T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN ANORMAL İŞLETİM KOŞULLARI ALTINDA TOPOLOJİ BELİRLEME VE DAYANIKLILIK ODAKLI RESTORASYON STRATEJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Abdurahman YALDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ATEŞ

Temmuz, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN ANORMAL İŞLETİM KOŞULLARI ALTINDA TOPOLOJİ BELİRLEME VE DAYANIKLILIK ODAKLI RESTORASYON STRATEJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Abdurahman YALDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 13.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ozan Erdinç	Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ATEŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Celal Bayar Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ozan Erdinç, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıfat BOYNUEĞRİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Kübra ERENOĞLU, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ'in sorumluluğunda tarafımdan hazırlanan "Dağıtım Sistemleri için Anormal İşletme Koşulları Altında Topoloji Belirleme ve Dayanıklılık Odaklı Restorasyon Stratejisinin Geliştirilmesi" başlıklı çalışmada, veri toplama ve veri kullanımı için gerekli tüm yasal izinleri almış bulunmaktayım. Çalışma kapsamında kullanılan diğer kaynaklardan elde ettiğim bilgileri ana metin ve referanslarında eksiksiz bir şekilde gösterdim. Araştırma verileri ve sonuçlarıyla ilgili olarak çarpıtma veya sahtecilik yapmadığımı taahhüt ediyorum. Çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde, her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Abdurahman YALDIZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren, ilgisini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ'e ve çalışmalarımın her aşamasında özverili bir şekilde bana destek olan eş-danışmanım Dr. Yavuz ATEŞ'e teşekkürlerimi sunarım. Değerli görüşleri ve tecrübeleri sayesinde çalışmalarımı daha ileriye taşımamda büyük katkı sağladılar. Aynı şekilde çalışmalarımda desteklerini esirgemeyen Dr. Tayfur GÖKÇEK'e teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Aileme sevgi ve destekleriyle her zaman yanımda oldukları için minnettarım. Çalışmalarım boyunca bana gönülden destek veren arkadaşlarıma ve YALDIZ ailesine teşekkür ederim.

Abdurahman YALDIZ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iii
SİMGE LİSTESİ v
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xiii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 11
1.3 Tezin Katkıları 12
2 GÜÇ SİSTEM TOPOLOJİSİ 13
2.1 Güç Sistemi Topoloji Bilgisi 14
2.2 Faz Belirleme 14
2.3 Güç Sistemi Dayanıklılığında Topoloji Bilgisinin Etkisi 16
2.4 Topoloji Tanımlamada Kullanılan Yöntemler 17
3 METODOLOJİ 24
3.1 Veri İzinsiz Giriş Saldırısı Tespiti İçin Önerilen Model 26
3.2 Topoloji Bilgisi için Önerilen Model 28
3.3 Yük Restorasyonu için Önerilen Optimizasyon Modeli 33
4 TEST VE SONUÇLAR 38
4.1 Giriş Verileri 39
4.2 Benzetim Sonuçları 42
5 SONUÇ VE ÖNERİLER 49
KAYNAKÇA 50
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 59

SİMGE LİSTESİ

Ω_i^f	Alt İstasyon Bara Kümesi İndeksi
$i \in I$	Bara Kümesi İndeksi
$R_{i,e}^{EAİ}$	Bara i'deki Elektrikli Araç İstasyonundaki e Elektrikli Aracın Şarj/Deşarj Oranı
$\mathcal{E}_{i,e}^{EAİ,maks}$	Bara i'deki Elektrikli Araç İstasyonundaki e Elektrikli Aracın Toplam Maksimum Enerji Kapasitesi [kWh]
$\mathcal{E}_{i,e}^{EAİ,min}$	Bara i'deki Elektrikli Araç İstasyonundaki e Elektrikli Aracın Toplam Minimum Enerji Durumu [kWh]
$\mathcal{P}_{i,l,t}^{yük,kri}$	Bara i'deki Kritik Yük l'nin t Döneminde Güç Talebi [kW]
$\mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,kri}$	Bara i'deki Kritik Yük l'nin t Döneminde Kurtarılabilen Güç [kW]
$\mathcal{P}_i^{maks}$	Bara i'nin Güç Akış Kapasitesi [kW]
η_i^{verim}	Bara i'nin Şebeke Destek Sistemlerindeki Kaynakların Verimliliği
$\mathcal{E}_{i,g}^{ŞDS,baş}$	Bara i'deki Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için Başlangıç Enerji Durumu [kWh]
$\mathcal{E}_{i,g}^{ŞDS,maks}$	Bara i'deki Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için Toplam Maksimum Enerji Kapasitesi [kWh]
$\mathcal{E}_{i,g}^{ŞDS,min}$	Bara i'deki Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için Toplam Minimum Enerji Kapasitesi [kWh]
$\mathcal{E}_{i,e}^{EAİ,baş}$	Bara i'de Yer Alan Araçtan Şebeke Aktarılan Güç için Elektrikli Araçların Başlangıç Enerji Durumu [kWh]
$\mathcal{P}_{i,t}^{f}$	Bara i'den Alt İstasyonlara t Dönemindeki Toplam Aktif Güç Akışı [kW]
$\mathcal{P}_{i,t}^{f,yük}$	Bara i'deki t Dönemindeki Generatör Tarafından Sağlanan Aktif Güç [kW]
$\mathcal{P}_{i,l,t}^{yük,n}$	Bara i'deki Yük l'nin t Döneminde Güç Talebi [kW]
$\mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,n}$	Bara i'deki Yük l'nin t Döneminde Kurtarılabilen Güç [kW]
ΔT	Bir Saat İçindeki Zaman Dilimi Sayısı
$e \in E$	Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Kümesi İndeksi

$\mathcal{E}_{i,e,t}^{EA\dot{I}}$	Elektrikli Araç İstasyonundaki e Elektrikli Aracın t Dönemindeki Enerji Durumu [kWh]
$\mathcal{P}_{i,e,t}^{EA\dot{I},disc}$	Elektrikli Araç İstasyonundaki e Elektrikli Aracın t Dönemindeki Deşarj Gücü [kW]
$\mathcal{P}_{i,e,t}^{EA\dot{I},ch}$	Elektrikli Araç İstasyonundaki e Elektrikli Aracın t Dönemindeki Şarj Gücü [kW]
$b \in \mathrm{B}$	Enerji Dağıtım Branş Kümesi İndeksi
T_e^{var}	e Elektrikli Aracı için Geliş Zamanı
f_b^{maks}	Hat b için Maksimum Güç Akış Kapasitesi [kW]
$s \in S$	Hasarlı Lokasyonlar Kümesi İndeksi
$\varphi_{i,t}^{EA\dot{I}}$	İkili Değişken: Bara i için t Döneminde Elektrikli Araç İstasyonundaki e Elektrikli Aracı için Şarj/Deşarj Sırasında 1, Aksi Halde 0
$\varphi_{i,t}^{\dot{S}DS}$	İkili Değişken: Bara i için t Döneminde Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için Şarj/Deşarj Sırasında 1, Aksi Halde 0
$\mathcal{P}_{i,t}^{GTS}$	Kesinti Döneminde Bara i için Kaynaklar Tarafından Sağlanan Toplam Güç
$\mathcal{P}_{i,t}^{MGSC}$	Kesinti Döneminde Bara i için Mobil Generatörler Tarafından Sağlanan Güç
T^{olay}	Kesinti Olay Zamanı
X_p/Y_p	Küme p'nin X/Y Koordinat Noktası
$\mathcal{P}_{i,l,t}^{y\ddot{u}k,n}$	l Yükünün t Döneminde Bara i'deki Güç Talebi [kW]
g_i^{lim}	Mobil Generatörlere Bağlı i Barası için Maksimum Kapasite Limiti
$p \in P$	Noktalar Kümesi İndeksi
$R_{i,g}^{\dot{S}DS}$	Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için Şarj/Deşarj Oranı
$\mathcal{E}_{i,g,t}^{\dot{S}DS}$	Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için t Dönemindeki Batarya Enerji Durumu [kWh]
$\mathcal{P}_{i,g,t}^{\dot{S}DS,disc}$	Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için t Dönemindeki Deşarj Gücü [kW]
$\mathcal{P}_{i,g,t}^{\dot{S}DS,ch}$	Şebeke Depolama Sistemindeki g Depolama Birimi için t Dönemindeki Şarj Gücü [kW]

$g \in G$	Şebeke Depolama Sistemi Kümesi İndeksi
α, β, δ	Önem Katsayısı için Olasılıksal Katsayı
$\mathcal{P}_{b,t}^{kyp}$	t Döneminde Bara b'deki Güç Kayıpları [kW]
$f_{b,t}$	t Döneminde Bara b Üzerinden Aktif Güç Akışı [kW]
$F_{b,t}$	t Döneminde Bara b Üzerindeki Yaklaşık Karesi Aktif Güç Akışı $[kW^2]$
$\mathcal{P}^{kyp,t}$	Toplam Güç Kayıpları [kW]
$z_{b,t,p}$	t Periyodu İçerisinde Kayıpları Bulmada Lineerleştirme için SOS2 Değişkeni
$l \in L$	Yük Kümesi İndeksi
$t \in T$	Zaman Kümesi İndeksi
$\mathcal{P}_{i,t}^{FV}$	Zaman t'de Bara i'deki Fotovoltaik Sistemin Sağladığı Güç [kW]

KISALTMA LİSTESİ

AG	Alçak Gerilim
CNN	Evrişimli Sinir Ağı
DEK	Dağıtılmış Enerji Kaynaklarının
DIAD	Veri İstilası Saldırı Tespiti (Data Intrusion Attack Detection)
DSO	Dağıtım Sistem Operatörü
EA	Elektrikli Araçlar
EAİ	Elektrikli Araç İstasyonu
FB	Faz Belirleme
FDIA	Sahte Veri Enjeksiyonu (False Data Injection Attack)
FV	Fotovoltaik
GAMS	General Algebraic Modeling System
GIS	Coğrafi Bilgi Sistemi
GSD	Güç Sistem Dayanıklılığı
MST	En Küçük Gerilim Ağacı (Minimum Spanning Tree)
MŞ	Mikro Şebeke
TT	Topoloji Tanımlama
MILP	Karmaşık Tam Sayılı Lineer Programlama
KY	Kesinti Yönetimi
SM	Akıllı Sayaç (Smart Meter)
ŞDB	Şebeke Destek Birimleri
ŞDS	Şebeke Depolama Sistemi
PMU	Fazör Ölçüm Birimi (Phasor Measurement Unit)
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 TT'nin Kullanıldığı Alanların Genel Gösterimi **13**
Şekil 3.1 Önerilen TT ve GSD'nin Genel Gösteri **24**
Şekil 3.2 Önerilen DIAD ve Restorasyon Modelinin İşleyiş Şeması **26**
Şekil 3.3 CNN Mimarisi Kullanılarak Yapılan DIAD Modelinin Gösterimi **27**
Şekil 3.4 Faz Belirleme ve Abnormal Durum Tespit Algoritmasi Gösterimi **30**
Şekil 3.5 Önerilen Graf Modeli Çalışma Prensibi **32**
Şekil 4.1 Önerilen Şebeke Model Mimarisinin Gösterimi **38**
Şekil 4.2 FV Sistem Üretim Profili **40**
Şekil 4.3 Son Kullanıcı Gerilim Profili **41**
Şekil 4.4 Gürültü Seviyesine Bağlı Gerilim Değişimi **41**
Şekil 4.5 Durum-1 için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi **44**
Şekil 4.6 Durum-1 ŞDB'nin Enerji Alışverişi **44**
Şekil 4.7 Durum-2 için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi **45**
Şekil 4.8 Durum-2 için ŞDB'nin Enerji Alışverişi **45**
Şekil 4.9 Durum-3 için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi **46**
Şekil 4.10 Durum-3 için ŞDB'nin Enerji Alışverişi **46**
Şekil 4.11 Durum Koşulları için Kayıplar **47**
Şekil 4.12 Kısa Süreli Kesinti için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi **47**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 TT için Literatür Çalışmalarının İncelemesi **6**
Tablo 1.2 FB için Literatür Çalışmalarının İncelemesi **9**
Tablo 1.3 GSD için Örnek Literatür Çalışmaları **11**
Tablo 3.1 CNN Modeli Paremetre Bilgileri **28**
Tablo 3.2 Spektral Kümeleme Çalışma Yapısı Özet Gösterimi **30**
Tablo 3.3 Önerilen Model için Terminoloji **33**
Tablo 4.1 Önerilen Sistemde Yük, Kaynak Sayıları ve Konumu **39**
Tablo 4.2 Şebeke Destek Birim Noktası Kaynaklatın Elektriksel Özellikleri **40**
Tablo 4.3 Elektrikli Araçların Genel Karakteristikleri **40**
Tablo 4.4 Gürültü Seviyesine Bağlı TT ve FB Başarı Oranı **43**
Tablo 4.5 Yük Restorasyon Durum Koşulları için Sonuçlar **43**
Tablo 4.6 Kullanılan ŞDS Birimine Bağlı Restorasyon Oranı Gösterimi **48**

ÖZET

Dağıtım Sistemleri için Anormal İşletme Koşulları Altında Topoloji Belirleme ve Dayanıklılık Odaklı Restorasyon Stratejisinin Geliştirilmesi

Abdurahman YALDIZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ATEŞ

Son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynaklarının ve elektrikli araçlardaki artış, iklim değişikliği ile bağlantılı doğa olayları elektrik güç sisteminin stabil ve güvenli çalışmasını engellemektedir. Bu durum uygun bir topoloji ve dengeye sahip güç sistemlerinin önemini daha da arttırmıştır. Bu yüzden son yıllarda güç sistemi dayanıklılığı üzerine yapılan araştırmalar önemli bir ivme kazanmıştır. Bu araştırmalar, geniş kapsamlı siber saldırılar, depremler ve seller gibi felaket durumlarına hızlı ve koordineli bir şekilde yanıt verme kapasitesini artırmayı amaçlamaktadır. Önerilen yöntemler güç sistemlerinin daha etkin yönetilmesini sağlamakta ve kesintisiz elektrik hizmeti sunmaktadır.

Bu tezde güç sisteminde durum tahmini, planlama ve yeniden yapılandırma gibi birçok konuda kritik önem sahip güç sistem topoloji elde edilmektedir. Önerilen yaklaşım topoloji saldırılarına maruz kalan elektrik güç sistemlerinde hızlı ve doğru topoloji kontrolü sağlamak amacıyla sunulmaktadır. Elde edilen topoloji bilgisiyle

hatalı noktaları belirleyerek ve mikro şebeke (MŞ) grupları oluşturarak güvenli bir elektrik şebekesi oluşturmayı amaçlamaktadır. Makine öğrenme teknikleri, izinsiz giriş saldırısı algılama (DIAD) sistemine entegre edilmiş ve bu sayede manipüle edilmiş veya hatalı akıllı sayaçların (SM) tespit edilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada, olay öncesi ve olay sonrası tam hata konumlarını belirlemek ve MŞ bölge restorasyonu için ileri düzey bir topoloji tanımlama (TT) tabanlı grafik öğrenme algoritması önerilmiştir. TT bölgesinin tespiti sonrası ise MŞ bölgelerinde yük restorasyon sürecini optimize etmek için bir karışık tam sayılı doğrusal programlama (MILP) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım şebeke depolama sistemleri (ŞDS), fotovoltaik sistemler (FVs), elektrikli araç şarj istasyonları (EAİ) ve mobil generatörler gibi güç sisteminde esneklik ve acil durum güç dengelemesi sağlayan sistemleri kullanarak, kritik yüklerin minimum kayıp ve en kısa sürede eski durumuna getirilmesini hedeflemektedir. Modelin değerlendirilmesi sonucunda, çeşitli topoloji saldırısı durumlarında yük kurtarma süreçlerinin etkinliğini doğrulayan sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında ayrıca güç sistemi topolojisi, faz belirleme ve güç sistemi dayanıklılığına etkisi konu başlıkları altında detaylı bir TT derleme çalışması literatürde ilk kez sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı sayaçlar, faz belirleme, güç sistem dayanıklılığı, şebeke destek depolama sistemi, topoloji tanımlama, optimizasyon.

ABSTRACT

Development of Topology Determination and Resiliency-Oriented Restoration Strategy for Distribution Systems under Abnormal Operating Conditions

Abdurahman YALDIZ

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ

Co-supervisor: Assist. Prof. Dr. Yavuz ATEŞ

As we witness an accelerated transition towards renewable energy sources and an increase in electric vehicle adoption, there's a subsequent rise in challenges related to climate change within our electrical grids. This situation has further emphasized the importance of power systems with appropriate topology and balance. Consequently, research on power system resilience has gained significant momentum, aiming to enhance the capacity to respond rapidly and cohesively to catastrophic events such as extensive cyber-attacks, earthquakes, and floods. The proposed methods enable more efficient management of power systems and provide uninterrupted electricity service.

This thesis focuses on obtaining critical power system topology, which plays a crucial role in various aspects such as state estimation, planning, and reconfiguration. The proposed approach aims to provide fast and accurate topology control for electrical power systems that are susceptible to topology attacks. By identifying faulty points and forming microgrid (MG) groups, the goal is to establish a secure electric grid. Machine learning techniques are integrated into the

data intrusion attack detection (DIAD) system, enabling the detection of manipulated or faulty smart meters. In this study, an advanced topology identification (TI)-based graph learning algorithm is proposed to determine complete fault locations before and after events and to facilitate MG zone restoration. After determining the TI regions, a mixed-integer linear programming (MILP) approach is used to optimize the load restoration process in the MG regions. This approach aims to minimize losses and restore critical loads to their previous state as quickly as possible, utilizing flexibility and emergency power balancing systems such as grid-supported energy storage systems (GSS), photovoltaic systems (PV), electric vehicle charging stations (EVCS), and mobile generators. Evaluation of the model yields results that confirm the effectiveness of the load restoration process in various topology attack scenarios.

Furthermore, within the scope of this thesis, a detailed compilation of topology identification (TI) is presented for the first time in the literature, discussing its impact on power system topology, phase identification, and system resilience.

Keywords: Grid support storage system, optimization, phase identification, resiliency, smart grid, topology identification.

1
GİRİŞ

Güç sistemi topolojisi bilgisi, elektrik şebekesinin etkin bir şekilde tasarlanması, planlanması ve işletilmesi için büyük önem taşır. Bu bilgi şebekenin bileşenlerini, devrelerini ve elemanlarını düzenli ve doğru bir şekilde tanımlayarak şebekenin yapısını haritalandırmaktadır. Doğru bir topoloji tanımı, güç sisteminin stabilitesini ve performansını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Modern elektrik şebekeleri, bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Bu zorluklar arasında siber saldırılar, doğal afetler ve diğer yıkıcı olaylar yer alır [1]. Bu nedenle, güç sistemi operatörleri, güç sistemi dayanıklılığına ve acil durumlarla başa çıkabilme yeteneğine büyük önem vermektedir.

Güç sistemi topolojisi, sistemin durumunu değerlendirmek, performansını analiz etmek ve elektrik kesintileri sonrası restorasyon gerektiren alanları belirlemek için kullanılır. Ancak topoloji saldırıları gibi tehditler, bu bilgilerin güvenliğini tehlikeye atarak geniş çaplı kesintilere ve güç altyapısının hasar görmesine yol açabilir [2].

Bu nedenle güç sistemi yöneticileri ve araştırmacılar güç sistemi topolojisinin güvenliğini sağlamak ve dayanıklılığı arttırmak için çeşitli önlemler almaktadır. Planlama, hazırlık ve optimum yük kurtarma yöntemleri gibi stratejiler, güç sisteminin kararlılığını korumak, büyük kesintileri önlemek ve maliyetleri düşürmek için önemli rol oynamaktadır.

Güç sistemi topolojisi bilgisi, elektrik şebekelerinin doğru bir şekilde işletilmesi ve güvenliklerinin sağlanması için kritik bir faktördür. Doğru tanımlanmış bir topoloji, sistemin dayanıklılığını artırır ve acil durumlarla başa çıkma yeteneğini güçlendirir. Güç sistemleriyle ilgili çalışmalarda bu nedenle topoloji bilgisine odaklanmak büyük önem taşır. Bu tehditlere karşı, güç sistemleri yöneticileri ve araştırmacılar, topolojik verinin güvenliğini sağlamak ve güç sistemlerinin dayanıklılığını arttırmak için çeşitli stratejiler geliştirmektedirler. Bu stratejiler arasında planlama, hazırlık ve optimal yük kurtarma yöntemleri bulunur. Bu çalışmada, izinsiz giriş

saldırısı (DIAD) algılama sistemi aracılığıyla gerçekleştirilen hızlı bir restorasyon süreci ile elektrik kesintilerinin süresi ve etkisi azaltılmaktadır. Bu sürecin ana bileşenleri, şebeke topolojisi analizi, yük dağıtımı optimizasyonu, enerji depolama sistemlerinin etkin kullanımı, akıllı sayaç (SM) verilerinin kullanımı, mikro şebeke (MŞ) oluşturma ve yönetimi, arıza tespiti ve yer belirleme gibi unsurları içerir.

1.1 Literatür Özeti

Güç sistem topolojisinin bulunması, elektrik şebekesinde kötü niyetli saldırı ve kesintilerin tespiti, güç sistemi dayanıklılığı kısmında olay sonra restorasyon için birçok çalışma yer almaktadır.

