penetration in power distribution system for voltage regulation and power loss minimization”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 100 (December 2017), 178-192.
- [48] Ammar M., Sharaf A. M., (2019), “Optimized Use of PV Distributed Generation in Voltage Regulation: A Probabilistic Formulation”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15 (1), 247-256.
- [49] Jafari M. R., Parniani M., Ravanji M. H., (2022), “Decentralized Control of OLTC & PV Inverters for Voltage Regulation in Radial Distribution Networks with High PV Penetration”, IEEE Transactions on Power Delivery, 37 (6), 4827-4837.
- [50] Li P., Ji H., Wang C., Zhao J., Song G., Ding F., Wu J., (2017), “Coordinated Control Method of Voltage and Reactive Power for Active Distribution Networks Based on Soft Open Point”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 8 (4), 1430-1442.
- [51] Andreotti A., Petrillo A., Santini S., Vaccaro A., Villacci D., (2019), “A decentralized architecture based on cooperative dynamic agents for online voltage regulation in smart grids”, Energies, 12 (7).
- [52] Wu H., Huang C., Ding M., Zhao B., Li P., “Distributed cooperative voltage control based on curve-fitting in active distribution networks”, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 5 (5), 777-786, 2017.
- [53] Web 1, (2020), Cao D., Zhao J., Hu W., Ding F., <https://arxiv.org/abs/2006.00546>, (Erişim tarihi: 06/10/2020).
- [54] Teng J. H., Chang C. Y., (2020) ,“A network-topology-based capacitor control algorithm for distribution systems”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2 (ASIA PACIFIC), 1158-1163, Yokohama, Japan.
- [55] Baran M. E., Wu F. F., (1989), “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing”, IEEE Transactions on Power delivery., 9 (4), 101-102.
- [56] Gözel T., (2009), “Dağıtım Sistemlerine Yerel Elektrik Santrallerinin Yerleştirilmesi”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Süleyman TUNÇEL 2013 yılında, T.O.B.B Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini 2015-2017 yılları arasında Hacettepe Üniversitesi Temiz Tükenmez Enerjiler Bölümünde tamamladı. 2017 yılından itibaren Gebze Teknik Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Halen, Gebze Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünde doktora öğrencisidir. Tübitak ve Avrupa Birliği projelerinde bursiyer olarak görev almıştır. Uluslararası bilimsel endekslerde taranan dergilerde yayımları bulunmaktadır. İlgi alanları şu şekildedir; dağıtık üretim, güç sistemleri analizi ve optimizasyonu, enerji depolama uygulamaları, yapay zekâ uygulamaları ve insansız hava araçlarıdır.