1.1.1 Topoloji için Literatür İncelenmesi

Doğru bir topoloji elde etmek için, sürekli olarak büyüyen veri toplama ve iletişim altyapısını kullanarak herhangi ölçüm cihazı gibi ek maliyeti olmayan veriye dayalı yaklaşımlar bulunmaktadır. Yalnızca son kullanıcılarda ölçülen dengelenmiş gerilim ve enjeksiyon kullanarak gerçek şebeke topolojisi ve empedanslarını geri kazanmak için iki kesin öğrenme algoritması ile ilgili çalışılmıştır [3]. Sınırlı sayıda SM ile uygulanabilen, radyal olarak işletilen düşük gerilim şebekesinde de topoloji tanımlama (TT) tespiti yapılmaktadır [4]. Zaman zaman bilinçsiz değişikliklerden dolayı alçak gerilim (AG) seviyesinde şebeke bağlantı bilgisi genellikle mevcut olmadığından, enerji ölçümlerinin zaman serileri üzerinden PCA-graf teori gibi yöntemler ile çözüm sağlanabilmektedir [5].

Ölçüm cihazları, sensör ve benzeri ekipman kullanılarak topoloji elde etme yöntemleri, bir sistemin veya şebeke yapısal özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Faz farkı ölçümü iki noktada yapılan gerilim veya akım ölçümleri arasındaki faz farkı hesaplanarak, bu noktalar arasındaki bağlantı hakkında bilgi sağlamaktadır. Veriye dayalı bir yöntemle yüksek hassasiyetli fazör ölçüm üniteleri (μPMU veya senkrofazörler) kullanılarak TT bilgisi elde edilmektedir [6]. Ayrıca TT bilgisi anahtarlarının durumu veya hat akım sensörleri gibi daha ucuz cihazlarda kullanılarak sağlanabilmektedir [7]. Hat akım sensörleri maliyeti düşük olduğu için tercih edilmiştir. Anahtarlarının durumu ile ilgili temel ve harmonik senkrofazör verilerini kullanarak bir karmaşık tam sayılı lineer programlama (MILP) problemi ile şebeke topolojisini tanımlama ve anahtar durumu tespit edilebilmektedir [8].

Mikro-fazör ölçüm ünitesi verileri kullanılarak evrişimli sinirsel ağ (CNN) gibi derin öğrenme ağı eğitilerek çoklu faz ve çoklu anahtarlama gerçekleştirilmektedir [9]. Fazör ölçüm birimi (PMU) ve SM'lerin birlikte kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde PMU tabanlı zaman ölçeği hizalaması ve lineer ekstrapolasyon ile sahte ölçümlerin oluşturulması yoluyla çoklu kullanıcı SM verilerini birleştirerek dağıtım şebekesi TT doğruluğunu artırılabilmektedir [10]. Ayrıca PMU ve SM kullanılarak regresyon yaklaşımı ile parametre değerlendirmesi ve çoklu çarpanların alternatif yöntemleri çerçevesiyle tam TT bilgisi elde edilmektedir [11]. Ancak ölçüm bazlı yöntemlerde ölçüm doğruluğu, sistem karmaşıklığı ve ölçümün maliyeti gibi faktörler yöntemin seçimini etkileyebilir. Bu yüzden gözlenebilirlik sağlanırken minimum maliyeti sağlamak için optimal cihaz yerleştirme ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [12][13].

[14]'te sınırlı gerçek zamanlı gözlenebilirlik nedeniyle yeniden yapılandırılabilir dağıtım şebekesinde zaman uyumlu durum tahminine yönelik bir derin öğrenme tabanlı yaklaşım önermektedir. Yenilenebilir enerjilerin neden olduğu belirsizlikleri analitik olarak ele alabilen bir hibrit çerçeve önerilmekte ve otoregresyon modeli, faktör analizi ve rasgele matris teorisi gibi büyük veri analitiği yöntemleri de kullanılmaktadır [15]. Bir diğer çalışmada tamamen dağıtılmış bir faz-bağımsız gerilim düzenleme stratejisi sunulmaktadır [16]. Dağıtım şebeke topolojisi ve hat parametrelerinin tahmini için veri tabanlı bir yaklaşım olan "PaToPaEM" çerçevesi [17]'de önerilmektedir. Sensörlü dağıtık enerji kaynaklarından gelen verilerin kullanıldığı çalışmada metodoloji önerilmekte ve grafik modeller ve karşılıklı bilgi temelli bir kimliklendirme algoritmasıyla dağıtım şebekesi topolojisinin doğru bir şekilde tespit edildiği gösterilmektedir [18]. Dağıtım şebekesinde kullanım kapasitesinin artmasıyla birlikte ortaya çıkan topoloji belirleme zorluklarına odaklanan çalışmada, eksik ölçümlerin telafisi için bir bilgi sağlayıcı modeli önermektedir [19]. Dağıtım şebekesinin işletimi sırasında anahtarların ayarlamalarının belgelenmemesi ve sınırlı örnekleme verileri nedeniyle işletim süreçlerinin doğru bir şekilde tanınmasını zorlaştıran bir problem [20]'de öne sürülmüştür. Admittans parametrelerinin ve topolojisinin belirlenmesi için önerilen yayında polifazik bir dağıtım şebekesinden elde edilen telemetri verileri kullanılarak lasso yöntemine dayalı bir yöntem önermektedir [21]. Güç

sistemlerindeki kesintiler sırasında iletim bağlantılarının hızlı bir şekilde belirlenmesi için bir graf teorisi yaklaşımı [22]'de önermektedir. Dağıtım sistemi operatörlerinin (DSO) sınırlı sayıda gerçek zamanlı sayacı kullanarak dağıtım şebekesi topolojisinin elde edildiği çalışmada geri kazanım sağlayan bir sayaç yerleştirme stratejisi geliştirdiğini göstermektedir [23]. [24]'te sınırlı ölçüm cihazlarıyla güç dağıtım sistemi topolojisinin ve arıza durumlarının birleşik tahminini gerçekleştirmek için bir adaptif önemli örnekleme destekli bayes yaklaşımı önermektedir. [25]'te pertürbe edilmiş güç enjeksiyonları ve gerilim tepkilerini kullanarak besleme hattı topolojisinin ve hat dirençlerinin geri kazanılmasını öneren bir yaklaşım sunmaktadır. Sınırlı veya güncel olmayan bilgilere sahip olan enerji şirketlerine yardımcı olan şebeke topolojisinin belirlenmesi yöntemini [26]'da önermektedir. Dağıtım şebekelerinde anahtarlamalı eylemleri ve topoloji geçişlerini tespit eden çalışmada, veri odaklı bir yaklaşım önermektedir [7]. Hat parametresi tahmininin doğruluğunu artırmak isteyen çalışmada veriye dayalı dağıtım modellemesinin kısmi gözlenebilirlik sorununu ele almaktadır [27]. Güç dağıtım şebekesinde topolojinin doğru bir şekilde tespit edildiğini gösteren bir metodoloji [28]'de önermektedir. [29]'da şebeke ölçüm noktaları ve SM'lerden elde edilen veriler kullanılarak topoloji belirleme yöntemi sunulmaktadır. Graf yaklaşımı ile eksik bilgiye sahip düğmeleri dikkate alarak dağıtım şebekesinin topolojisinin belirlendiği bir algoritma [30]'da göstermektedir. Sistem durumlarını ve şebeke topolojisini bir arada tahmin etmek için bir sıkıştırılmış algılama çerçevesi ise [13]'te önerilmektedir. Sınırlı ölçüm verileriyle şebeke topolojisi değişikliklerini belirlemek için bir yöntem de [31]'de önermektedir. Güç şebeke topolojisi belirleme ve izleme faaliyetleri için önerilen çalışmada optimizasyon tabanlı seyrek kurtarma tekniklerinin graf teorisiyle birleştirilmesini önermektedir [32]. [33]'de büyük miktardaki geçmiş veri setindeki karmaşık topolojileri tanımak ve düğüm noktası ölçümlere dayanarak gerçek zamanlı topolojiyi tahmin etmek için iki aşamalı bir TT çerçevesi sunulmuştur. [34]'te büyük miktardaki geçmiş veri setindeki karmaşık topolojileri tanımak ve düğüm noktası ölçümlere dayanarak gerçek zamanlı topolojiyi tahmin etmek için iki aşamalı bir TT çerçevesi önermektedir. [35]'te çıkış tespiti için optimal sensör yerleştirme çözümünü sunarak şebeke topolojisindeki değişiklikleri doğru bir şekilde belirlemeyi amaçlamaktadır. Çıkış tespiti ile optimal sensör yerleştirme

çözümü sunan çalışma şebeke topolojisindeki değişiklikleri doğru bir şekilde belirlemeyi amaçlamaktadır [36].

TT enerji dağıtım şebekesinde birçok farklı bilginin doğruluğunu etkilemektedir. Bu uygulamalar arasında durum tahmini, yeniden yapılandırma, planlama, operasyon, anahtarlama, yük tahmini, barınma kapasitesi ve gözlenebilirlik yer almaktadır.

Durum tahmini, sistemdeki cihazların durumunu belirlemeye yardımcı olur ve bu da şebekenin izlenmesine ve yönetilmesine olanak tanımaktadır. Doğruluğu yüksek ve güncel bir durum tahmini yapılabilmesi için TT bilgisi önemlidir [37]. Yeniden yapılandırma ise enerji dağıtım ağındaki elektrik devrelerinin yeniden yapılandırılmasını ifade ederken, TT yeniden yapılandırma sürecinde doğru kararların alınabilmesine yardımcı olmaktadır [38]. Enerji dağıtım şebekesinde yüklerin dağıtımını ve yönetimini belirleme doğru planlama ile sağlanırken, topoloji bilgisi, planlama sürecinde doğru bir yük tahmini yapılabilmesi için önemlidir [39]. Anahtarlama, enerji dağıtım ağındaki cihazların açılıp kapatılmasıdır ve TT sürecinde doğru kararların alınabilmesine yardımcı olur. TT bilgisi ayrıca yük tahmini doğru yapılabilmesi için de önemlidir. TT bilgisi doğru tahmini yapılabilmesini sağlayarak enerji dağıtım şebekesindeki cihazların barınma kapasitesinin arttırmaktadır. Üç fazlı güç dağıtım sistemlerinin şebeke parametrelerinin tahmin edilmesi için önerilen bir çalışmada derin öğrenme yöntemleriyle birlikte grafiksel öğrenme algoritması kullanılmaktadır [40]. Tablo 1.1'de TT'nin güç sistemi bilgisi ile ilgili yaklaşımlar detaylandırılmıştır. SM-CN önerilen çalışmada SM ve haberleşme ağı (CN) kaynaklı veri sağlanmasını göstermektedir. Ölçüm cihazı ile ise PMU, µPMU, SCADA, sinyal işleme gibi cihazların kullanıp kullanılmaması ifade edilmektedir. Tablo 1.1'de ayrıca çalışmalarda kullanılan metot, temelde ele alınan konu ve çalışmaların test edildiği çalışma ortamları açıklanmıştır. Önerilen çalışma, bilinmeyen düğümlere sahip dağıtım şebekelerinin TT için SM verilerinin uygulanmasını önermiştir. Bu alandaki önceki araştırmalar, graf teorisi yöntemine dayalı birçok çalışma önermiştir. Bir dağıtım şebekesinin topolojisini minimum gözlemsel gereksinimlerle öğrenmek için bir algoritma [41]'de önerilmişken, düğüm

voltajlarını ve generatörler tarafından enjekte edilen reaktif gücü düzenlemek için duyarlılık teorisine dayalı bir yaklaşım [42]'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 TT için Literatür Çalışmalarının İncelemesi

Ref	SM-CN	Ölçüm Cihazı	Yöntem	Açıklama	Test Sistemi
(Sejun Park 2020)	✓	×	Graf tabanlı kesin öğrenme algoritması	Yalnızca son kullanıcı bilgisi ile TT ve doğrulama	33 bara, µPMU, SM
(Amina Benzerga 2021)	✓	×	Graf tabanlı öğrenme yaklaşımı	Sınırlı SM ile TT ve empedans tanıma	128 tek fazlı müşteri (Belçika)
(Satya Jayadev Pappu 2018)	✓	×	PCA- Graf yaklaşımı	TT ve FB belirleme	IEEE-Roy Billinton test sistemleri radyal ve ring şebeke
(G. Cavraro 2015)	×	✓	Veriye dayalı öğrenme algoritması	µPMU ve veri işlemeye bağlı TT	IEEE 33 bara, Teksas evsel yük
(M. Farajollahi 2020)	×	✓	MILP	Hat akım sensörleri ile TT	IEEE 33 bara, Riverside fider
(Lei Chen 2021)	×	✓	MILP	Temel ve harmonik senkro fazör verilerini ile anahtar durum tanımlama	IEEE 123 ve IEEE 23 test sistemi
(Nan Duan 2019)	×	✓	CNN	Çoklu faz ve çoklu anahtarlama ile TT	IEEE 123 fider ve GridLAB-D, µPMU
(Lizong Zhang 2022)	✓	✓	Çok üreticili hibrit ölçüm optimizasyon algoritması	PMU tabanlı zaman ölçeği hizalaması ve lineer ekstrapolasyon ve SM ile TT	µPMU, SCADA ve AMI verisi
(Priyank Shah,2022)	✓	✓	ADMM	SM ve µPMU ile TT ve hat parametre tahmini	IEEE 123-bara, dengesiz IEEE 13 bara ve IEEE 33 bara
(Qiao Li 2013)	×	✓	Karşılıklı bilgi (MI) tabanlı yaklaşım	Topolojik gözlenebilirlik için Optimal PMU konumlandırma	IEEE 14,30, 57 bara test sistemi
(Xian-Chang Guo 2020)	×	✓	MP yaklaşımı	Sınırlı gözlem altında PMU konumlandırma	IEEE 13-39-57-118 test sistemi, 2383 sistem (Polonya)
(Sufi Karimi 2021)	✓	×	MILP	Lineerleştirme, haberleşme altyapısı ile durum tahmini ve TT	IEEE 37-123 bara
(C. Xiaoming, 2018)	×	×	Graf teori ve PSO	TT, yeniden yapılandırma	59 baralı gerçek dağıtım sistemi
(S. Mousavizadeh, 2018)	✓	×	MILP	TT, planlama ve GSD	Düzenlenmiş 118 baralı sistem ve gerçek DS

[43]'te duyarlılık teorisi ve steiner grafik teorisine dayalı özyinelemeli bir algoritma da kullanılmıştır. Bu çalışmalara dayanarak, bu tez, olay öncesi ve sonrası doğru şebeke topolojisini dikkate alan ve MŞ eylem bölgelerinin uygun şekilde oluşumunu sağlayan bir çerçeve sunmaktadır.

1.1.2 Faz Belirleme için Literatür İncelenmesi

Faz Belirleme (FB) hem TT tanımlama yöntemleri hem de dengeli güç sistemi için büyük öneme sahiptir. FB'de kullanılan yöntemlere bakıldığında temelde donanım tabanlı, gerilim tabanlı ve güç tabanlı yöntemler kullanılmaktadır [44]. Optimizasyon tabanlı FB yöntemlerine birçok çalışma bulunmaktadır. Gerçek zamanlı FB ölçümü [45], fotovoltaik (FV) sistemlerin etkisinin düşünüldüğü [46] ve bununla birlikte gerilim ve güç parametrelerinin ölçüldüğü çalışmalar bulunmaktadır [47]. [48]'de spektral kümeleme ve MILP tabanlı yöntemle dengesizlik ve kayıpların hafifletilmesini gözeten bir yöntem sunulmaktadır. [49]'da ise farklı yük profilleri düşünülerek niching genetik algoritması ile FB ve trafo bağlantı ilişkisi elde edilmektedir. FB de istatistiksel ve makine öğrenimi çalışmaları düşünüldüğünde, [50]'de özyinelemeli bayes yaklaşımı ile dengesiz sistemde FB yöntemi sunulurken, [51]'de bayes yaklaşımı ile anormal koşullara dayanıklı FB sağlanmaktadır. [52]'de eksik verilerin spektral ve önem analizi yöntemleri kullanılarak FB sağlanmaktadır. [53]'te boyutsal azaltım ve anormal koşullar gözetilerek FB sağlanmaktadır. [54]'te wavelet yaklaşımı ile tüketici verileri kullanılarak FB gerçekleştirilmektedir. [55]'de otomatik FB sağlayan korelasyon bazlı yeni bir yöntem sunmaktadır. [56]'da güç ve gerilim tabanlı yöntemlerin hibrit olarak kullanıldığı gözetimsiz öğrenme tabanlı bir yöntem sunmaktadır. Makine öğrenimi yaklaşımı ile haberleşme kayıpları düşünülerek FB [57]'de test edilmektedir. FB için k en yakın komşu yaklaşımının olumsuzluklarını gideren bir kümeleme yaklaşımı [58]'de sunmaktadır. Son kullanıcı bölgelerinde kullanılmayan faz bilgilerini düşünerek istatistiksel ve optimizasyon yöntemi ile iki aşamalı bir FB yöntemi sunmaktadır [59]. Graf tabanlı yeni bir yöntem ile otomatik FB bilgisi [60]'da gösterilmektedir. FB için trafo kullanıcı ilişkisi, eksik veri, kullanıcı sayısı gibi durum koşulları düşünüldüğünde [61]'de FB ve trafo kullanıcı bilgisi tespiti sağlanmaktadır. [62]'de dağıtım sistemlerindeki faz bağlantısının belirlenmesi, kısıtlanmış en küçük kareler ve güvene dayalı sıralı atama yöntemleri

kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte kullanıcı sayısı, yanlış trafo bağlantı sayısı ve gürültü oranı dikkate alınmaktadır. Hiyerarşik korelasyon ilişkisi ile FB ve trafo kullanıcı ilişkisi coğrafi bilgi sistemi (GIS) kontrolü ile sağlanabilmektedir [63]. [64]'te ise spektral kümeleme ile FB tespiti ve GIS ile doğrulanması gerçekleştirilmektedir. [65]'te FB için tekil değer ayrıştırması ile dayanıklı bir gürültü giderme yaklaşımı sunulmaktadır. Günlük, sezonsal durum gibi değişim koşullarda FV sistemlerin sık olduğu güç sisteminde FB sağlanabilmektedir [66]. [67]'de ölçüm cihaz verileri kullanılarak dengesiz ve yanlış etiketlenmiş durum koşullarını düşünerek FB gerçekleşmektedir. Gerilim profil karakteristiği düşünülerek zaman gecikmesi, yanlış ve eksik verilere dayanıklı bir FB yaklaşımı [68]'de sunulmaktadır.

[69]'da dengesiz çok fazlı dağıtım sisteminde topoloji ve FB istatiksel bir yaklaşımla sağlanmaktadır. [70]'de 3 faz dengesiz dağıtım sisteminde FB ve TT'nin garanti edilmesi sunulmaktadır. Güç sisteminde makine öğrenimi yaklaşımı kullanılarak eksik veri, veri sayısı, trafo sayısı, trafo kullanıcı tespiti gibi parametreler düşünülerek FB ile ilgili çalışmalarda literatürde sunulmaktadır [71]. Maksimum marjinal olabilirlik tahmini kullanılarak güç ve gerilim profilleri kullanılarak FB tahmini gün sayısı, test bara sistemi, yanlış ölçüm etkisi, dengesizlik seviyesi gibi durumlar test edilen yaklaşımlar da sunulmaktadır [72]. Farklı parametre koşulları altında FB için pilot proje ise [73]'te sunulmaktadır. Tablo 1.2'de kullanılan yöntem ve algoritmalar ışığında detaylı analiz gösterilmektedir. Tablo 1.2, FB için önerilen çalışmaları göstermektedir. Bu tabloya dayanarak, FB ile faz bağlantısının mevcut olup olmadığı, TS ile trafo ile son kullanıcı bilgisi arasındaki ilişkinin incelenip incelenmediği, YD ile çalışmasında yük dengesi ile ilgili çalışmaların bulunup bulunmadığı belirlenebilir. ÖPS ile faz yönteminde kullanıcı sayısı, zaman periyodu vb. kriterlerle detaylı bir analiz yapılıp yapılmadığı incelenebilmektedir. Gürültü kısmında ise oluşabilecek ölçüm hatası miktarı kadar gürültüye dayalı önerilen yöntemin başarısının test edilip edilmediği gösterilmektedir. GIS bölümünde, FB'nin haritalama ile karşılaştırma ve hibrit yönetim uygulamasının olup olmadığı bilgisini vermektedir.

Tablo 1.2 FB için Literatür Çalışmalarının İncelemesi

Ref	Önerilen yaklaşım	PI	TS	YD	ÖPS	Gürültü	GIS	Eksik	YT	Girdi
(V. Arya, 2011)	MILP	✓	✓	✓	×	✓	×	×	×	P
(A. Heidari-Akhijahani, 2021)	MILP	✓	×	✓	×	✓	×	×	✓	P,Q,V
(Shengyuan Liu, 2020)	Spektral clustering-MILP	✓	×	✓	×	×	×	×	×	P,Q,V
(Minghao Xu, 2018)	Spektral ve Korelasyon analizi	✓	×	×	✓	✓	×	✓	×	P
(Jiaqiao Li, 2020)	PCA-Spektral kümeleme	✓	×	×	×	×	×	×	×	V
(Satya Jayadev Pappu, 2018)	PCA-Graf teori	✓	×	×	✓	✓	×	×	×	P
(Hao Huang, 2017)	Bayes yaklaşımı	✓	×	✓	×	×	×	✓	×	P,Q,V
(Tom A. Short, 2013)	Regresyon ve korelasyon	✓	✓	×	×	×	✓	✓	✓	V
(H. Pezeshki, 2012)	Korelasyon	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	V
(A. Hoogsteyn, 2022)	Hibrit Korelasyon ve gözetimsiz öğrenme yaklaşımı	✓	×	×	✓	✓	✓	×	×	P,V
(W. Wang, 2022)	GNN	✓	×	✓	✓	✓	✓	×	×	P,Q
(M.Á. Cagiga, 2022)	İstatiksel ve ML yöntemi	✓	×	×	✓	✓	✓	×	×	P,Q

Eksik kısmında, veri setinin eksik, güncel olmayan veya bulunmayan kısımları hakkında bir yaklaşımın sunulup sunulmadığı belirlenebilir. YT ile son kullanıcı yük tespiti ve FV, EA gibi yüklerin tespit edilip edilmediği analiz edilmektedir. Giriş kısmında, FB'nin bulunduğu durumda kullanılan parametre bilgisi göz önüne alınırken, önerilen yaklaşım kısmında kullanılan yöntemin ne olduğu belirlenebilir.

1.1.3 DIAD ve GSD için Literatür İncelenmesi

Önerilen çalışma, bilinmeyen düğümlere sahip dağıtım şebekelerinin TT'si için SM verilerinin uygulanmasını önermektedir. Kesinti tanımlama, doğal afetler, veri enjeksiyon hataları, hırsızlık tespiti ve siber saldırı durumlarında hızlı aksiyon

alımı, kısa sürede yüksek miktarda yük restorasyonu ve minimum güç kaybının sağlanması noktalarında topoloji bilgisi kritik öneme sahiptir.

GSD kapsamında sahte veri enjeksiyonu (FDIA) konusu ve kullanılan yöntemler incelendiğinde için yapılan çalışmalara bakıldığında derin öğrenme yöntemleri kullanılarak dağıtım sisteminde FDIA saldırılarına karşı konum tespiti sağlanmaktadır [74]. [75]'te makine öğrenimi yöntemleri ile iki aşamalı yaklaşımla anormal durum tespiti ile [76]'da wavelet dönüşümü ve derin sinir ağları ile ardışık zamansal gecikmeleri düşünen online FDIA tespiti sunulmaktadır. Geçmiş veri ve ölçüm değerleri ile gerçek zamanlı FDIA tespiti derin öğrenme yöntemleri ile sağlanabilmektedir [77]. Üretici çekişmeli ağlar (Generative Adversarial Networks) tabanlı yöntemle saldırı senaryoları ve veri enjeksiyon hata tespiti yüksek doğruluk için önerilmektedir [78].

GSD için bir önemli konu da arıza tespitidir. Dağıtım sistemlerinde graf tabanlı yöntemler ile topoloji bilgisi kullanılarak arıza tespiti [79]'da önerilirken, güç şebekesinde topoloji analizi kullanılarak istatiksel model ile kesinti yönetimi (KY) [80]'de sunulmaktadır. Son kullanıcı bölgesi için doğru faturalanma ve kaçaklar için önemli olan hırsızlık tespiti ile ilgili çalışmalara bulunmaktadır. [81]'de gözetimsiz makine öğrenimi ve korelasyon analiz yöntemi son kullanıcı gerilim profili kullanılarak hırsızlık durum tespiti yapılmaktadır. Güç sisteminde pozitif yanlış oranı tabanlı derin öğrenme yöntemi ile hırsızlık tespiti ise [82]'de sunulmaktadır. GSD'de minimum hasar için en önemli konulardan biri de güç sistemini olası siber saldırılardan korumaktır. [83]'te bölgesel siber-fiziksel saldırılarda topoloji bilgisi kullanılarak KY sağlamaktadır. Siber-fiziksel durumlar için güç sistem dayanıklılığının artırılması için şebeke topoloji optimizasyonu modeli ise [84]'te sunulmaktadır. [85]'te farklı siber topoloji saldırı üretimi ve meta sezgisel optimizasyon yaklaşımları ile tespiti için bir yöntem sunulmaktadır.

GSD için arıza sonrası yük restorasyonu ve mikro şebeke oluşturarak hasarın azaltımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Güç sistem dayanıklılığı için olay sonrası yük restorasyonu EA filo servisi düşünülerek MILP tabanlı bir yaklaşım [86]'da sunulmaktadır. [87]'de ise MŞ'lerde yük kesintisini minimize etmek için güç sistemi dayanıklılığı için bir planlama yaklaşımı sunulmaktadır. İki aşamalı optimizasyon yaklaşımı ile topoloji bilgisi ve güç sistem dayanıklılık tespiti için bir

yöntem [38]'de gösterilmektedir. MŞ'lerde graf teori yaklaşımları kullanılarak çoklu arıza koşullarında restorasyon da sağlanmaktadır [88]. [89]'da çoklu kaynak kullanımı ile büyük çaplı arıza durumlarında şebekede meydana gelebilen dengesizlik durumları gözetilerek optimal yük kurtarma için karar verme mekanizması geliştirilmektedir. [90]'da ise güç sisteminde anormal işletim koşullarında MŞ için güç kaybı ve dengesi gözetilerek yük restorasyonu sunulmaktadır.

Tablo 1.3'te güç siteminde farklı dayanıklılık ve KY ile ilgili bazı örnek literatür çalışmalarını ve uygulanan metotları göstermektedir.

Tablo 1.3 GSD için Örnek Literatür Çalışmaları

Ref	Önerilen yaklaşım	Açıklama
(S. Wang 2020)	CNN	Sahte veri enjeksiyon
(D. Flynn 2023)	Graf teori tabanlı yeniden yapılandırma algoritması	TT'de gerilim hassasiyetiyle arıza tespiti
(Yan He 2016)	Kesinti tespit algoritması	TT yöntemi ile sayaç bilgisiyle kesinti yönetimi
(S. Mousavizadeh, 2018)	MILP	İki aşamada topoloji bilgisi ve güç sistem dayanıklılığı sağlama
(H. Chung 2019)	Sahte kesinti konum algoritması	Topoloji ve durum tahmin bilgisi ile siber fiziksel saldırı
(G. Huang 2021)	Pearson korelasyon ve DBSCAN gözetimsiz öğrenme	Son kullanıcı elektrik hırsızlık tespiti

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında amaç, GSD düşünerek doğru ve güncel elektrik güç sistemi TT'nin hesaplanması, DIAD sağlayarak sistemdeki arıza ve yanlış verilerini tespit etmektir. Böylelikle olası büyük çaplı elektrik kesintilerini en aza indirmek veya oluşan kesinti ve hasarın en hızlı şekilde restore edilmesinin sağlanmasıdır. Ayrıca önerilen modelde geliştirilen TT ile son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) ve EA artışı beraberinde getirdiği topoloji belirsizliklerini hafifletmek, durum tahmini, yeniden yapılandırma ve gözlenebilirlik gibi konularda da

kullanılabilecek model tasarlamaktadır. Bu modelde TT öncesi son kullanıcı bölgesi faz belirlenmesi de sağlanmıştır bu bilgi ile topoloji bilgisinin artırılması, dengesizliklerin artırılması ve önerilen DIAD yöntemleri için anormal durum tespiti sağlanması amaçlanmıştır. Bu tezde TT konusunda kapsamlı derleme çalışması eksikliğinin giderilmesi de amaçlanmaktadır.

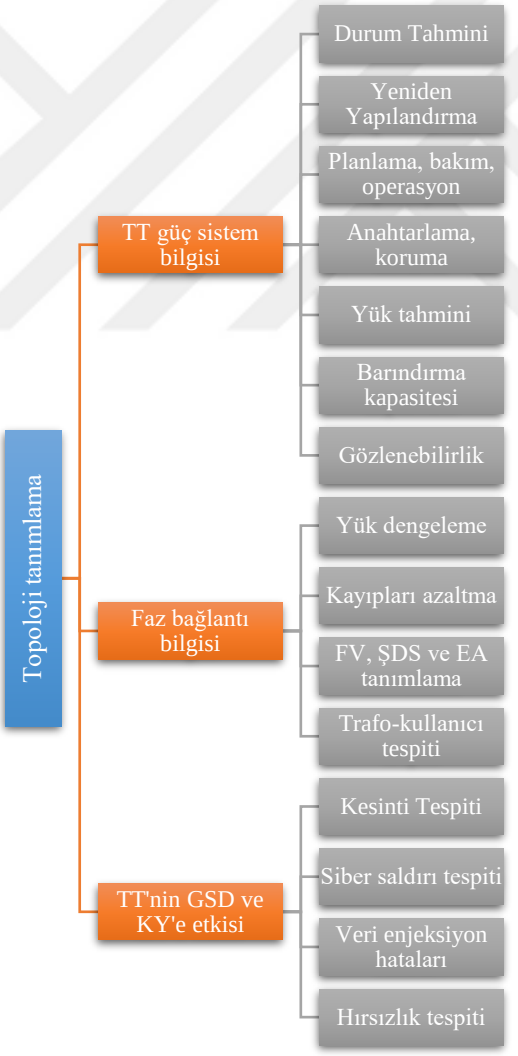
1.3 Tezin Katkıları

Bu çalışmada amaç, DIAD sistemi kullanılarak dağıtım ve AG elektrik şebekelerinde hızlı ve maksimum yük restorasyonu ve olay sonrası maksimum güç kurtarma sağlamaktır. Bu çalışmanın başlıca katkıları şunlardır:

- Son kullanıcı akılı sayaç verileri ve geçmiş verileri üzerinde eğitilmiş bir model kullanan bu araştırma, kötü amaçlı saldırıları belirlemek ve kesin TT'yi belirlemek için yenilikçi bir yöntem sunarak gerçek hata bölgesi MŞ bölgelerinin oluşturulmasını sağlamaktadır.
- Bu kapsamlı çalışma, TT modelini kullanarak MŞ bölgelerini doğru bir şekilde belirlemek ve aynı anda sistem kayıplarını en aza indirirken şebeke destek depolama sistemleri, fotovoltaik sistemler, elektrikli araç istasyonları ve mobil generatörlerin desteğiyle kritik yüklere öncelik vererek yük kurtarmayı geliştirmek için bir yaklaşım sunar.
- Tez çalışması topoloji belirleme konusunda TT'yi konusunda güç sisteminde topoloji konusunda yapılan çalışmalar, faz belirleme yöntemleri ve TT'ye etkisi ve güç sistemi dayanıklılığında topoloji bilgisinin önemi konu başlıkları altında ilk kapsamlı derleme çalışması sunmaktadır.

2
GÜÇ SİSTEM TOPOLOJİSİ

Elektrik güç sistemi, enerji üretimi, iletimi ve dağıtımı için kullanılan karmaşık bir şebekedir. Elektrik güç sistemlerinin tasarımında ve analizinde, sistemin topolojisi önemli bir rol oynar. Topoloji, bir ağdaki bileşenlerin bağlantılarını ve yapılarını tanımlayan bir kavramdır. Enerji şirketleri, güç sistem topoloji bilgisinin tespiti, bakım ve yükseltmelerin planlanması ve yük denetimi gibi amaçlarla kullanmaktadır. Ayrıca güvenilir bir elektrik sağlama hedefine ulaşmak için doğru bir şekilde tanımlanmış bir şebeke topolojisi gereklidir.



Şekil 2.1 TT'nin Kullanıldığı Alanların Genel Gösterimi

Şekil 2.1, makalede TT'nin kullanıldığı çalışmaların konu kapsamlarını ve uygulama alanlarını göstermektedir.

2.1 Güç Sistemi Topoloji Bilgisi

Son yıllarda, dağıtık enerji kaynaklarının (DEK) artışıyla birlikte, enerji dağıtım şebekesinin doğru modellerinin oluşturulması çeşitli uygulamaları mümkün kılmaktadır. Talep tahmini, durum tahmini, yük dengeleme, gerilim kontrolü ve hata tespiti/lokasyonu gibi operasyonel ve kontrol mekanizmaları, şebeke topolojisi ve elektriksel parametreler hakkında ayrıntılı bilgiye ihtiyaç duyar. TT operatörlere DEK'in etkisini değerlendirmek ve şebeke sistemini optimize etmek için önemli bir araç sağlamaktadır.

TT için, ek maliyet gerektirmeyen veriye dayalı yaklaşımlar kullanılarak sürekli olarak büyüyen veri toplama ve iletişim altyapısı kullanılır. Gerçek şebeke topolojisi ve dengelenmiş gerilim ölçümleri ile enjeksiyon verileri kullanılarak, güvenilir bir şekilde şebeke topolojisi ve elektriksel parametreler elde edilebilir. Bu bilgiler, şebekenin yapısal özelliklerini belirlemek için ölçüm cihazları, sensörler ve benzeri ekipmanlar kullanılarak elde edilir.

Örneğin faz farkı ölçümü, iki noktada yapılan gerilim veya akım ölçümleri arasındaki faz farkının hesaplanmasıyla, bu noktalar arasındaki bağlantı hakkında bilgi sağlar. Bu tür ölçümler, şebeke topolojisinin belirlenmesine yardımcı olur ve şebeke analizleri için temel verileri sağlar.

Sonuçta doğru bir şebeke topolojisi ve elektriksel parametreler elde etmek, enerji dağıtım şebekelerinin verimli ve güvenilir bir şekilde işlemesini sağlamak için önemlidir. Bu bilgiler, talep tahmini, durum tahmini, yük dengeleme ve diğer operasyonel ve kontrol mekanizmalarının etkin bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır.

2.2 Faz Belirleme

Son yıllarda son kullanıcı için kesintisiz elektrik talebi ve artan esnek enerji kaynakları enerji şirketlerinin doğru modellere sahip olma ihtiyacı artmaktadır. Özellikle düşük gerilim dağıtım sistemlerinde kullanılan YEK ve enerji arzı

sistemlerinin yaygınlaşması, enerji şirketlerinin bireysel müşterilerin faz durumuyla ilgili doğru bilgilere sahip olma gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Doğru bir dağıtım sistemi modeline sahip olmak, faz yüklerini dengelemenin avantajlarıyla birlikte kayıpları ve aşırı yüklenmeleri azaltabilir. Ayrıca DEK penetrasyonunu artırmak için daha doğru barındırma kapasitesi analizleri yapılabilir. Gelişmiş sayaç altyapısı ve veri akışları, algoritmik olarak müşteri fazlarını tanımlama gibi farklı yaklaşımların kullanılmasını mümkün kılmıştır. FB'de kullanılan yöntemlere bakıldığında temelde donanım tabanlı, gerilim tabanlı ve güç tabanlı yöntemler kullanılmaktadır.

Donanım temelli yöntemlerde ölçüm cihazları ve sensör kullanılarak doğrudan faz bilgisi elde edilir. Bu yöntem, diğer yazılım temelli yöntemlere kıyasla daha hızlı ve doğru sonuçlar verebilir. Ancak yüksek maliyeti ve iş gücü ihtiyacı nedeniyle genellikle kullanımı sınırlıdır.

Gerilim tabanlı yöntemlere bakıldığında, gerilim ölçümleri kullanılarak faz bilgisi elde edilir. Gerilim temelli yöntemler, donanım temelli yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetlidir, doğruluğu yüksek ve donanım gereksinimleri daha azdır. Fakat yüksek yükler ve harmonik bozulmalar gibi bazı durumlarda doğrulukları düşebilir veya gerilim ölçümleri sırasında gerilim kesintileri ve dalgalanmaları gibi faktörler de sonuçları etkileyebilmektedir.

Faz tanımlama için güç temelli bağlantı yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde, güç ölçümleri kullanılarak faz bilgisi elde edilir. Güç temelli yöntemler, gerilim veya donanım temelli yöntemlere göre daha az hassas olabilir ve daha yüksek güç tüketimi gerektirebilir. Ancak daha yüksek harmonikler ve yüksek akım akışları gibi durumlarda doğruluk seviyesi artabilir. Güç temelli yöntemler genellikle daha az maliyetlidir, ancak donanım temelli yöntemlere göre daha pahalı olabilir.

Her üç yöntemin de avantajları ve dezavantajları vardır ve tercih edilecekleri uygulama ve koşullara bağlıdır. Donanım temelli yöntemler hızlı ve doğru sonuçlar sağlayabilir, ancak yüksek maliyet ve iş gücü gerektirir. Gerilim temelli yöntemler daha düşük maliyetlidir ve daha az donanım gerektirir, ancak bazı durumlarda doğrulukları düşebilir. Güç temelli yöntemler ise daha az hassas olabilir, ancak daha

yüksek harmonikler ve yüksek akım akışları gibi durumlarda doğruluk seviyesi artabilir.

Faz bilgisi doğruluğunu etkileyen faktörler şunlardır:

- Yanlış trafo bilgisi: Faz tanımlama için doğru trafo bilgisi kullanılmalıdır. Yanlış trafo atanması, doğru faz bağlantısının belirlenmesini zorlaştırabilir.
- Son kullanıcı sayaç bilgisi: Faz tanımlama için son kullanıcıların doğru sayaç bilgisine sahip olması önemlidir. Yanlış veya eksik sayaç bilgisi, faz bağlantısının doğru şekilde tespit edilmesini etkileyebilir.
- Kullanıcı sayaç verisi sayısı: Doğru faz tanımlama için yeterli sayıda kullanıcı sayaç verisi kullanılmalıdır. Daha fazla veri, daha doğru bir faz tanımlama sağlayabilir.
- Fotovoltaik veya enerji depolama bilgisi: Fotovoltaik veya enerji depolama sistemlerinin doğru şekilde tespit edilmesi önemlidir. Bu sistemlerin varlığı ve kapasitesi, faz tanımlama işlemini etkileyebilir.
- Gürültü ekleme: Faz bilgisinin doğruluğunu artırmak için gürültü ekleme yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemler, ölçüm verilerindeki hataları azaltarak faz tanımlama doğruluğunu artırabilir.
- Eksik veya güncel olmayan bilgi: Kullanılan veri setinin eksik veya güncel olmaması, doğruluk seviyesini etkileyebilir. Eksik veya güncel olmayan bilgiler, yanlış faz bağlantılarına neden olabilir.
- Elektrik şebekesinin dengesi: Elektrik şebekesinin dengesi, faz bilgisinin doğruluğunu etkileyen bir faktördür. Dengesiz şebekelerde, faz bağlantılarının doğru şekilde tespit edilmesi zor olabilir.

Bu faktörler, faz tanımlama işlemi sırasında dikkate alınmalı ve doğru faz bağlantılarının belirlenmesi için gerekli önlemler alınmalıdır.

2.3 Güç Sistemi Dayanıklılığında Topoloji Bilgisinin Etkisi

Elektrik şebekeleri, geniş bir coğrafi alana yayılan ve binlerce kilometrelik hatlar ve trafolardan oluşan karmaşık bir sistemdir. Şebekenin doğru çalışması ve kesintisiz hizmet vermesi için güncel ve doğru topoloji bilgisine ihtiyaç vardır.

Topoloji bilgisi, şebeke yöneticilerine kesinti tanımlama, doğal afetler, veri bütünlüğü hataları, hırsızlık tespiti ve siber saldırı durumlarında hızlı müdahale imkanı sağlar.

Topoloji bilgisi, doğal afetlerde hasarın yayılımını belirleyerek onarım planlarının oluşturulmasına yardımcı olur. Veri bütünlüğü hatalarının ve hırsızlık vakalarının tespitinde de önemli bir rol oynar. Anormal durumların izlenmesiyle, veri enjeksiyon hataları ve güvenlik açıkları hızlı bir şekilde tespit edilebilir.

Siber saldırılar, elektrik şebekeleri için ciddi bir tehdit oluşturur. Topoloji bilgisi, şebeke üzerindeki zayıf noktaların belirlenmesi ve saldırıya uğramış bileşenlerin tespit edilmesi için kullanılır. Bu sayede saldırıların etkileri sınırlanabilir ve şebekenin güvenliği sağlanabilmektedir.

Elektrik şebekeleri için doğru topoloji bilgisi, kesinti tanımlama, hızlı müdahale, onarım planlaması, veri bütünlüğü ve güvenlik açıklarının tespiti gibi konularda hayati öneme sahiptir. Şebeke yöneticileri, güncel ve doğru topoloji bilgisine dayanarak hızlı aksiyonlar alabilir ve şebekenin güvenli ve verimli çalışmasını sağlayabilir.

2.4 Topoloji Tanımlamada Kullanılan Yöntemler

2.4.1 Graf Teori ile Güç Sistem Topolojisinin Elde Edilmesi

Graf teorisi, elektrik şebekelerinin topolojik yapısını ve ilişkilerini matematiksel olarak modellemek için kullanılan bir disiplindir. Elektrik şebekelerinin topolojik analizi için çeşitli graf teorisi metotları kullanılabilir.

2.4.1.1 Düğüm (Nokta) ve Kenar (Yol) Analizi

Graf Düğüm (Nokta) ve Kenar (Yol) Analizi, graf teorisi kullanarak elektrik şebekelerinin düğümler ve kenarlar aracılığıyla matematiksel olarak modellemesini sağlar. Bu analizler, düğümlerin özelliklerini ve aralarındaki ilişkileri, kenarların ise iletim hatlarını veya bağlantıları temsil ettiği matematiksel modelleri içerir. Düğümler, elektrik şebekesindeki önemli noktaları temsil eder. Bu noktalar enerji kaynakları, trafolar, dağıtım merkezleri gibi unsurları içerebilir. Graf teorisi, bu düğümlerin matematiksel olarak modellenmesini sağlamaktadır. Bir düğümün matematiksel temsili genellikle bir vektörle ifade edilirken bu vektör düğümün

özelliklerini yansıtır ve genellikle düğümün gerilim seviyesi, yük miktarı gibi bilgileri içerir. Kenarlar ise düğümler arasındaki bağlantıları temsil etmektedir. Elektrik şebekesindeki iletim hatları veya bağlantılar, kenarları oluşturur. Graf teorisi, bu kenarların matematiksel olarak modellemesini sağlar. Kenarların matematiksel temsili genellikle bir matrisle ifade edilir. Bu matris, düğümler arasındaki ilişkileri, akım akışını, enerji kaybını gibi faktörleri içeren bilgileri içerir. Düğüm (Nokta) ve Kenar (Yol) Analizi, elektrik şebekelerindeki topolojik yapıyı ve performansı anlamak için kullanılır. Matematiksel modeller, bu analizlerde önemli bir rol oynar. Graf teorisi kullanılarak oluşturulan matrisler ve vektörler, düğüm ve kenar özelliklerini temsil eder ve şebeke yöneticilerine kesinti tanımlama, enerji yönetimi, yük dengelemesi gibi konularda veri sağlar.

Örneğin, bir düğüm matrisi N, elektrik şebekesindeki düğümlerin özelliklerini temsil edebilir. Bu matrisin elemanları, düğümlerin gerilim seviyeleri, yük miktarları gibi bilgileri içerir. Bir kenar matrisi E ise iletim hatlarının veya bağlantıların özelliklerini temsil eder. Bu matrisin elemanları, iletim hatlarının kapasiteleri, enerji kayıpları gibi bilgileri içerir.

2.4.1.2 En Küçük Gerilim Analizi

En Küçük Gerilim Ağacı (MST) yöntemi ile güç sistemi üzerindeki düğümler ve kenarlar arasındaki en düşük gerilim değerine sahip ağaç yapısı bulunarak, güç sisteminin temel topolojisini göstermektedir.

Verilen bir graf G(V, E) ve ağırlık fonksiyonu w ile, MST'nin matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemlerle gösterilebilir:

1. $X = \{(u, v) \mid u, v \in V\}$ (Tüm düğüm çiftlerinin kümesi)
2. $Y = \{(u, v) \mid u, v \in V, (u, v) \in E\}$ (Graf G'deki tüm kenarların kümesi)
3. $Z = \{(u, v) \mid u, v \in V, (u, v) \notin E\}$ (Graf G'de bulunmayan tüm potansiyel kenarların kümesi)

MST ifadesinin anlamı, MST'nin, tüm kenarların ağırlıkları toplamını minimize eden bir ağaç yapısı olduğudur. Bu ifade, genellikle prim veya kruskal algoritmaları gibi algoritmalarla kullanılarak en küçük gerilim ağacı ile elde edilmektedir.

2.4.1.3 Graf Matrisleri

Graf teorisi, elektrik şebekelerini matrislerle temsil etmek için kullanılan graf matrislerini kullanır. İki temel graf matrisi, komşuluk matrisi (adjacency matrix) ve kesintisizlik matrisidir. Komşuluk matrisi, düğümler ve kenarlar arasındaki ilişkileri 0 ve 1'lerden oluşan bir matris olarak gösterir. Kesintisizlik matrisi ise iki düğümün birbirine bağlı olup olmadığını ifade eden bir matristir. Bu matrisler, topolojik analizlerde kullanılarak şebekenin özellikleri ve ilişkileri matematiksel olarak tespit edilebilir. Bir grafın komşuluk matrisi, düğümler arasındaki ilişkiyi 0 ve 1'lerden oluşan bir matris olarak gösterir. Eğer i. düğüm ve j. düğüm bir kenarla bağlı ise, matrisin (i, j) indeksi 1 değerini alır. Aksi halde, matrisin (i, j) indeksi 0 değerini alır. Grafın düğüm sayısı n ise, komşuluk matrisi n x n boyutunda olur. Matematiksel olarak, komşuluk matrisi A ile gösterilir: A = $[a_{i,j}]$ Burada, $a_{i,j}$ ifadesi, i. düğüm ile j. düğüm arasında bir kenarın varlığını gösterir. Eğer kenar varsa, $a_{i,j}$= 1; yoksa $a_{i,j}$= 0 olur.

2.4.1.4 Yol Analizi

Graf teorisi, elektrik şebekelerinde enerji akışının en iyi yollarını belirlemek için yol analizi yapar. En kısa yol analizi (shortest path analysis) ve en kısa maliyetli yol analizi (minimum cost path analysis) gibi metotlar, enerjinin kaynaktan tüketiciye en etkili ve optimize şekilde iletilmesini sağlamak için kullanılır.

2.4.1.5 Kesinti Analizi

Graf teorisi, elektrik şebekelerindeki kesinti durumlarını analiz etmek için kullanılır. Kesinti analizi, bir düğüm veya kenarın kesildiği durumlarda etkilenen bölgeleri belirlemek ve alternatif enerji yollarını bulmak için graf teorisi metotlarını kullanır.

2.4.1.6 Akım Analizi

Graf teorisi, elektrik şebekelerinde akımın nasıl yayıldığını analiz etmek için kullanılır. Akım analizi, düğümler arasındaki enerji akışını ve güç dengesini inceleyerek şebeke üzerindeki yük dengesini sağlamak için kullanılan metotlardan biridir.

Bu metotlar, graf teorisi kullanarak elektrik şebekelerinin topolojik yapısını matematiksel olarak modellemek ve çeşitli analizler yapmak için kullanılır. Graf teorisi, büyük ve karmaşık şebekelerde verimli enerji iletimi, kesinti yönetimi, güvenlik analizleri ve optimize edilmiş enerji dağıtımı gibi konulara yardımcı olur.

2.4.2 Makine Öğrenimi Yöntemleri ile Güç Sistem Topolojisinin Elde Edilmesi

Güç sistemlerinin topolojisinin makine öğrenimi yöntemleriyle elde edilmesi, büyük ölçekli elektrik şebekelerinin karmaşık yapısını analiz etmek ve optimize etmek için kullanılan gelişmiş bir tekniktir. Aşağıda, güç sistemleri topolojisinin makine öğrenimi ile elde edilmesi için kullanılan örnek modelleri ve yöntemleri bulabilirsiniz:

- Yapay Sinir Ağları güç sistemleri topolojisini tahmin etmek kullanılabilir, şebeke verilerini girdi olarak alır ve şebeke topolojisini öğrenmek ve tahmin etmek için katmanlı bir yapıya sahiptir. Giriş verileri olarak düğümlerin ve kenarların özellikleri (lokasyon, tip, kapasite vb.) kullanılabilir. Eğitim verileri üzerinde yapılan eğitimle güç sistemi topolojisini doğru bir şekilde tahmin etme yeteneğini kazanmaktadır.
- Kümeleme Analizi yöntemleri şebeke verilerini kümeleme analizi yapmak için kullanılabilir. Kümeleme analizi, şebekedeki benzer düğümleri bir araya getirerek topolojik gruplamaları belirlemeyi amaçlar. K en yakın komşu, hiyerarşik kümeleme ve spektral kümeleme gibi algoritmalar kullanılabilir. Bu yöntemle, şebeke topolojisinin farklı bölgeleri ve alt sistemleri tanımlanabilir.
- Karar ağaçları, güç sistemi topolojisi analizinde kullanılan bir diğer makine öğrenimi yöntemidir. Karar ağaçları, şebeke verilerini kullanarak bir dizi karar kuralı oluşturur ve bu kural setini kullanarak düğüm ve kenarları sınıflandırır. Bu sayede, şebekedeki bağlantıları, enerji akışını ve topolojiyi belirlemek için kullanılabilir.
- Diğer derin öğrenme yöntemleri güç sistemleri topolojisinin belirlenmesinde derin öğrenme teknikleri de kullanılabilir. Derin öğrenme, çok katmanlı sinir ağı mimarileri kullanarak karmaşık yapıları analiz etme

yeteneğine sahiptir. Örneğin, evrişimli sinir ağları güç sistemleri verilerini kullanarak topolojik yapıyı öğrenmek ve tahmin etmek için kullanılabilir.

2.4.3 Optimizasyon ile Güç Sistem Topolojisinin Elde Edilmesi

Güç sistemleri topolojisinin elde edilmesi için matematiksel optimizasyon modelleri kullanılabilir. Bu modeller, güç sistemlerindeki düğüm ve kenarların yerleşimini, bağlantılarını ve enerji akışını optimize etmeyi hedefler. Aşağıda, MILP yaklaşımının kullanıldığı kapsamlı bir bilgi verilmiştir:

MILP, lineer programlama ve tam sayılı programlama yöntemlerini birleştiren bir optimizasyon yaklaşımıdır. Güç sistemleri topolojisinin elde edilmesinde MILP modeli, aşağıdaki bileşenleri içerir:

- Karar Değişkenleri: Optimizasyon modelinde kullanılacak karar değişkenleri tanımlanır. Güç sistemlerinde, bu değişkenler genellikle düğümlerin (noktaların) ve kenarların (yolların) durumunu ifade eder. Örneğin, bir düğümün aktif veya pasif olup olmadığı, bir kenarın açık veya kapalı olup olmadığı gibi.
- Amaç Fonksiyonu: Optimizasyonun hedefini ifade eden amaç fonksiyonu tanımlanır. Güç sistemleri topolojisinin elde edilmesi durumunda, genellikle enerji kayıplarını minimize etmek veya enerji iletim maliyetlerini minimize etmek gibi hedefler belirlenebilir.
- Kısıtlar: Optimizasyon modelinde, güç sistemlerinin fiziksel ve işletimsel kısıtları ifade eden denklemler ve eşitsizlikler yer alır. Örneğin, enerji akışı denklemleri, güç dengesi kısıtlamaları, düğüm ve kenar kapasite sınırlamaları, voltaj ve akım sınırlamaları gibi.
- Topoloji Bağlantıları: MILP modeli, güç sisteminin topolojik bağlantılarını ifade eden denklemler ve kısıtlamalar içerir. Bu, düğümler arasındaki bağlantıların doğru şekilde temsil edilmesini sağlar. Örneğin, bir düğümün yalnızca belirli düğümlerle veya kenarlarla bağlantılı olabileceğini ifade eden kısıtlamalar yer alabilir.

MILP modeli, belirli bir güç sistemi topolojisi problemi için uygun hale getirilebilir ve çözülerek optimize edilebilir. Çözüm, belirlenen amaç fonksiyonu ve kısıtlar altında en iyi topolojiyi sağlayan düğüm ve kenar durumlarını ortaya koyar.

2.4.4 İstatiksel, Hibrit Metotlar ile Güç Sistem Topolojisinin Elde Edilmesi

İstatistiksel metotlar, mevcut güç sistem verilerini analiz ederek topolojiyi tahmin etmeye yönelik istatistiksel modeller kullanır. Bu modeller, aşağıdaki temel prensiplere dayanabilir:

- Güç sistem bileşenleri arasındaki ilişkileri tanımlamak için istatistiksel korelasyon analizi kullanılabilir. Örneğin, yüksek korelasyonlu bileşenlerin genellikle yakın coğrafi konumlarda bulunduğu düşünülebilir.
- Güç sistemindeki dalgalanmaları ve tekrarlanan desenleri inceleyerek topoloji hakkında frekans analizi elde etmek mümkündür. Frekans analizi, güç sistem verilerinin Fourier dönüşümü gibi teknikleri kullanarak güç sistem bileşenlerinin frekans spektrumunu analiz eder.
- Güç sistem verilerindeki belirsizliklerin ele alınması için bulanık mantık kullanılabilmektedir. Bulanık mantık, belirsizlikleri ve kesin olmayan bilgileri ifade eden kavramsal bir çerçeve sunar ve güç sistemi topolojisini tahmin etmek için bulanık mantık kurallarını kullanabilir.

2.4.5 Hibrit Metotlar ile Güç Sistem Topolojisinin Elde Edilmesi

Hibrit metotlar, istatistiksel ve optimizasyon tekniklerini bir araya getiren bir yaklaşımı ifade eder. Güç sistem topolojisini tahmin etmek için hibrit yaklaşımlar

Aşağıdaki maddeler ile açıklanabilmektedir.

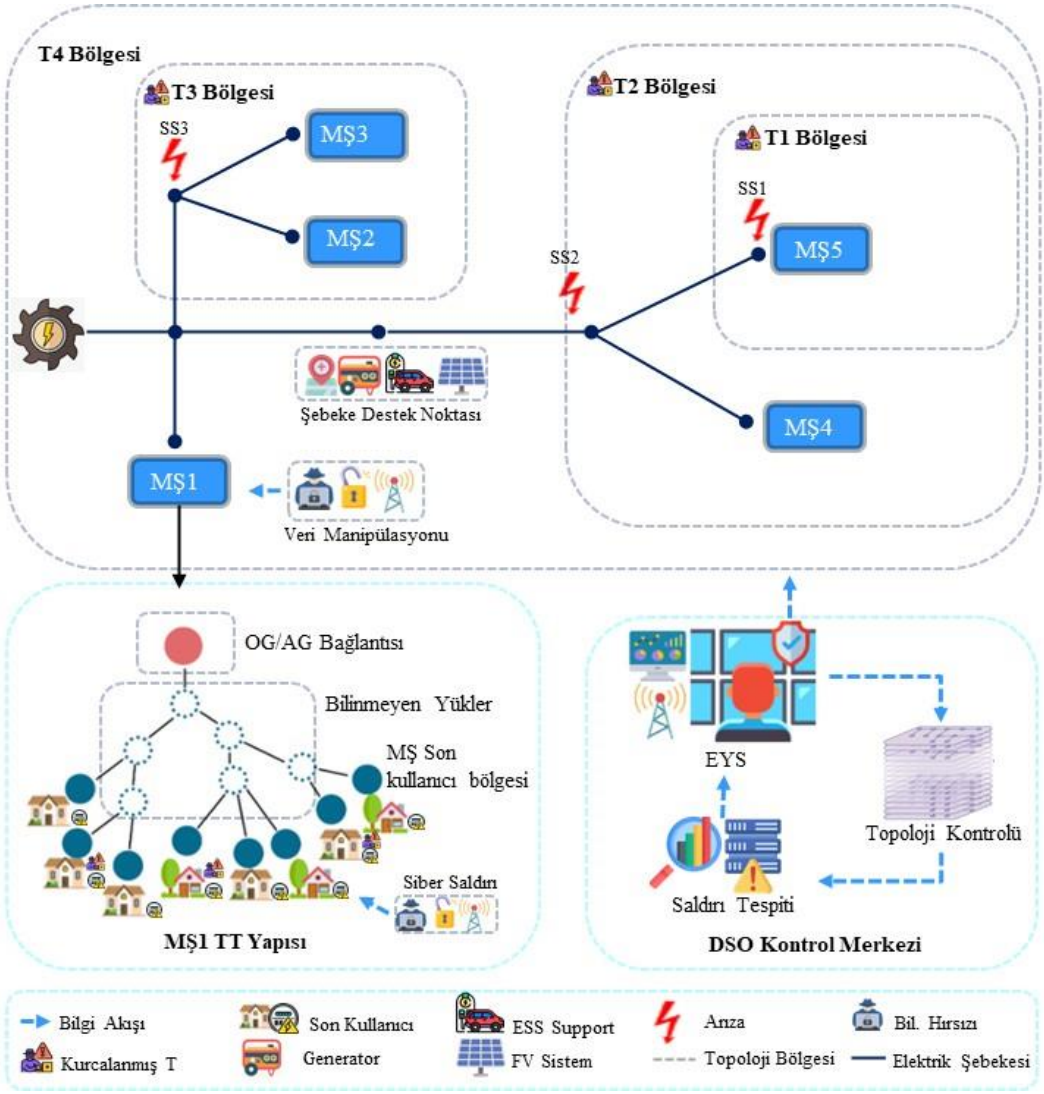
- Veri Toplama, güç sistemine ait verilerin toplanması ve kaydedilmesi aşamasıdır. Bu veriler, gerçek zamanlı ölçümlerden, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemlerinden veya diğer izleme cihazlarından elde edilebilir.
- Veri Analizi, toplanan verilerin analiz edilmesi ve özellik çıkarımı yapılmasını sağlamaktadır. İstatistiksel teknikler, verilerdeki desenleri, korelasyonları ve diğer istatistiksel özellikleri belirlemek için kullanılabilir.

- Model Geliştirme aşamasında istatistiksel modellerin veya makine öğrenmesi algoritmalarının geliştirilir. Bu modeller, güç sistem topolojisinin tahmin edilmesi için kullanılır. Örnek olarak, yapay sinir ağları, destek vektör makineleri veya karar ağaçları gibi algoritmalar kullanılabilir.
- Optimizasyon yaklaşımları kullanılarak elde edilen model, optimizasyon teknikleriyle birleştirilebilir veya tahmin edilen topoloji optimize edilebilmektedir.

Hibrit yaklaşımlar hem veri analizi hem de optimizasyon tekniklerinin avantajlarını birleştirerek güç sistem topolojisi tahmininde daha yüksek doğruluk ve performans sağlayabilir. Bu yaklaşım, gerçek zamanlı izleme verilerine dayanan tahminlerin yapılmasında ve güç sistemlerinin optimize edilmesinde etkili bir araçtır.

3
METODOLOJİ

Bu tezde elektrik güç sistemine kötü amaçlı bir saldırının ardından TT yöntemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Aynı zamanda etkilenen hat segmentleri için yük restorasyonu da bu bilgiler kullanılarak kapsamlı bir şekilde irdelenmektedir.



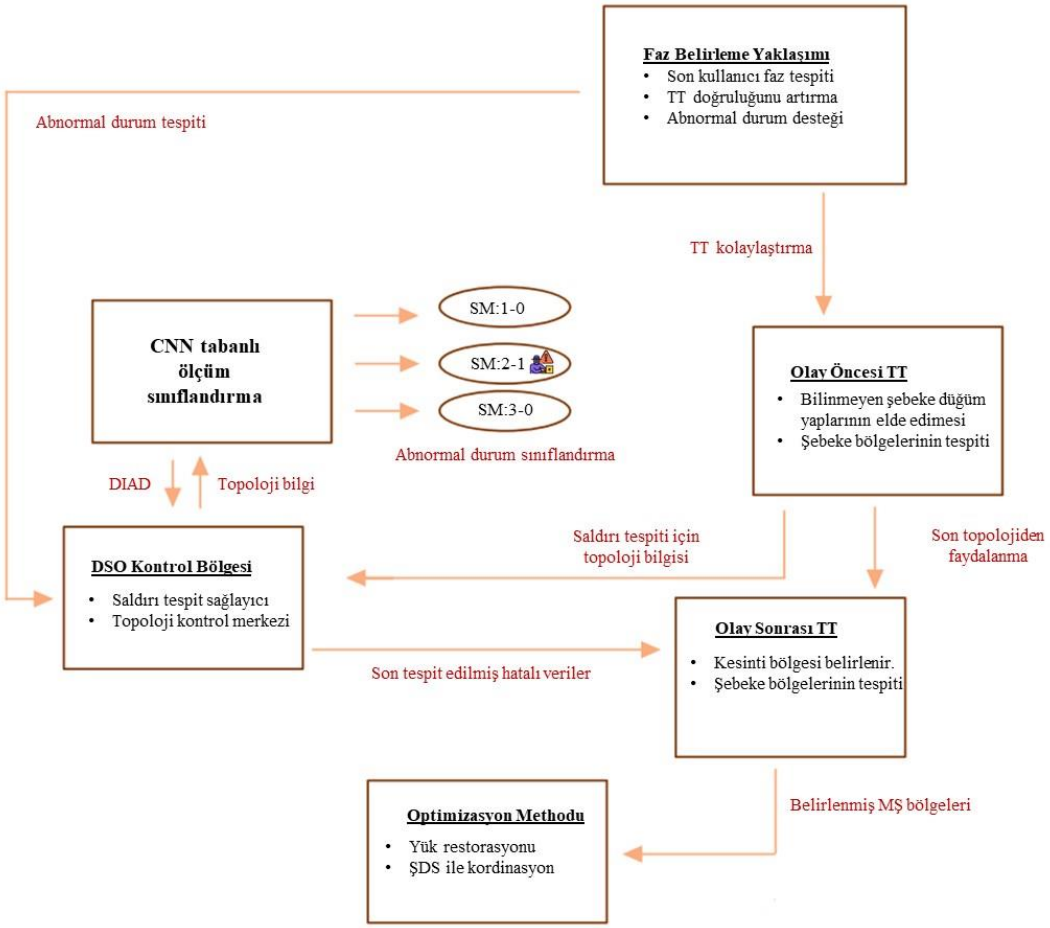
Şekil 3.1 Önerilen TT ve GSD'nin Genel Gösteri

Önerilen model, Şekil 3.1'de gösterilen örnek bir şebeke yapısını içermektedir. Şebeke destek noktası, bir arızadan sonra besleme yüklerine bağlanan ŞDS, FVs, elektrikli araç istasyonu (EAİ) ve mobil generatörleri ifade etmektedir. MŞ kısmı

dağıtım sistemine bağlı AG veya dağıtım trafo merkezlerini temsil etmektedir. CA sembolü, bir arıza veya saldırıdan etkilenen bir şebeke noktasını gösterirken, T sembolü, restorasyon için düşünülen bölgeleri temsil etmektedir. DSO kontrol merkezi dağıtım şebekesinde yanlış verilerin kontrolünü ve test edildiği merkezi ifade etmektedir. MŞ1 TT yapısı bölümü, AG sistemindeki TT için graf teori modeli için bir örneğini göstermektedir. Bu çalışmada, TI ve DIAD yöntemleri kullanılarak güç sistem topolojisi izlenmekte ve analiz edilmektedir. Etkilenen hat segmentlerinin belirlenmesi ve yük restorasyonu için optimize edilmiş bir çözüm sunulmaktadır. Önerilen model ŞDS, FV sistemler, EAİ ve mobil generatörler gibi içeren karmaşık bir şebeke yapısını temsil etmektedir. Bu sayede, güç sistemi operatörleri, saldırı sonrası hızlı bir şekilde topolojiyi yeniden yapılandırabilir ve enerji kesintilerini en aza indirebilmektedir. DIAD yöntemi ile ayrıca dağıtım şebekesindeki yanlış veriler kontrol edilmekte ve analiz edilmektedir. Bu sayede, saldırı sonrası güvenlik açıkları tespit edilebilir ve güvenliğin sağlanması için önlemler alınabilir. Bu matematiksel temelli model, güç sistem operatörlerine ve güvenlik uzmanlarına, kötü amaçlı saldırılara karşı korunma ve hızlı bir şekilde iyileşme sağlama konusunda değerli bir araç sunmaktadır.

Şekil 3.2'de önerilen DIAD ile kesinti bölgesi tespiti, topoloji bölgeleri oluşturma ve olay sonrası maksimum yük restorasyonu sürecinin şematik işleyişi gösterilmektedir. Faz tanımlama kısmında gerilim tabanlı analizle temelde gözetimsiz öğrenme yöntemleri kullanılarak son kullanıcı sayaç fazı ve trafo ilişkisi belirlenir, bu bilgi TT'de aynı faza ait kullanıcı gerilim profilleri benzer olduğu için ön doğrulama da sağlamaktadır. Oluşturulan yapıda LOF ile olası durum dışında belirlenen noktalar ile saldırı tespiti için de destek sağlamaktadır. Hem olay öncesi hem olay sonrası TT doğru yük restorasyon ve hızlı müdahale için çok önemlidir. DIAD yöntemi ile senkron çalışarak kesintiye uğramış bölgelerin kolayca tespiti sağlanmaktadır. DIAD ve TI birbiriyle ilişkilidir, çünkü TI elektrik güç sistemindeki bilinmeyen parametreleri ve doğru topoloji bilgisini sağlamakta, DIAD ise saldırı bölgelerini belirleyerek etkilenen alanın topolojisini doğrulamaktadır. Sistem hatalarının izlenmesinin zorluğu nedeniyle, bunlar siber saldırılar olarak kabul edilmektedir. Ancak DIAD aynı zamanda diğer hata türleri için de anlayış sağlayabilir. Saldırı, elektrik güç sistemi içinde belirli bir bölgeyle

sınırlı olduğundan, bu bölgede topoloji bilgisinde beklenmedik değişiklikleri ve SM okumalarındaki değişiklikleri kolayca tespit etmek mümkün olmaktadır. Bu sayede etkilenen bölgenin topolojisi, son topoloji bilgisi ve SM okumalarındaki beklenmedik değişikliklerin analiziyle kolayca belirlenebilmektedir. Olay sonrası tespit edilen bölgelerde MŞ grupları oluşturularak maksimum arıza süresi boyunca maksimum yük restorasyonu sağlanmaktadır.

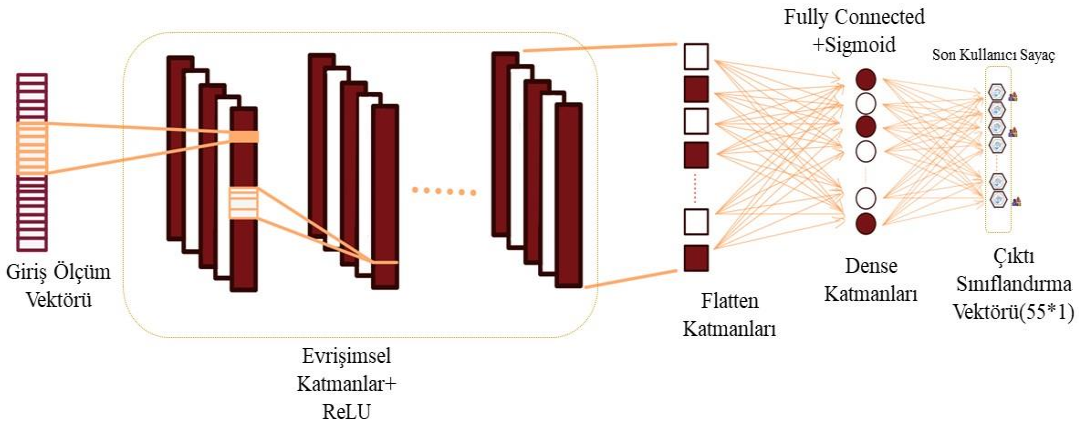


Şekil 3.2 Önerilen DIAD ve Restorasyon Modelinin İşleyiş Şeması

3.1 Veri İzinsiz Giriş Saldırısı Tespiti İçin Önerilen Model

Elektrik sistemlerinde mevcut olan siber saldırılardan biri olan DIAD sayaç ölçümlerine yanlış veri enjekte ederek geniş çaplı ve uzun süreli kesintilere neden olmaktadır. Bir boyutlu evrişimli sinir ağı (1D-CNN), tarihsel SM verileri ile eğitilerek yanlış veya hatalı sayaç verilerini tespit etmek için kullanılmaktadır. DIAD, topoloji bilgisi ile saldırının mekansal bölgesini tespit etmek için bir sınıflandırma problemi olarak formüle edilmektedir. DIAD ile TT arasında şu

şekilde bir ilişki bulunmaktadır: TT, güç sistemine ait bilinmeyen parametreleri ve doğru topoloji bilgisini sağlarken, DIAD etkilenen bölgeleri tespit ederek kurcalanmış bölgenin topolojisini onaylamaktadır. Sistem hatalarının takibinin zorluğu göz önünde bulundurularak, bunlar siber saldırılar olarak ele alınmaktadır. Ancak, DIAD aynı zamanda diğer hata türleri hakkında da bilgi sağlayabilir. Saldırı, güç sistemi içinde belirli bir bölgeyle sınırlı olduğu için, bu bölgede topoloji bilgisinde beklenmedik değişiklikleri ve sayaç okumalarında meydana gelen değişiklikleri tespit etmek daha kolaydır. Bu, son topoloji bilgisini ve akıllı sayaç okumalarındaki beklenmedik değişiklikleri analiz ederek etkilenen bölgenin topolojisinin kolayca belirlenmesine olanak sağlar. Önerilen DIAD, değiştirilmiş veya hatalı sayaç verilerini tespit ederken, topoloji belirleme algoritması tüm sistemin hatalı ve anlık grid topolojisini belirlemektedir. [78]'de CNN tabanlı bir yöntem kullanarak derin öğrenme temelli bir hatalı veri tespit mekanizması önerilmektedir. Bu çalışma, gerçek zamanlı elektrik topoloji bilgisi ile akıllı sayaç verilerini birleştirerek güç sistemine ait saldırı veya verisi kurcalanmış bölgeleri doğru bir şekilde tespit etmek için önceden eğitilmiş bir derin modeli içermektedir.



Şekil 3.3 CNN Mimarisi Kullanılarak Yapılan DIAD Modelinin Gösterimi

Önerilen algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için eğitim ve test veri setleri aşağıdaki adımlarla oluşturulmaktadır:

- Eksik noktalarda topoloji bilgisi ve tarihsel verilerin analizi yapılır.
- Farklı saldırı ve gürültü seviyeleri altında sistem parametreleri üretilir ve kesin sayıda örneklem belirtilmeden eğitim ve test veri setleri oluşturulur.

- Gerçek dünya veri artırma simülasyonu için her veri yoluna yapay bir yük uygulanırken, kurcalanmış veriler, saldırganların sınırlı kaynaklarıyla özenle oluşturulmuş yanlış veri enjeksiyon saldırılarına odaklanır.

Tablo 3.1 CNN Modeli Parametre Bilgileri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Evrişimsel Katman Sayısı	3-4	Optimizer	Adam
Kayıp Fonksiyonu	Binary Crossentropy	Batch Boyutu	64
Aktivasyon Fonksiyonu	Relu	Epochs	200

DIAD Algoritması, yanlış veri enjeksiyon saldırısının mekansal bölgesini tespit etmek için 1D-CNN yapısını kullanan çok etiketli bir sınıflandırma problemidir. Şekil 3.3, önerilen CNN modelinin iç yapısını göstermektedir. Modelde, her kullanıcının mevcut durumu izlenerek hatalı noktalar tespit edilir. TT'den yararlanarak, model hata bölgesini belirler ve doğrulama sağlar. Önerilen model, kullanıcıların sayaçlarında anormallikleri veya kesintileri doğru bir şekilde tespit etmektedir. Önerilen model olarak doğru çalıştığında, normal işleyişi gösteren 0 değerini döndürülmektedir. Sayaç manipülasyonuna uğradığında veya tehlikeye atıldığında ise model 1 değerini döndürmektedir. Modelde kullanılan parametreler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

3.2 Topoloji Bilgisi için Önerilen Model

3.2.1 Olay Öncesi Topolojinin Tanımlanması ve Arıza Sonrası Konum Bölgesinin Belirlenmesi

3.2.1.1 Olay Öncesi TT Doğruluğunu Artırmak için Faz Belirleme

Elektrik güç sistemlerinin topolojisini belirlerken daha fazla doğruluk sağlamak için olay öncesi FB sıklıkla kullanılmaktadır. Önerilen sistemde gerilim bazlı FB yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntemler, belirli bir durumdan önce güç sisteminin topolojik yapısının daha doğru bir şekilde belirlenmesine yardımcı olur. Önerilen modelde spektral kümeleme tekniklerinden yararlanılmaktadır. Bu teknik, veri önişleme ve anormal durumların tespiti için uygulanmaktadır. Anormal durumların belirlenmesi, verinin daha efektif bir şekilde analiz edilmesini ve güç sistemlerinin topolojik yapısının daha doğru bir şekilde belirlenmesini sağlar. Hibrit

bir algoritma kullanarak, spektral kümeleme ve gerilim bazlı faz tanımlama yöntemlerinin birleşiminden elde edilen bilgiler, modelin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini artırmaktadır. Modelin doğruluğunu test etmek için TT adını verdiğimiz bir test mekanizması kullanılmaktadır. TT, modelin gerçek dünya senaryoları altında nasıl performans gösterdiğini belirlememize olanak sağlar. Önerilen FB algoritmasının iç yapısı ve çalışma prensibi Şekil 3.4'te detaylı olarak gösterilmektedir. Bu algoritma, topoloji belirleme sürecinde karşılaşılan zorlukları gidermek için tasarlanmıştır.

Spektral kümeleme, graf teorisinden evrimleşen bir kümeleme algoritmasıdır. Spektral kümelemenin temel fikri, verileri bir uzaydaki noktalar olarak ele almak ve bu noktaların birbirine bağlı olduğu kenarlarla ilişkilendirmektir. Daha uzakta olan iki nokta arasındaki kenara daha düşük bir ağırlık atanırken, daha yakın olan iki nokta arasındaki kenara daha yüksek bir ağırlık atanır ve ardından tüm veri noktalarından oluşan grafi en düşük ağırlıklı kenarların toplamı ve alt kütledeki kenarların ağırlıklarının toplamı olacak şekilde kesmektedir. Böylece kümeleme elde edilir. Spektral kümeleme adımları aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- Kullanıcılar arasındaki benzerliği temsil eden bir benzerlik matrisi $w_{i,j} = e^{((-||U\prime_i - U\prime_j||\hat{}2) / (2\sigma\hat{}2))}$ elde edilir, burada $w_{i,j}$ benzerlik matrisinin i. satırının j. sütunundaki elemandır. σ, Gauss çekirdek fonksiyonunun parametresidir. U' ise düşük boyutlu gerilim matrisidir.

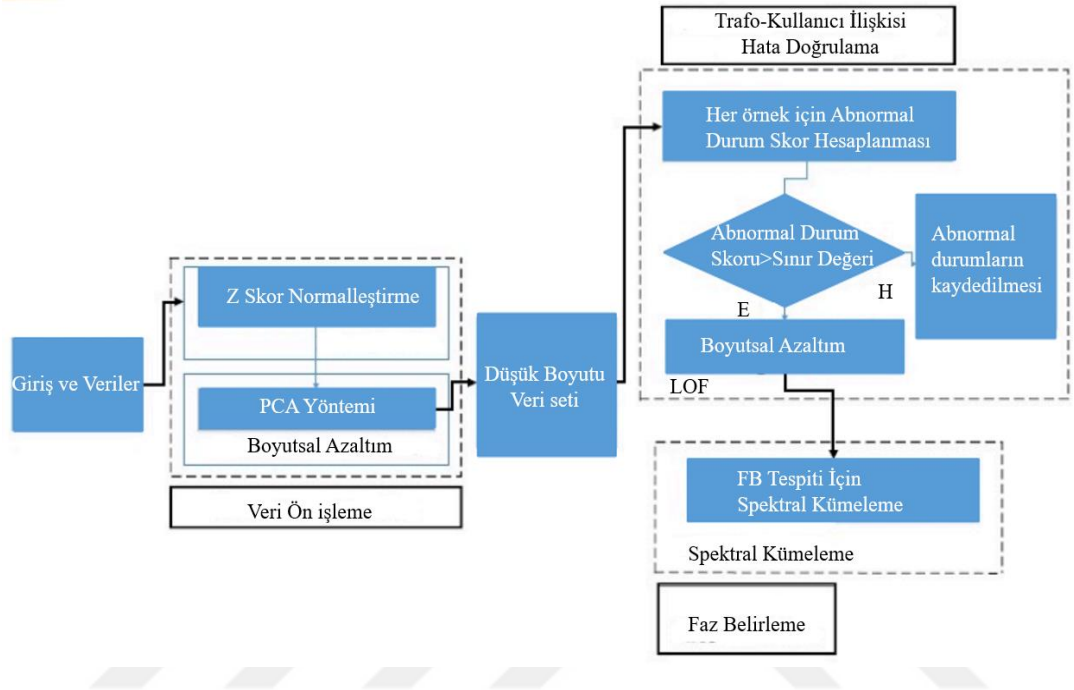
- Kullanıcı derece matrisi $D_{i,i} = \sum_{j=1}^{M} w_{i,j}$ elde edilir, burada $D_{i,i}$, derece matrisinin i. köşegen elemanıdır.

- Kullanıcı laplacian matrisi L = $D^{\frac{1}{2}}.(D - W).D^{\frac{1}{2}} = I - D^{\frac{1}{2}}.W.D^{\frac{1}{2}}$ elde edilir, burada I birim matristir.

- L üzerinde tekil değer ayrıştırması gerçekleştirilir ve L'nin özdeğerleri elde edilir. Özdeğerleri küçükten büyüğe sıralayın ve en büyük üç özdeğeri alın. Bu özdeğer vektörünü bir matrise dönüştürün.

- K-ortalamalar kümeleme algoritmasını kullanarak E'yi üç küme (3 faz) halinde kümelenir.

Özetlemek gerekirse, alt istasyonların güç sistemlerinde faz belirleme işlemi için spektral kümeleme yöntemi kullanılır. Bu yöntemde veriler benzerlik matrisi kullanılarak graf tabanlı olarak kümeleme yapılır ve ardından elde edilen kümeleme sonuçları kullanılarak faz belirleme işlemi gerçekleştirilir. Spektral kümele çalışma prensibi temel yapısı Tablo 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Faz Belirleme ve Abnormal Durum Tespit Algoritmasi Gösterimi

Tablo 3.2 Spektral Kümeleme Çalışma Yapısı Özet Gösterimi

Spektral Kümeleme Algoritması
1. Pairwise Kernel kullanılarak benzerlik matrisi belirle
2. Lineer olmayan boyutsal azaltım 2.1 Laplace matris oluştur 2.2 Özellik çıkartım vektörleri ile eigen vektörü oluştur
3. Eigen vektörü kullanılarak K en yakın komşu matrisi kullanılarak sınıflandırma gerçekleştir

3.2.1.2 Olay Öncesi Topoloji Belirleme

Grafik teorisine dayalı bir yeniden yapılandırma yaklaşımı, şebeke düğümlerinin sayısı veya gizli düğümlerdeki enjeksiyonlarla ilgili geçmiş veriler gibi ek girdiler gerektirmeden zaman serisi topolojisini tahmin etmek için son kullanıcı sayaç ölçümlerini kullanır. Süreç, ön işlemeyi, gerilim hassasiyet katsayılarını ve grafik özelliklerini tanımlamayı ve tahmin edilen şebeke topolojisini geri döndürmek için bir optimizasyon problemi önermeyi içerir. Yerelleştirilmiş bir arama, birden fazla potansiyel topolojiler üretir ve önceden tanımlanmış bir amaca göre en uygun olanı seçilir. Özyinelemeli bir gruplama algoritması, bir Steiner ağacı oluşturmak için, gözlemlenen düğümler arasındaki mesafe ölçümlerinden başlayarak ve tüm parçalar tek bir yapıda birleştirilinceye kadar düğümleri dahili düğümlerle kademeli olarak birleştirerek kullanılır. Algoritma, [46]'da açıklandığı gibi, parçaları geliştirerek ve nihai steiner ağacı oluşana kadar birleştirerek ağacı yinelemeli olarak oluşturur. Çalışma [44]'e göre, derecesi en az üç olan iç düğümler dikkate alınırken, yalnızca iki hattı birbirine bağlayan bir veri yolu tek bir sürekli hattın parçası olarak kabul edilmektedir.

Algoritma, mesafe matrisini hesaplamak ve bitişiklik matrisini TI için hesaplanan mesafelere dayalı olarak güncellemek için bir dizi adımı yineler.

1. Veri setini yükleyin ve mesafe matrisini hesaplayın.
2. Düğümler, kardeşler, ebeveynler ve bitişiklik matrisi gibi değişkenleri başlatın.

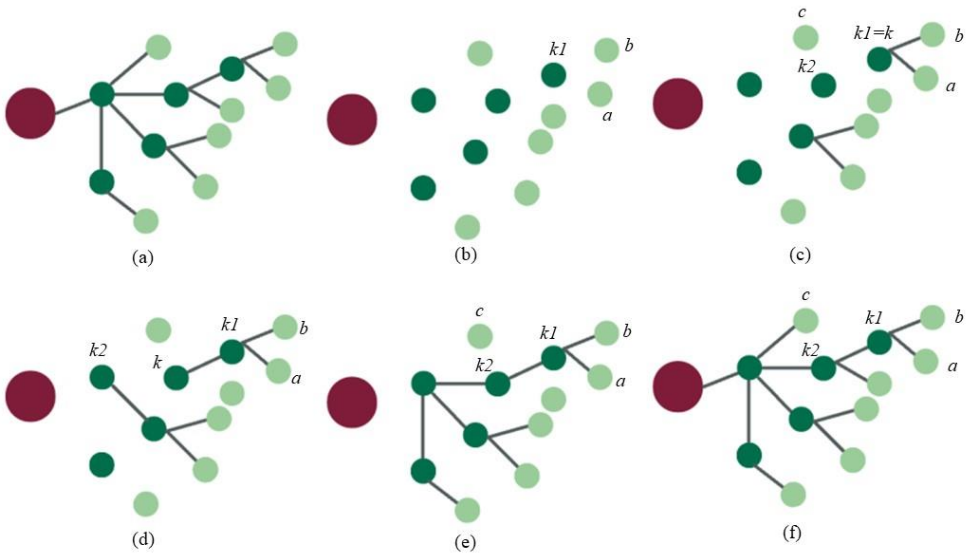
   Önceden belirlenmiş bir maksimum yineleme sayısına ulaşılana veya düğüm sayısı iki veya daha az olana kadar devam edecek olan yinelemeli süreci başlatın:

   a. Mesafe değerlerini hesapla: Her düğüm çifti için, veri kümesindeki diğer düğümlere olan mesafe farkını belirlenmektedir.
   b. Kardeşleri ve ebeveynleri tanımlayın: Belirli bir toleransı kullanarak, düğüm çiftlerini kardeşler veya ebeveynler olarak sınıflandırın. Kardeşler, bir ana düğüm aracılığıyla bağlanan düğümlerdir, ebeveynler ise doğrudan bağlanan düğümlerdir.

c. Bitişiklik matrisini değiştirin: Tanımlanmış kardeşler ve ebeveynler arasındaki bağlantıları bitişiklik matrisine dahil edin. İşlenen düğümleri, düğüm listesinden hariç tutun.
d. Mesafe matrisini yenileyin: Mesafe matrisini, kurulan ilişkilere dayalı olarak yeni mesafelerle güncelleyin.

3. Sonlandırma kriterleri sağlanana kadar iterasyonlara devam edilmektedir.
4. Nihai mesafe matrisini sunulması sağlanmaktadır.

Şekil 3.5'te Önerilen graf teori yaklaşımının çalışma prensibi adım olarak gösterilmektedir. Algoritma 1'in Gösterimi (a) eksik mavi düğümleri ve gözlemlenen yeşil düğümleri ile orijinal bir topoloji (b & c) kardeş yaprak düğümleri a; c'nin üst düğümü k1'i bulma (d & e) k1'in eksik üst düğümünün ve büyükanne/büyükbabasının tekrarlayan şekilde geri kazanılması (f) kardeş yaprakları olmayan yaprak düğümlerinin üst düğümlerini bulma elde edilen geri kazanılmış topolojiyi göstermektedir.



Şekil 3.5 Önerilen Graf Modeli Çalışma Prensibi

3.2.2 Arıza Sonrası Konum Bölgesi Belirleme Algoritması

Kesinti sonrası topoloji bilgileri kullanılarak hasardan etkilenen kullanıcı bölgeleri belirlenir. Bu tespit sürecinde, graf yapısı kullanılarak ebeveyn-kardeş ilişkisi analiz edilir ve birbiriyle ilişkili düğümlerdeki kesintiler tespit edilir. Bu karar verme sistemi, kesinti olup olmadığını belirlemek için graf yapısında yapılan

analizlere dayanır. Şebekeyi eski haline getirmek için, öncelikle kritik yüklerin beslendiği MŞ grupları oluşturulur. Bu MŞ grupları, önemli ve öncelikli olan kullanıcı bölgelerine enerji sağlamak için stratejik olarak belirlenir. Restorasyon stratejisi, öncelikle bu MŞ gruplarının yeniden devreye alınmasıyla başlamaktadır. Önerilen model, farklı durumlar altında zaman, arıza bölgeleri ve yanlış raporlar gibi faktörleri dikkate alarak test edilmiştir. Bu testler, modelin güvenilirliğini ve etkinliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir. Model, hasarın boyutunu ve dağılımını belirleyerek restorasyon sürecinin planlanmasına yardımcı olur. Bu yöntem, kesinti sonrası topoloji analizine dayanan bir restorasyon stratejisi sunmaktadır. Enerji şebekesindeki kesintilerin etkilerini minimize etmek ve enerji hizmetini en kısa sürede restore etmek için kullanılır. Model, operatörlere verimli bir restorasyon süreci yönetmek için gerekli bilgileri sağlar ve enerji kesintilerinin süresini ve etkisini azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Tablo 3.3 Önerilen model için terminoloji

Kümeler	$b \in B, g \in G, i \in I, l \in L, p \in P, t \in T, s \in S, \Omega_i^f$
Parametreler	$\mathcal{E}_{i,e}^{EA\dot{I},bas}, \mathcal{E}_{i,e}^{EA,maks}, \mathcal{E}_{i,e}^{EA,min}, \mathcal{E}_{i,g}^{\S DS,ini}, \mathcal{E}_{i,g}^{\S DS,maks}, \mathcal{E}_{i,g}^{\S DS,min}, f_b^{max}, g_i^{lim}, \mathcal{P}_i^{maks}, \mathcal{P}_{i,t}^{FV}, R_{i,e}^{EA\dot{I},max}, R_{i,g}^{\S DS,max}, X_p/Y_p, \Delta T, \mathcal{P}_{i,l,t}^{y\ddot{u}k,n}, \alpha, \beta, \delta, \eta_i^{ch}$
Değişkenler	$\mathcal{E}_{i,e,t}^{EA\dot{I}}, \mathcal{E}_{i,g,t}^{\S DS}, f_{b,t}, F_{b,t}, \mathcal{P}_{i,e,t}^{EA\dot{I},ch}, \mathcal{P}_{i,e,t}^{EA\dot{I},disc}, \mathcal{P}_{i,g,t}^{\S DS,ch}, \mathcal{P}_{i,g,t}^{\S DS,disc}, \mathcal{P}_{i,t}^{f}, \mathcal{P}_{i,t}^{f,load}, \mathcal{P}_{i,t}^{GTS}, \mathcal{P}_{i,t}^{MGSC}, \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,cri}, \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,n}, \mathcal{P}^{loss,t}, \mathcal{P}_{b,t}^{kyp}, T_e^{var}, T^{olay}, \varphi_{i,t}^{EA\dot{I}}, \varphi_{i,t}^{GSS}, z_{b,t,p}$

3.3 Yük Restorasyonu için Önerilen Optimizasyon Modeli

Kesintiye uğramış belirlenen bölgeler MŞ olarak belirlenmektedir. Belirlenen başta kritik yükler olmak üzere bölgelerde maksimum yük kurtarma ve hızlı aksiyon alma büyük çaplı hasarları azaltmak için kritik öneme sahiptir. Bu bölümde bu yüzden

maksimum yük kurtarma ve minimum kayıp gözeten bir optimizasyon modeli sunulmuştur. Tablo 3.3'te modelde kullanılan terminoloji gösterilmektedir.

3.3.1 Amaç Fonksiyonu

Önerilen kesinti bölgelerinde GSD konsepti için amaç denklem (3.1)'de verilen güç önceliğini göz önünde bulundurarak yük restorasyonunu en üst düzeye çıkarmak ve güç kaybını en aza indirmektir. α_i ve β_i katsayıları yük önceliğini temsil ederken, δ katsayısı kayıpların sonucu etkilememesini sağlar.

$$\mathcal{P}^{rest,n} = \alpha_i . \sum_i \sum_l \sum_t \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,n} + \beta_i . \sum_i \sum_l \sum_t \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,kri} - \delta . \sum_t \sum_b \mathcal{P}_{b,t}^{kyp} , \quad (3.1)$$

$$\delta \ll \alpha_i < \beta_i \; for \; \forall i, \qquad \delta + \sum_i \alpha_i + \sum_i \beta_i = 1$$

3.3.2 Güç Dengesi

Her t periyodunda her i barası için güç dengesi denklem (3.2)'de verilmektedir. Denklemin sol tarafı arıza anında sistemi besleyen kaynakları, sağ tarafı ise restore edilen yükleri göstermektedir. FV sisteminden sağlanan güç ($\mathcal{P}_{i,t}^{FV}$), hata sonrasında ŞDS'ler ve EAİ'ler tarafından sağlanan güç ($\mathcal{P}_{i,t}^{GTS}$), ve dallar arasındaki güç akışları ($f_{b,t}$), geri kazanılan yüklerle $\left(\mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,n}, \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,kri}\right)$ eşittir. Her bir düğüm i için her bir dönem t'de her bir yük l için geri kazanılan yükler $\left(\mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,n}, \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,kri}\right)$, talebi aşmamak üzere ($\mathcal{P}_{i,l,t}^{yük,n} + \mathcal{P}_{i,l,t}^{yük,kri}$) sağlanır, bu da denklem (3.3)'te gösterilmektedir.

$$\mathcal{P}_{i,t}^{FV} + \mathcal{P}_{i,t}^{GTS} + \sum_{\forall b \epsilon B:\Omega_b^j} f_{b,t} \sum_{\forall b \epsilon B:\Omega_b^i} f_{b,t} = \sum_l \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,n} + \sum_l \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,kri} , \forall i \epsilon I, \forall t \quad (3.2)$$

$$\mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,n} + \mathcal{P}_{i,l,t}^{rest,kri} \leq \mathcal{P}_{i,l,t}^{yük,n} + \mathcal{P}_{i,l,t}^{yük,kri}, \forall i \epsilon I, \forall (l,t) \quad (3.3)$$

3.3.3 Güç Akışı ve Hat Kayıpları

Denklem (3.4), bara akan gücün, sağlanan yüklerin ve kayıpların toplamına eşit olduğunu göstermektedir. Hat kapasitesi, Denklem (3.5) ve (3.6) tarafından

sınırlanmaktadır. Kollardaki aktif güç kayıpları ($\mathcal{P}_{b,t}^{kyp}$), kollardan geçen güce bağlı bir fonksiyon kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{P}_{i,t}^{f} = \mathcal{P}_{i,t}^{f,yük} + \sum_{b\epsilon B} \mathcal{P}_{b,t}^{kyp}, \forall(i,t)\epsilon\left(\Omega_i^f, T\right) \tag{3.4}$$

$$0 \leq \mathcal{P}_{i,t}^{f} \leq \mathcal{P}_{i}^{maks}, \forall(i,t)\epsilon\left(\Omega_i^f, T\right) \tag{3.5}$$

$$0 \leq \quad f_{b,t} \leq f_b^{maks}, \forall(i,t)\epsilon(I,T) \tag{3.6}$$

3.3.4 Güç Kayıpları için Doğrusal Yaklaşım Modeli

Kollardaki aktif güç kayıpları, Denklem (3.7)'de gösterildiği gibi, güç akışına ve kare değerlerine dayalı bir fonksiyon kullanılarak belirlenir. Bu doğrusal olmayan fonksiyon, Özel Sıralı Tip 2 Kümeleri (SOS2) yöntemi kullanılarak doğrusal bir forma dönüştürülür. Denklem (3.8)'e göre, SOS2 yöntemi, maksimum 2 ardışık sıfır olmayan değere izin veren değişken kümelerini tanımlar. Bunu takiben, kollardan geçen güç akışı Denklem (3.9) ve (3.10)'da oluşturulan bağımsız değişkenler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{P}_{b,t}^{kyp} = b.\,|f_{b,t}| + c.\,|f_{b,t}^2| \;, \forall(b,t)\epsilon(B,T) \tag{3.7}$$

$$\sum_{p\epsilon P} z_{b,t,p} = 1, \forall(b,t)\epsilon(B,T) \tag{3.8}$$

$$f_{b,t} = \sum_{p\epsilon P} X_p . z_{b,t,p}, \forall(b,t)\epsilon(B,T) \tag{3.9}$$

$$F_{b,t} = \sum_{p\epsilon P} Y_p . z_{b,t,p}, \forall(b,t)\epsilon(B,T) \tag{3.10}$$

3.3.5 Şebeke Destek Noktalarında Kullanılan Kaynaklar için Eşitlikler

$$\mathcal{P}_{i,t}^{GTS} = \mathcal{P}_{i,t}^{MGSC} + \sum_{e} P_{i,e,t}^{EAİ,disc} - \sum_{e} P_{i,e,t}^{EAİ,ch} + \sum_{g} P_{i,g,t}^{ŞDS,disc} - \sum_{g} P_{i,g,t}^{ŞDS,ch}, \forall i\epsilon I, \forall t \tag{3.11}$$

$$\mathcal{P}_{i,t}^{MGSC} = g_i^{lim} \tag{3.12}$$

$$\mathcal{E}_{i,e,t}^{EAİ} = \mathcal{E}_{i,e}^{EAİ,ini} \;, \forall(i,t)\epsilon(I,T) \;, if\ [t{=}T^{olay},\ t{=}T_e^{var}] \tag{3.13}$$

$$\mathcal{E}_{i,e,t}^{EAİ} = \mathcal{E}_{i,e,t-1}^{EAİ} + P_{i,e,t}^{EAİ,ch} . \eta_{i,e}^{ch,EAİ} - \frac{P_{i,e,t}^{EAİ,disc}}{\eta_{i,e}^{verim}} . \Delta\mathcal{T} \;, \quad \forall t\epsilon[T^{olay}, T_e^{var}], \forall i\epsilon I, \forall e \tag{3.14}$$

$$\mathcal{E}_{i,e}^{EA\dot{I},min} \leq \mathcal{E}_{i,e,t}^{EA\dot{I}} \leq \mathcal{E}_{i,e}^{EA\dot{I},maks}, \forall t \epsilon [T^{olay}], \forall i \epsilon I, \forall e \quad (3.15)$$

$$P_{i,e,t}^{EA\dot{I},disc} \leq R_{i,e}^{EA\dot{I}} . \varphi_{i,t}^{EA\dot{I}} , \ \forall i \epsilon I, \forall (e,t) \quad (3.16)$$

$$P_{i,e,t}^{EA\dot{I},ch} \leq R_{i}^{EA\dot{I}} . \left(1 - \varphi_{i,t}^{EA\dot{I}}\right), \ \forall i \epsilon I, \forall (e,t) \quad (3.17)$$

$$\mathcal{E}_{i,e,t}^{EA\dot{I}} = P_{i,e,t}^{EA\dot{I},disc} = 0 \ , \forall t \notin [T^{olay}, T_e^{var}], \forall i \epsilon I, \forall e \quad (3.18)$$

$$\mathcal{E}_{i,g,t}^{\S DS} = \mathcal{E}_{i,g}^{\S DS,ini} \ , \forall i \epsilon I, \forall g \ , if \ t{=}T^{olay}, \forall i \epsilon I \quad (3.19)$$

$$\mathcal{E}_{i,g}^{\S DS,min} \leq \mathcal{E}_{i,g,t}^{\S DS} \leq \mathcal{E}_{i,g}^{\S DS,maks}, \forall t \epsilon [T^{olay}], \forall i \epsilon I, \forall g \quad (3.20)$$

$$\mathcal{E}_{i,g,t}^{\S DS} = \mathcal{E}_{i,g,t-1}^{\S DS} + P_{i,g,t}^{\S DS,ch} . \eta_{i,g}^{ch,\S DS} - \frac{P_{i,g,t}^{\S DS,disc}}{\eta_{i,g}^{verim}} . \Delta \mathcal{T} \ , \quad (3.21)$$

$$\forall t \epsilon [T^{olay}], \forall i \epsilon I, \forall g$$

$$P_{i,g,t}^{\S DS,disc} \leq R_{i,g}^{\S DS} . \varphi_{i,t}^{\S DS} \ , \ \forall t, i, g \quad (3.22)$$

$$P_{i,g,t}^{\S DS,ch} \leq R_{i}^{\S DS} . \left(1 - \varphi_{i,t}^{\S DS}\right) , \ \forall i \epsilon I, \forall (t,g) \quad (3.23)$$

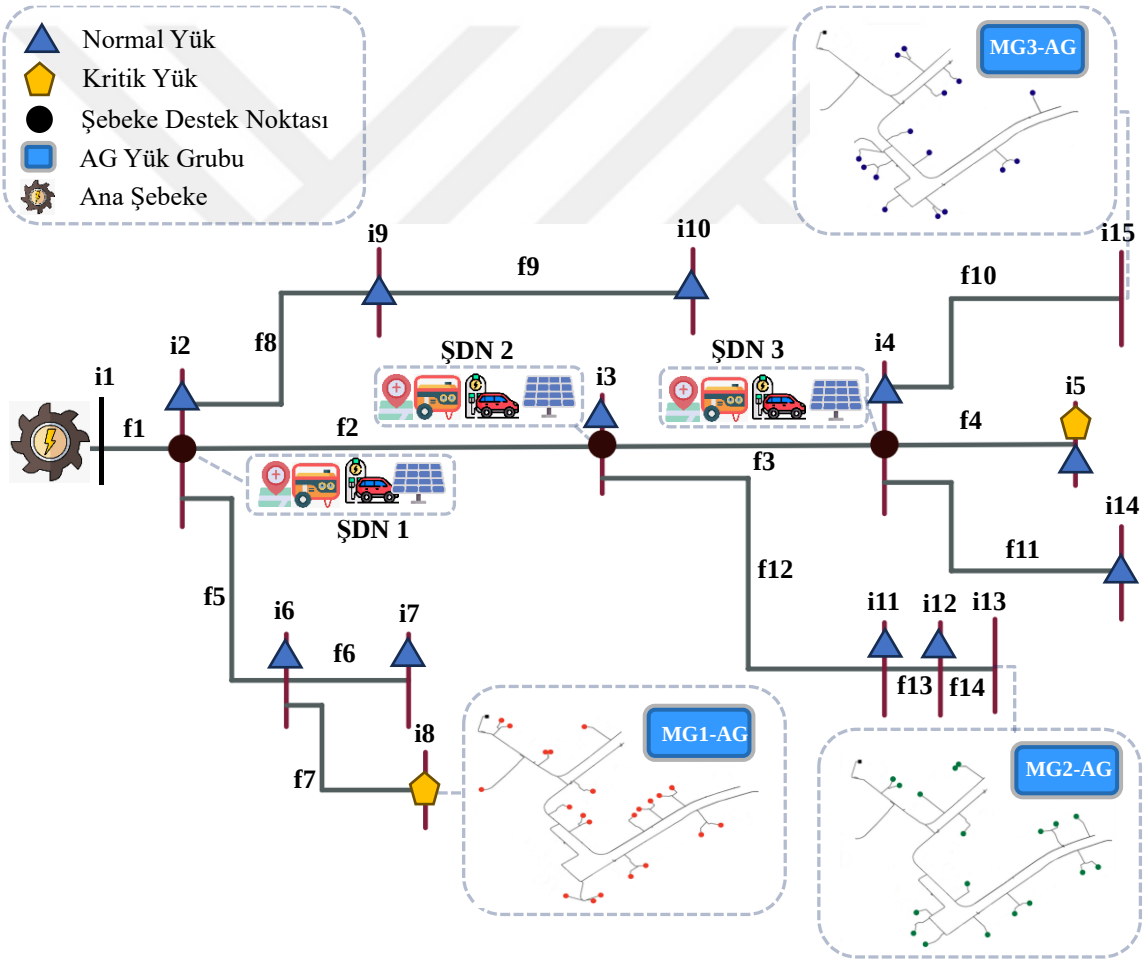
$$\mathcal{E}_{i,g,t}^{\S DS} = P_{i,g,t}^{\S DS,disc} = 0 \ , \forall t \notin [T^{olay}], \forall i \epsilon I, \forall g \quad (3.24)$$

Denklem (3.11), kesinti dönemi t için bara i'ye şebeke destek birimleri (ŞDB) ile sağlanan toplam gücü ($\mathcal{P}_{i,t}^{GTS}$) ifade etmektedir. Mobil generatörlerden gelen güç ($\mathcal{P}_{i,t}^{MGSC}$), istasyondaki araçlardan gelen araç-şebeke enerjisi ($P_{i,e,t}^{EA\dot{I},disc}$) ve ŞDS'lerin deşarj gücü ($P_{i,g,t}^{\S DS,disc}$), toplam şarj gücü ($P_{i,e,t}^{EA\dot{I},ch}, P_{i,g,t}^{\S DS,ch}$) çıkarılarak hesaplanır. Bu işlem her periyot için geçerlidir. Mobil generatörün maksimum kapasite sınırlaması denklem (3.12) tarafından verilir. Denklemler (3.13-3.24), acil durum planlama sürecinde EAİ yönetim kısıtlamalarını sunar. Denklemler (3.13-3.15), kesinti ve araçların varış başlangıç zamanı, periyot t boyunca bara i'deki araç e için enerji durumu denklemlerini, minimum ve maksimum değerleri gösterir. Denklemler (3.16-3.17), kesinti sırasında araçların aynı anda şarj ve deşarj olmamasını sağlar. Restorasyon sürecinden sonra elektrikli araçların istasyondan ayrılmadığı varsayılır. Denklem (3.18), EAİ'da araç bulunmadığı durumu veya kesinti koşulları dışındaki değerleri temsil eder. ŞDS kısıtlamaları da benzer şekilde sunulur, denklem (3.20) ile kapasite sınırlamaları, denklem (3.21) ile enerji durumu,

denklemler (3.22,3.23) ile aynı anda batarya şarjı ve deşarjını önleme ve denklem (3.24) ile kesinti öncesi ŞDS durumu gösterilmektedir.

4
TEST VE SONUÇLAR

Bu bölümde, topoloji saldırı bölgesinin tespiti ve yük restorasyonu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Geliştirilen algoritma ve açık kaynak Python kütüphaneleri kullanılarak TI ve DIAD yöntemleri değerlendirilmiştir. TI bilgileri için AG verileri ve faz tanımlama %10'a kadar gürültü altında elde edilmiştir. DIAD için, TT bilgisi, rastgele etkilenen veya etkilenmeyen kayıtları içeren geçmiş veriler kullanılarak test edilmiştir.



Şekil 4.1 Önerilen Şebeke Model Mimarisinin Gösterimi

Ardından olay sonrası optimal yük restorasyonu ve kayıp minimizasyonu, MILP tabanlı matematiksel bir model kullanılarak incelenmiştir. GAMS yazılımında

bulunan CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. Zaman granülasyonu 15 dakika olarak kabul edilmiş olup toplam süre 24 saattir. Şekil 4.1'de önerilen sistemin detaylı şematik gösterimi sunulmaktadır.

4.1 Giriş Verileri

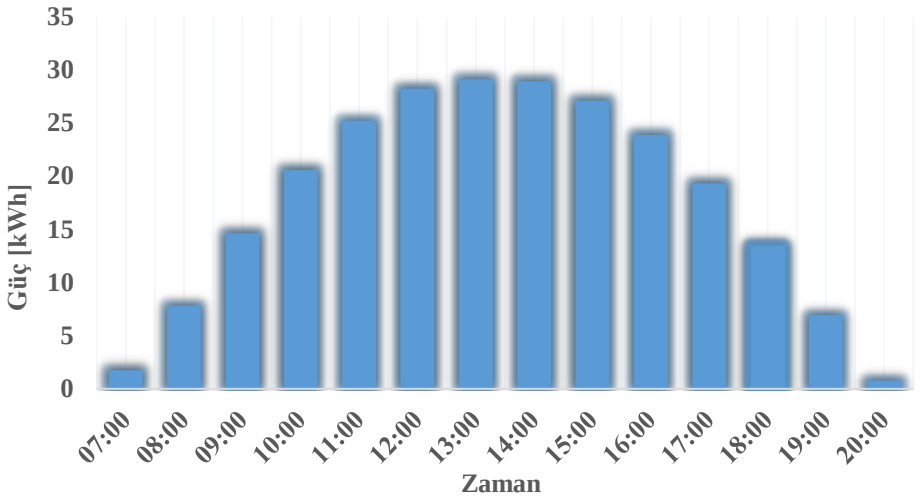
Önerilen çalışma, 15 baralı dağıtım test sisteminin [90] IEEE AG test sistemi kullanılarak oluşturulmuş güç sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem, farklı MŞ grupları olarak MŞ'ye dahil edilen yük, depolama ve üretim birimlerini içermektedir. Sistemde dağıtım ölçeğinde 14 normal 2 kritik yük, AG sisteminde 55 son kullanıcı bölgesi yük profili bulunmaktadır. Bu sistemde arıza bölgeleri farklı MŞ grupları oluşturarak MŞ'ye dahil edilen yük, depolama ve üretim birimlerini içermektedir. Tablo 4.1, baralara bağlı yük, depolama ve üretim birimlerinin detaylı bir temsili sunmaktadır. "G" gösterimi, daha küçük parçalardan oluşan yük ve kaynak elemanlarının bir grup halinde olduğunu simgelemektedir. Kesinti durumunda bazı baralarda EAİ bölgeleri kullanılarak sistemin ayağa kaldırılması sağlanmıştır. Şekil 4.2'de bara-2'de bulun FV sistem üretim değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Önerilen Sistemde Yük, Kaynak Sayıları ve Konumu

Sistem	Normal Yük	Kritik Yükler	ŞDS	EA	FV	MSP	Sistem	Yükler	Kritik Yükler	ŞDS	EA	FV	MSP
Ref. Bara							Bara-10	1G					
Bara-1							Bara-11	1G					
Bara-2	1G		1G	8	1	1	Bara-12	1G					
Bara-3	1G			5		1	Bara-13						
Bara-4	1G			12		1	Bara-14	1G					
Bara-5	1G	1G					Bara-15						
Bara-6	1G						MŞ-1	1G+AG					
Bara-7	1G						MŞ-2	1G+AG					
Bara-8		1G					MŞ-3	1G+AG					
Bara-9	1G						Toplam	14G+3AG	2G	1G	25	1	3

Bu yapıda Tablo 4.2'de baralarda bulunan ŞDS için depolama ve EA'ların araçtan şebekeye akış olacak şekilde şebeke destekleyici birim olarak kullanılması durumu için gösterilen sistemin teknik elektriksel özellikleri gösterilmiştir. EA için ilave ayrıntılı teknik özellikler [91]'de detaylı olarak gösterilmiştir. Tablo 4.3'te ise kullanılan EA'ların temel elektriksel özellikleri gösterilmiştir. Önerilen sistemde 3

farklı ŞDS içerisinde 3 mikro generatör grubu, 1 FV sistem, 2 batarya sistemi ve 25 EA sistemi kullanılmıştır.



Şekil 4.2 FV sistem Üretim Profili

Tablo 4.2 Şebeke Destek Birim Noktası Kaynakların Elektriksel Özellikleri

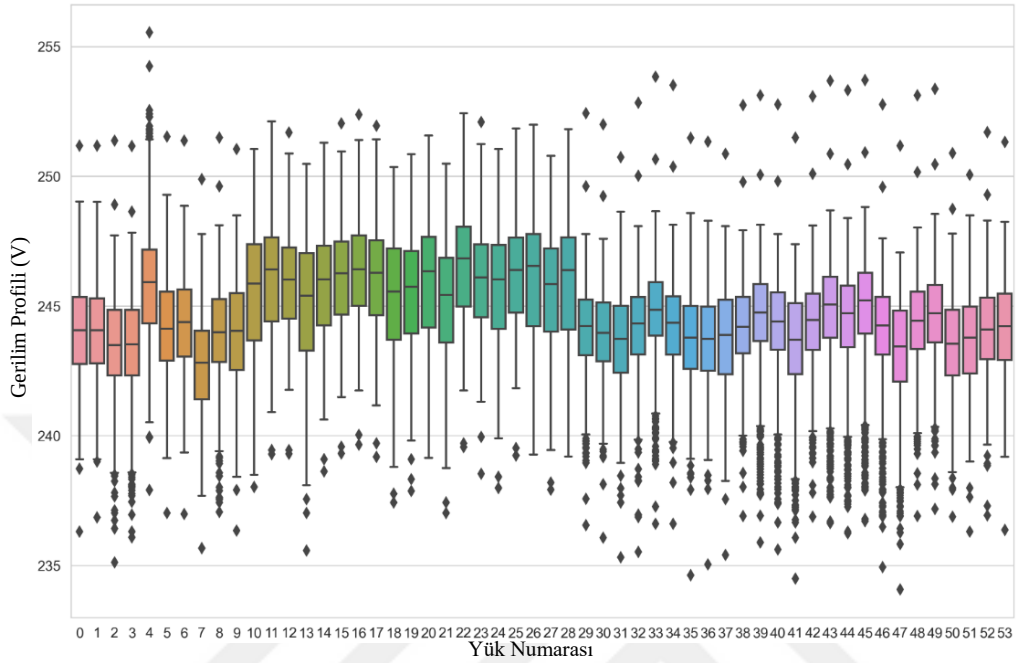
ŞDS Bara No	Maks EDS kap. [kWh]	Min. EDS kap. [kWh]	Bas. SOE [kWh]	Şarj/ Deşarj Oranı [kW]	Verim
i2	1320,00	260,04	1160,00	140,04	0,95
i2	484,20	96,84	287,46	549,72	0,95
i3	267,28	53,46	170,42	37,44	0,95
i4	880,28	176,06	592,06	764,32	0,95

Tablo 4.3 Elektrikli Araçların Genel Karakteristikleri

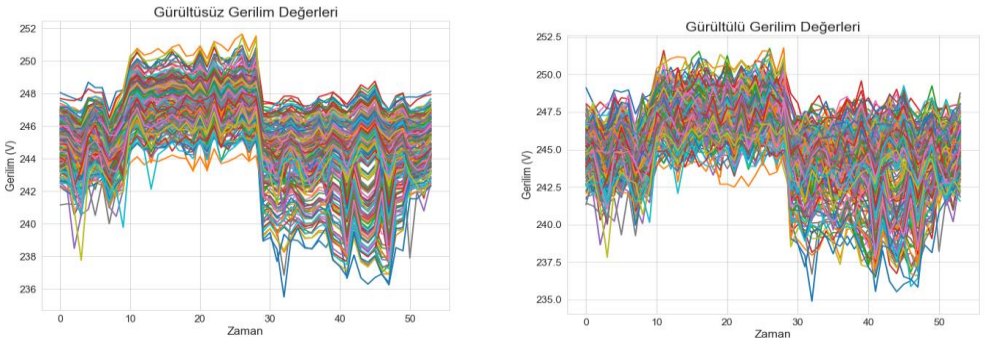
Özellik	Chevrolet Bolt	Seat Mii	Hyundai Kona	Audi e-tron	WW Golf
EA maks	66	36,8	39,2	95	35,8
EA min	13,2	7,36	7,84	19	7,16
Şarj oranı	7,2	7,2	7,2	150	50
Özellik	**BMW İ3**	**Mercedes Eqc 400**	**Porsche Taycan 4s**	**Tesla Model X**	**KIA SOUL**
EA maks	42,2	80	93,4	100	39,2
EA min	8,44	16	18,68	20	7,84
Şarj oranı	11	110	50	120	7,2

Son kullanıcı bölgesi FB'de her bir sayaç için geçmişe bağlı gerilim profili analiz edilmiş. Profillerdeki ani değişim tespiti ve benzer profillerin sınıflandırması sağlanmıştır. FB'de benzer fazdaki kullanıcıların gerilim profillerindeki benzerlik 3 farklı faz için şekil 4.3'te görülmektedir. FB ve TT için gerilim değişimine etkisi gürültü altında test edilmektedir. Gürültü seviyesinde oluşan yüksek bir

değişimdeki gerilim profili için şekil 4.4'teki gibi görülmektedir. TT tanımlama AG ölçeğinde son kullanıcı dışındaki düğümler, dağıtım bazında da şebeke destek noktası dışındaki baralar bilinmeyen bara olarak sunulmaktadır.



Şekil 4.3 Son Kullanıcı Gerilim Profili



Şekil 4.4 Gürültü Seviyesine Bağlı Gerilim Değişimi

Önerilen DIAD sistem geçmiş verilere analiz edildiğinde 1D-CNN modelinde, girişteki her 55 sayaç için 1440 periyotluk zaman serisi çoğaltılarak toplamda gauss random veri üretimi kullanılarak 14400 veri örneği oluşturulmuştur. Bunların 2880 tanesi, bozulmamış sayaçları gösteren 1 değerini temsil ederken, modelin gerçek operasyonel verilerle test edilmesi için 1152 örnek kullanılmıştır. FB yöntemlerinde benzer profil veri seti kullanılmıştır. Bu yöntemlerde temel olarak sistemde son

kullanıcıların gerilim profilinin değişimi temelde analiz edilmiştir. Arıza ve kesinti durumunda gerilim profilinin değişmesi arıza durumunda gerilim profilin artması veya sayaç verisinin sıfırlanması gibi yöntemler belirleyici olmaktadır.

4.2 Benzetim Sonuçları

Önerilen test sistemi altında üç farklı topoloji saldırı durumu için gerçekleştirilmiştir. 1. durumda, Bara-1'deki bir arıza sistemin çökmesine ve tüm otobüsleri etkilemesine neden olmuştur. Acil tedarik noktalarında Bara-2, Bara-3 ve Bara-4'te geniş ölçekli topoloji bölgeleri oluşturulmuş ve olay sonrası yük restorasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu hatada MŞ-1, MŞ-2 ve MŞ-3 bölgeleri de etkilenmiştir. 2. Durumda, Bara-2 ve Bara-3 bölgelerinde oluşabilecek bir arıza dikkate alınmış ve Bara-3 ve Bara-4 ana hatları, 5, 11, 12, 13, 14, 15 baraları ile MŞ2 ve MŞ3 bölgelerinin etkilendiği durum test edilmiştir. Bu acil durumda, Bara-3 ve Bara-4, yük destek noktasında destekleyici noktalar olarak kullanılmış ve yük restorasyonu ve konfigürasyon çalışmaları için 9 ana bara ve 2 MŞ alt-yük grubu bölgelerinden oluşan bir bölge oluşturulmuştur. 3. durumda, Bara-3 bölgesini kapsayan bir saldırı durumu ele alınmıştır. Sistemi destekleyen tek nokta Bara-5'tir. Bara 5, 14, 15 ve MŞ3 alt istasyon bölgelerinden topoloji bölgeleri oluşturulmuş ve yük restorasyonu gerçekleştirilmiştir. Durum-4'te ise kesinti süresinin kısa olduğu ve müdahale eden generatörün az olduğu durum koşulu ele alınmıştır. Durum-5'te Durum-4'teki senaryoda yalnızca generatör grubunun olduğu Durum-6'da yalnızca ŞDS (EA dahil) gruplarının bulunduğu, Durum-7'de her ikisinin de bulunduğu, Durum-8'de ise yalnızca FV sistem restorasyon sürecinde kullanıldığı durum şartları dikkate alınarak konu kapsamı detaylıca incelenmektedir.

Tablo 4.4'te Durum-1 çalışması için gürültü seviyesine bağlı olarak akıllı sayaç verisi kullanılarak oluşturulan modelde topoloji bilgisinin olay öncesi yüzdesel başarı oranı ve AG için son kullanıcı faz bilgisi ölçülen doğruluk değeri gösterilmektedir. Buna göre önerilen modelde başarı oranın yüksek olduğu ancak gürültü seviyesinin çok yüksek olduğu durumlarda nispeten düştüğü görülmektedir.

Sistem topolojisi bilgisi, farklı gürültü seviyelerinde (%100'den %93.8'e kadar) zaman içinde elde edilmiştir. Önerilen DIAD yaklaşımı kullanılarak, saldırı sırasında sistemdeki farklı noktalardaki topoloji değişiklikleri her bir durum için

doğru bir şekilde belirlenmektedir. Bu oluşturulan topoloji geri kazanım bölgelerinde hızlı bir şekilde yükün geri kazanılmasını sağmaktadır.

Tablo 4.4 Gürültü Seviyesine Bağlı TT ve FB Başarı Oranı

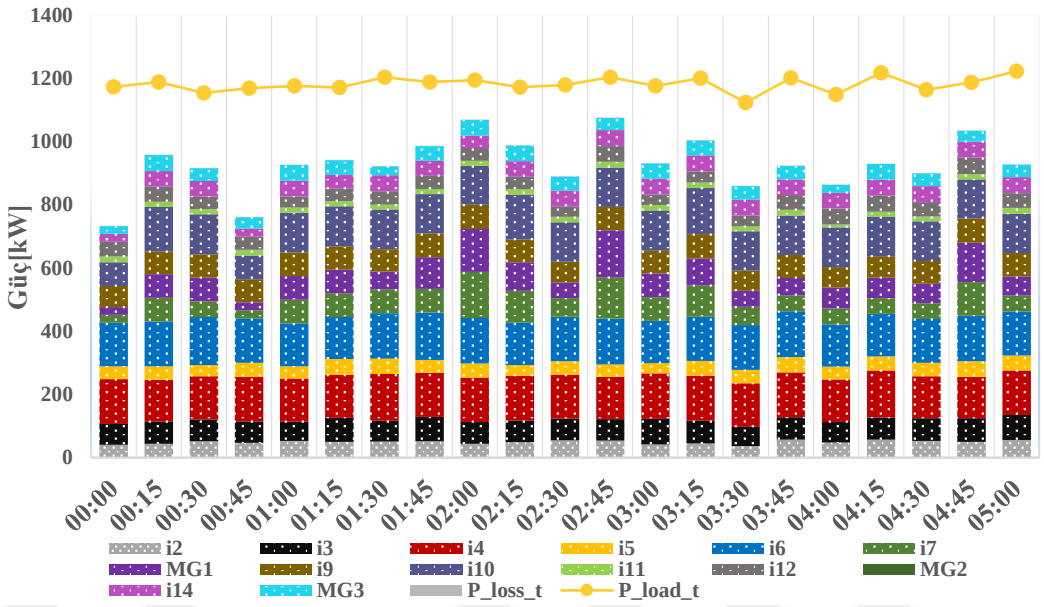
Gürültü Level	TT Başarı Oranı	FB Başarı Oranı
2%	100	100
3%	100	100
5%	98.3	98.3
10%	89.7	89.7

Tablo 4.5 Yük Restorasyon Durum Koşulları için Sonuçlar

Durum No	Toplam Yük İyileştirme [MWh]	Kritik Yük Kurtarma [MWh]	Kayıp [kWh]	Oran
1	89,3	11,1	55,5	79%
2	40,4	2,6	9,9	71%
3	20,6	2,2	3,1	66%

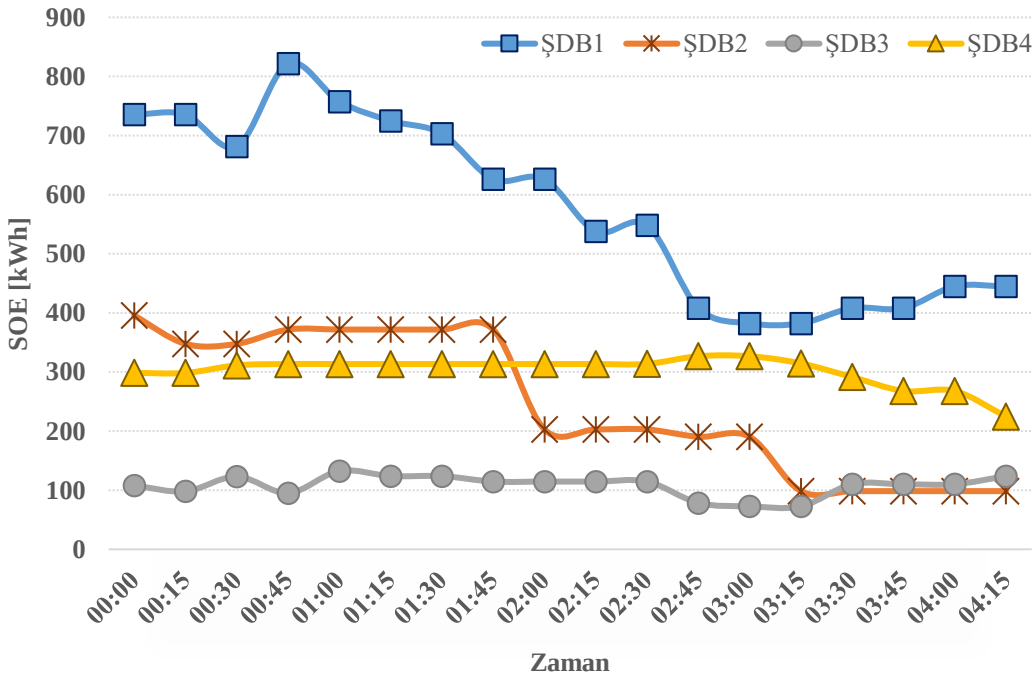
Tablo 4.5, her bir durum için geri kazanılan yük miktarını ve öncelikli kritik yükü, ayrıca sistemdeki toplam yük kaybını sunmaktadır. Durum-1'de, 113,075 MWh'lık yükün %79'u olan 89,296 MWh geri kazanıldı ve Bara-1'deki sistem hatası sonrasında 11,1 MWh kritik yük geri alındı. Durum-2'de, 56,998 MWh'lık yükün %71'i olan 40,413 MWh geri kazanıldı ve Bara-2 ve Bara-3'te bir arıza durumunda 2,6 MWh ve 2,2 MWh kritik yük geri alındı. Durum-3'te, 31.070 MWh'lık yükün %71'i olan 20.635 MWh geri kazanıldı. Yük akışı süreci sırasında gözlenen toplam kayıplar, sırasıyla Durum 1, 2 ve 3 için 0.055 MWh, 0.009 MWh ve 0.0038 MWh olarak gösterilmektedir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da Durum-1 için her bir düğüm için saat 00.00-05.00 arasındaki süreçte her alt istasyona giden güç, güç kaybı, yük talebi ve acil destek noktalarının enerji alışverişi gösterilmektedir. Toplam yük talebinin miktarı, periyod boyunca ortalama 1,176 MWh olduğunu gösteren sarı noktalar ile de belirtilmiştir. Acil destek noktalarının dönem boyunca enerji alışverişi de Şekil 4.5'te kWh cinsinden gösterilmiştir. 1,237 MW'lık süre zarfında, yük restorasyonu EA'ların ve ŞDS'lerin bataryalarından gerçekleştirilmiştir.

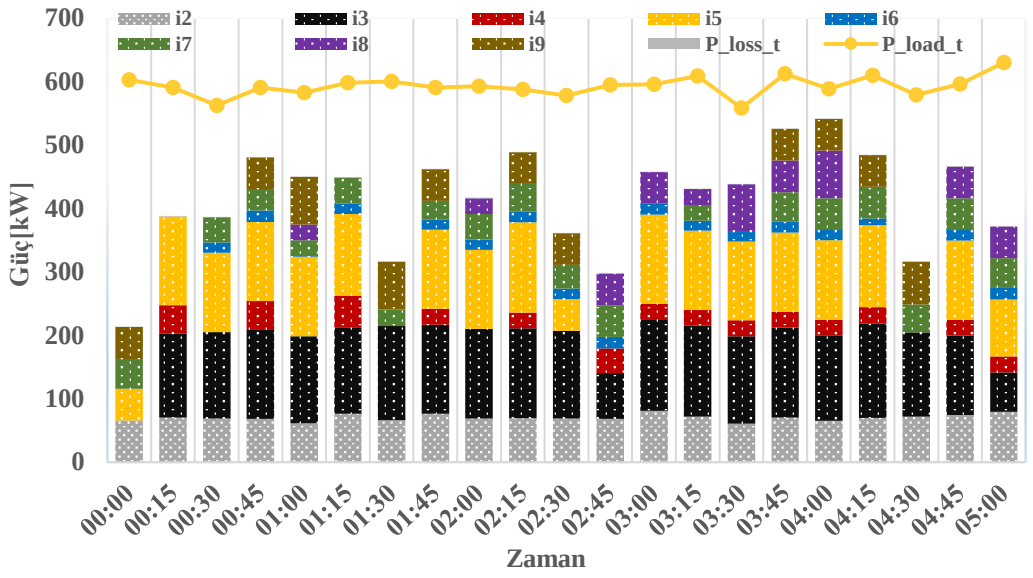


Şekil 4.5 Durum-1 için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi

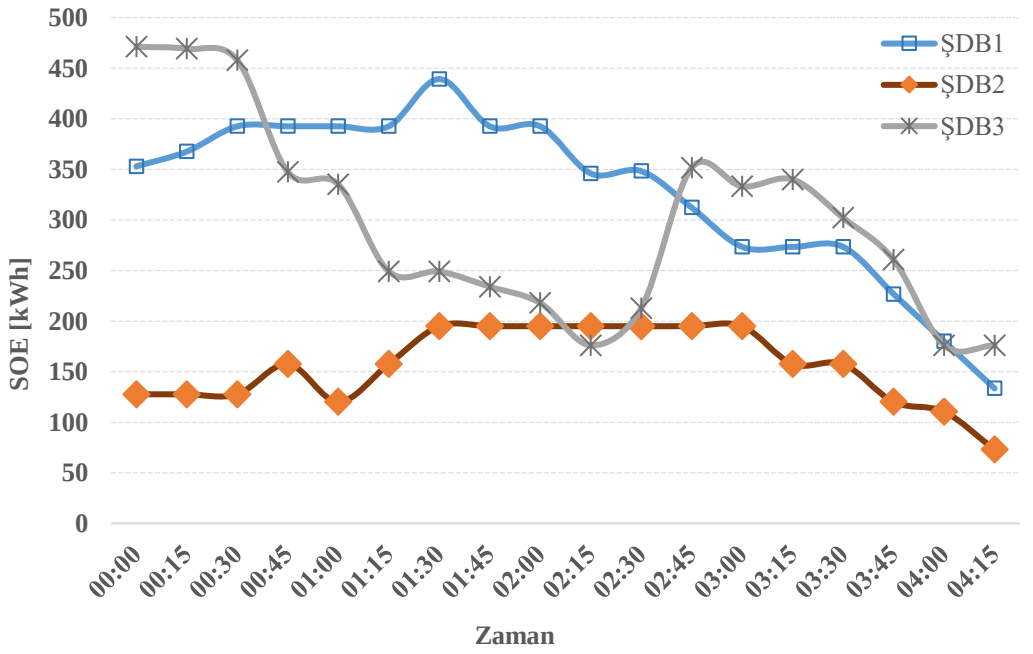
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de, Durum-2 için her alt istasyona giden güç, güç kaybı, yük talebi ve acil destek noktalarının enerji alışverişi gösterilmektedir. Şebeke ana baradan daha uzak bölgeyi içeren bu durum koşullarında yük kurtarma oranın düştüğü daha stabil enerji değişimin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6 Durum-1 için ŞDB'nin Enerji Alışverişi



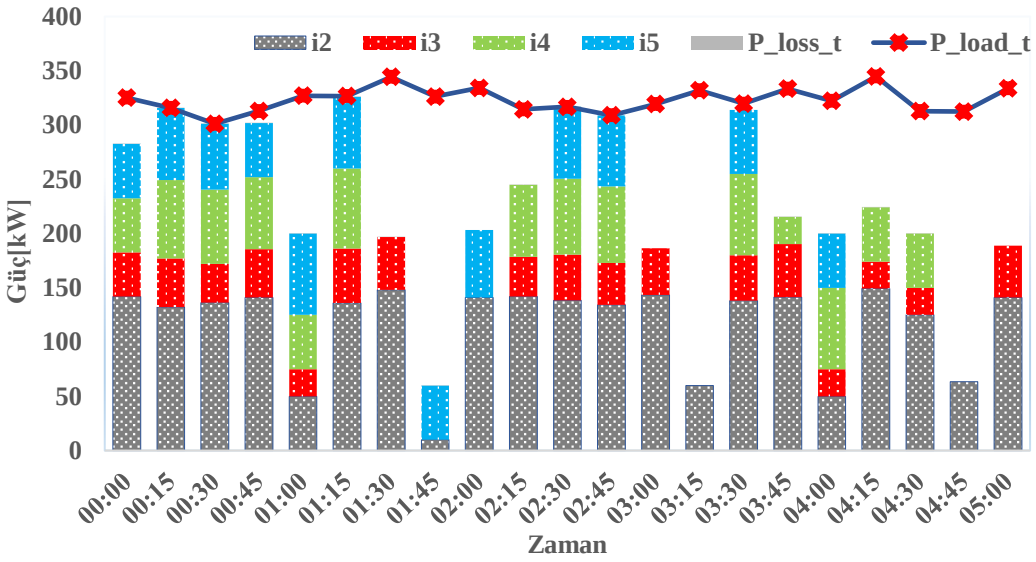
Şekil 4.7 Durum-2 için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi



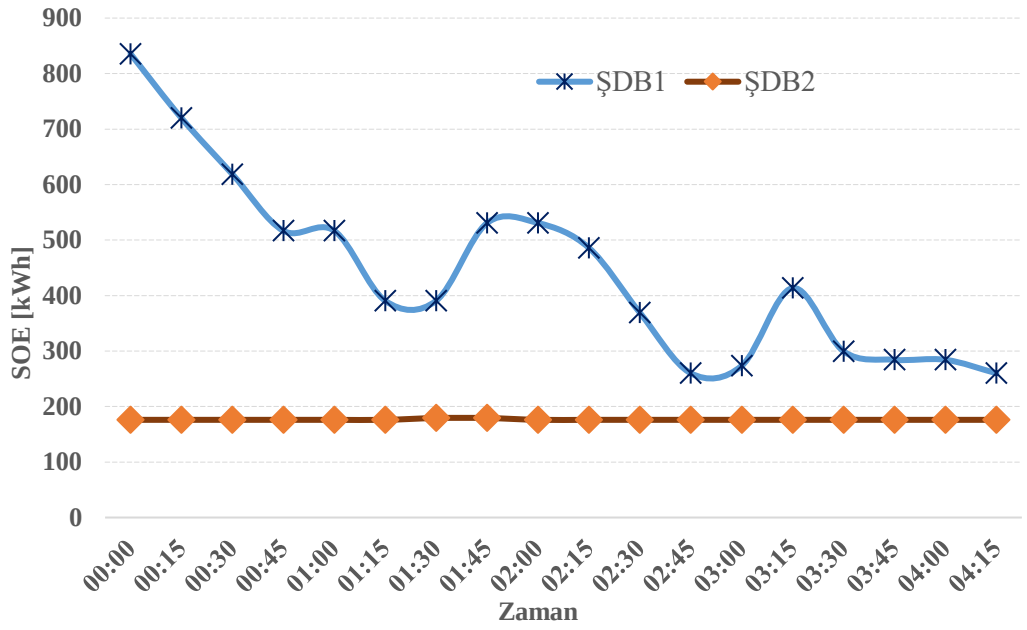
Şekil 4.8 Durum-2 için ŞDB'nin Enerji Alışverişi

Durum-3 ile ilgili güç, güç kaybı, yük talebi ve acil destek noktalarının enerji alışverişi Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Durum-3'te yük kurtarmanın oransal olarak en az ve şebeke ana bara noktasında yakınlaştıkça veya kritik yükler

düşünüldüğü durumda yük restorasyon oranın amaç fonksiyonunda belirtildiği gibi artığı gösterilmektedir.

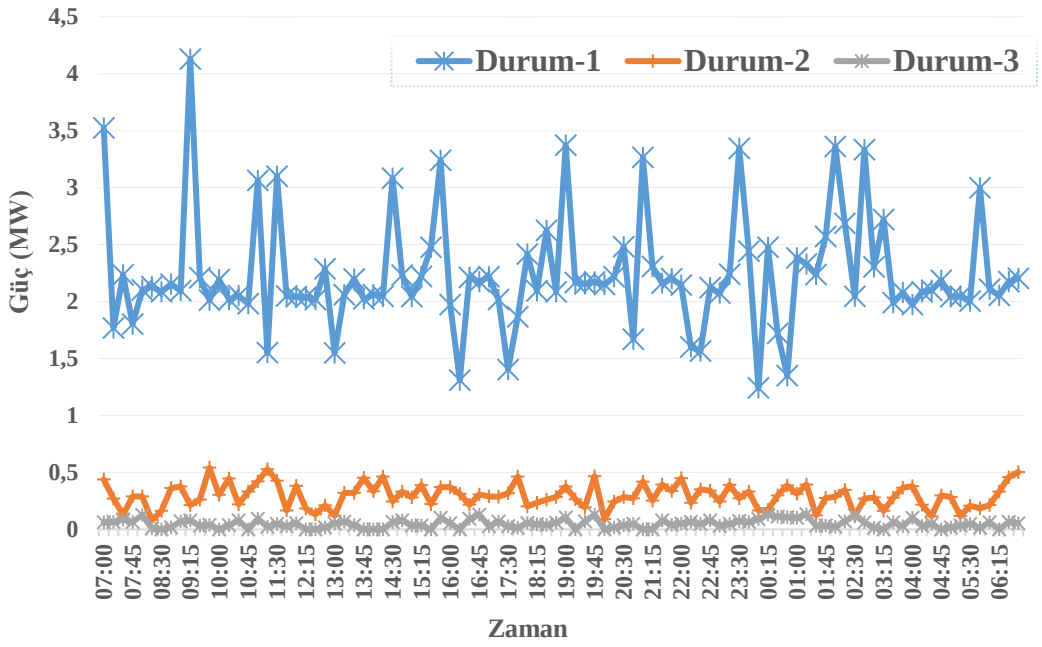


Şekil 4.9 Durum-3 için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi



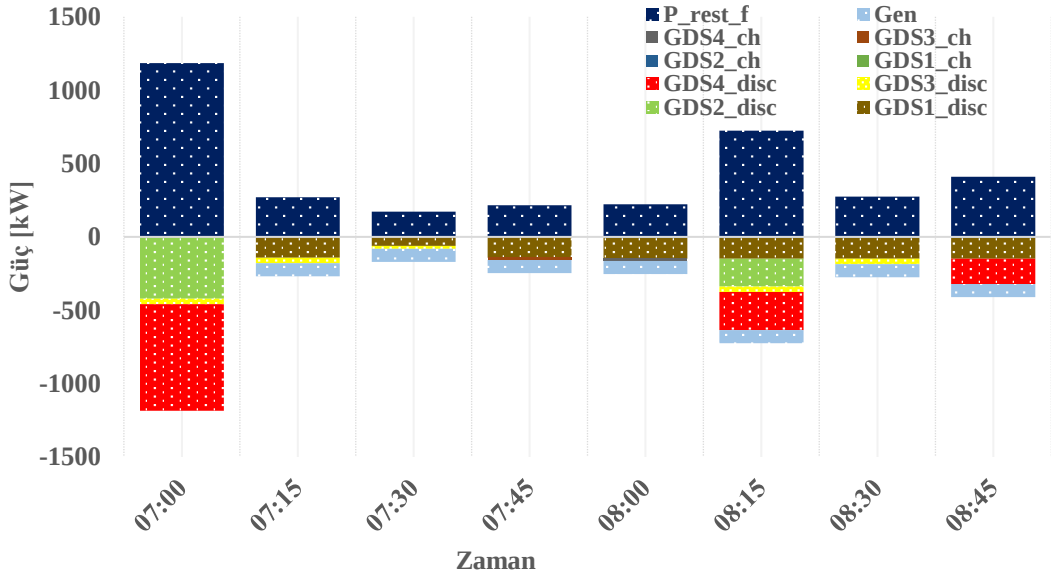
Şekil 4.10 Durum-3 için ŞDB'nin Enerji Alışverişi

Her bir durum koşulu için güç kayıpları şekil 4.11'de sunulmuştur. Şekil 4.11'e göre kayıpların ana bara yakın baralarda orantısal olarak yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11 Durum Koşulları için Kayıplar

Durum-4'te kısa süreli bir kesinti durumunda yük restorasyon profili incelenmektedir. Şekil 4.12'de güç değişimi görülmekte sistemde EA'ların yük katılımına etkisinin yüksek olduğu nispeten generatör grubunun daha az etki ettiği söylenebilmektedir.



Şekil 4.12 Kısa Süreli Kesinti için Baralardaki Güç Değişimi Gösterimi

Tablo 4.6'da generatör, ŞDS, generatör ve ŞDS gruplarının birlikte kullanıldığı ve yalnızca FV için yük restorasyon değerleri ve yüzdesel oranları gösterilmiştir. ŞDS ve generatörün birlikte kullanıldığı durumda hem oransal hem de yük kurtarma oranı olarak sisteme en faydalı durum olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 4.6 Kullanılan ŞDS Birimine Bağlı Restorasyon Oranı Gösterimi

Durum No	Yük Kurtarma [kW]	Oran
5	2400,00	25,39
6	2844,85	30,10
7	4944,85	52,31
8	38,19	0,40

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması güç sistemlerinin güvenilirliğini ve kontrol edilebilirliğini artırmak, aynı zamanda olumsuz koşullar ve siber saldırılar gibi potansiyel tehditlere karşı direnç geliştirmek için kapsamlı bir sistem önermektedir. Acil durumlarda, güç sistem operatörleri topoloji saldırılarına karşı dayanıklı stratejiler geliştirebilmektedir. IEEE AG test sistemi ve modifiye edilmiş 15 baralı dağıtım test sistemi üzerinde yapılan deneyler, önerilen sistemin arıza ve saldırılarını etkin bir şekilde tespit etme ve giderme yeteneğini göstermiştir.

TT tabanlı graf öğrenme algoritması ve DIAD sistemi, akıllı sayaç hatalarını doğru bir şekilde tespit etme ve düzeltme kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Yük restorasyon süreci, MILP tabanlı bir yaklaşım kullanılarak iyileştirilmiştir. ŞDS, FV sistem, EA ve mobil generatörler gibi esneklik unsurlarının kullanılması, sistem kayıplarını azaltmış ve kritik yüklerin hızlı bir şekilde geri kazanılmasını sağlamıştır. Önerilen sistemde tespit edilen şebeke kesinti bölgelerinde arıza sürecinde kritik yükler başta gözetilerek farklı durum koşulları için yüklerin maksimum seviyede restorasyonu sağlanmıştır. Önerilen tez enerji şebekesinin güvenliği ve dayanıklılığı hakkında ileri çalışmalarda bulunmak isteyen araştırmacılar için değerli bir referans niteliği taşımaktadır. Bu çalışmalar enerji sistemlerinin gelecekteki zorluklarla başa çıkma kapasitesini geliştirerek enerji güvenliğinin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

KAYNAKÇA

[1] R. Campbell, “Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency,” 2012.

[2] A. Umunnakwe, H. Huang, K. Oikonomou, and K. R. Davis, “Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 149, p. 111252, Oct. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111252.

[3] A. Benzerga, D. Maruli, A. Sutera, A. Bahmanyar, S. Mathieu, and D. Ernst, “Low-voltage network topology and impedance identification using smart meter measurements,” IEEE Xplore, Jun. 01, 2021.

[4] S. J. Pappu, N. Bhatt, R. Pasumarthy, and A. Rajeswaran, “Identifying Topology of Low Voltage Distribution Networks Based on Smart Meter Data,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 5113–5122, Sep. 2018, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2680542.

[5] Guido Cavraro, Reza Arghandeh, Kameshwar Poolla, and Alexandra von Meier, “Data-driven approach for distribution network topology detection,” Jul. 2015, doi: https://doi.org/10.1109/pesgm.2015.7286490.

[6] M. Farajollahi, A. Shahsavari, and H. Mohsenian-Rad, “Topology Identification in Distribution Systems Using Line Current Sensors: An MILP Approach,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 2, pp. 1159–1170, Mar. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2933006.

[7] L. Chen, M. Farajollahi, Mahdi Ghamkhari, W. Zhao, S. Huang, and Hamed Mohsenian-Rad, “Switch Status Identification in Distribution Networks Using Harmonic Synchrophasor Measurements,” vol. 12, no. 3, pp. 2413–2424, May 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2020.3038214.

[8] N. Duan and E. M. Stewart, “Deep-learning-based power distribution network switch action identification leveraging dynamic features of distributed energy resources,” IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 13, no. 14, pp. 3139–3147, Jun. 2019, doi: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6195.

[9] L. Zhang et al., “Distribution Network Topology Identification Considering Nonsynchronous Multi-prosumer Data Measurement,” IEEE Access, pp. 1–1, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/access.2021.3052993.

[10] P. Shah and X. Zhao, “Network Identification Using μ-PMU and Smart Meter Measurements,” vol. 18, no. 11, pp. 7572–7586, Nov. 2022, doi: https://doi.org/10.1109/tii.2022.3156652.

[11] Q. Li, T. Cui, Y. Weng, R. Negi, F. Franchetti, and M. Deljanin Ilic, “An Information-Theoretic Approach to PMU Placement in Electric Power

Systems," vol. 4, no. 1, pp. 446–456, Mar. 2013, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2228242.

[12] X.-C. Guo, C.-S. Liao, and C.-C. Chu, "Enhanced Optimal PMU Placements With Limited Observability Propagations," IEEE Access, vol. 8, pp. 22515–22524, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/access.2020.2967066.

[13] H. S. Karimi and B. Natarajan, "Joint Topology Identification and State Estimation in Unobservable Distribution Grids," IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1–1, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3102179.

[14] Behrouz Azimian, Reetam Sen Biswas, A. Pal, L. Tong, and Gautam Dasarathy, "State and Topology Estimation for Unobservable Distribution Systems Using Deep Neural Networks," vol. 71, pp. 1–14, Jan. 2022, doi: https://doi.org/10.1109/tim.2022.3167722.

[15] X. He, R. C. Qiu, Q. Ai, and T. Zhu, "A Hybrid Framework for Topology Identification of Distribution Grid With Renewables Integration," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 2, pp. 1493–1503, Mar. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3024955.

[16] Q. Hu, S. Bu, S. Xia, and H. Cai, "A Novel Voltage Regulation Strategy for Secure Operation of High Renewable Penetrated Distribution Networks with Different R/X and Topologies," May 2019, doi: https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2019.8881753.

[17] J. Yu, Y. Weng, and R. Rajagopal, "PaToPa: A Data-Driven Parameter and Topology Joint Estimation Framework in Distribution Grids," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 4, pp. 4335–4347, Jul. 2018, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2778194.

[18] Y. Weng, Y. Liao, and R. Rajagopal, "Distributed Energy Resources Topology Identification via Graphical Modeling," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 4, pp. 2682–2694, Jul. 2017, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2016.2628876.

[19] Y. Raghuvamsi, K. Teeparthi, and V. Kosana, "A novel deep learning architecture for distribution system topology identification with missing PMU measurements," Results in Engineering, vol. 15, p. 100543, Sep. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100543.

[20] W. Jiang et al., "A Physical Probabilistic Network Model for Distribution Network Topology Recognition Using Smart Meter Data," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 6, pp. 6965–6973, Nov. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2936148.

[21] O. Ardakanian et al., "On Identification of Distribution Grids," IEEE Transactions on Control of Network Systems, vol. 6, no. 3, pp. 950–960, Sep. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/tcns.2019.2891002.

[22] R. S. Biswas, A. Pal, T. Werho, and V. Vittal, "A Graph Theoretic Approach to Power System Vulnerability Identification," IEEE Transactions on Power

Systems, vol. 36, no. 2, pp. 923–935, Mar. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3010476.

[23] G. Cavraro, A. Bernstein, V. Kekatos, and Y. Zhang, “Real-Time Identifiability of Power Distribution Network Topologies With Limited Monitoring,” IEEE Control Systems Letters, vol. 4, no. 2, pp. 325–330, Apr. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/lcsys.2019.2926101.

[24] Y. Xu et al., “An Adaptive-Importance-Sampling-Enhanced Bayesian Approach for Topology Estimation in an Unbalanced Power Distribution System,” vol. 37, no. 3, pp. 2220–2232, May 2022, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3121612.

[25] S. Taheri, Vassilis Kekatos, and Guido Cavraro, “An MILP Approach for Distribution Grid Topology Identification using Inverter Probing,” Jun. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/ptc.2019.8810900.

[26] M. Babakmehr, Marcelo Godoy Simões, M. B. Wakin, and Farnaz Harirchi, “Compressive Sensing-Based Topology Identification for Smart Grids,” vol. 12, no. 2, pp. 532–543, Jan. 2016, doi: https://doi.org/10.1109/tii.2016.2520396.

[27] S. Lin and H. Zhu, “Data-driven Modeling for Distribution Grids Under Partial Observability,” Aug. 2021, doi: https://doi.org/10.48550/arxiv.2108.08350.

[28] Y. Guo, Y. Yuan, and Z. Wang, “Distribution Grid Modeling Using Smart Meter Data,” IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1–1, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3118004.

[29] J. Zhao, L. Li, Z. Xu, X. Wang, H. Wang, and X. Shao, “Full-Scale Distribution System Topology Identification Using Markov Random Field,” vol. 11, no. 6, pp. 4714–4726, Nov. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2020.2995164.

[30] Rajasekhar Anguluri, Gautam Dasarathy, O. Kosut, and L. Sankar, “Grid Topology Identification With Hidden Nodes via Structured Norm Minimization,” vol. 6, pp. 1244–1249, Jan. 2022, doi: https://doi.org/10.1109/lcsys.2021.3089993.

[31] N. Zhou, L. Luo, G. Sheng, and X. Jiang, “Power Distribution Network Dynamic Topology Awareness and Localization Based on Subspace Perturbation Model,” vol. 35, no. 2, pp. 1479–1488, Mar. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2019.2943695.

[32] J. Zhang, Y. Wang, Y. Weng, and N. Zhang, “Topology Identification and Line Parameter Estimation for Non-PMU Distribution Network: A Numerical Method,” vol. 11, no. 5, pp. 4440–4453, Sep. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2020.2979368.

[33] L. Ma, L. Wang, and Z. Liu, “Topology Identification of Distribution Networks Using a Split-EM Based Data-Driven Approach,” vol. 37, no. 3, pp. 2019–2031, May 2022, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3119649.

[34] K. Moffat, M. Bariya, and A. Von Meier, “Unsupervised Impedance and Topology Estimation of Distribution Networks—Limitations and Tools,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 1, pp. 846–856, Jan. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2956706.

[35] Ananth Narayan Samudrala, M. Hadi Amini, S. Kar, and R. S. Blum, “Optimal Sensor Placement for Topology Identification in Smart Power Grids,” Mar. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/ciss.2019.8692792.

[36] Y. Sharon, A. M. Annaswamy, A. L. Motto, and A. Chakraborty, “Topology identification in distribution network with limited measurements,” Jan. 2012, doi: https://doi.org/10.1109/isgt.2012.6175638.

[37] X. Chen, Chen Yongjin, Wu Zhaolong, Y. Yi, and Rong Huixian, “Flexible Distribution System Reconfiguration Using Graph Theory and Topology Identification Technology,” Nov. 2018, doi: https://doi.org/10.1109/powercon.2018.8602307.

[38] S. Mousavizadeh, M.-R. Haghifam, and M.-H. Shariatkhah, “A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources,” Applied Energy, vol. 211, pp. 443–460, Feb. 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.067.

[39] Y. Yuan and Z. Wang, “Mining Smart Meter Data to Enhance Distribution Grid Observability for Behind-the-Meter Load Control: Significantly improving system situational awareness and providing valuable insights,” IEEE Electrification Magazine, vol. 9, no. 3, pp. 92–103, Sep. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/mele.2021.3093636.

[40] W. Wang and N. Yu, “Estimate Three-Phase Distribution Line Parameters with Physics-Informed Graphical Learning Method,” IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1–1, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3134952.

[41] S. Park, D. Deka, S. Backhaus, and M. Chertkov, “Learning With End-Users in Distribution Grids: Topology and Parameter Estimation,” IEEE Transactions on Control of Network Systems, vol. 7, no. 3, pp. 1428–1440, Sep. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tcns.2020.2979882.

[42] M. Brenna et al., “Automatic Distributed Voltage Control Algorithm in Smart Grids Applications,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 877–885, Jun. 2013, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2206412.

[43] A. B. Pengwah, L. Fang, R. Razzaghi, and L. L. H. Andrew, “Topology Identification of Radial Distribution Networks Using Smart Meter Data,” IEEE Systems Journal, pp. 1–12, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/jsyst.2021.3128175.

[44] F. Therrien, L. Blakely, and M. J. Reno, “Assessment of Measurement-Based Phase Identification Methods,” IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 128–137, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/oajpe.2021.3067632.

[45] V. Arya et al., “Phase identification in smart grids,” IEEE Xplore, Oct. 01, 2011. https://ieeexplore.ieee.org/document/6102329.

[46] A. Heidari-Akhijahani, A. Safdarian, and F. Aminifar, “Phase Identification of Single Phase Customers and PV Panels via Smart Meter Data,” IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1–1, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3074663.

[47] M. Vanin et al., "Phase Identification of Distribution System Users Through A MILP Extension Of State Estimation," arXiv preprint arXiv:2206.08436,2022.

[48] S. Liu et al., “Practical Method for Mitigating Three-Phase Unbalance Based on Data-Driven User Phase Identification,” vol. 35, no. 2, pp. 1653–1656, Mar. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2965770.

[49] V. A. Jimenez and A. Will, “A new data-driven method based on Niching Genetic Algorithms for phase and substation identification,” Electric Power Systems Research, vol. 199, p. 107434, Oct. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107434.

[50] H. Huang, Y. Hu, S. Liu, and L. Xie, “A recursive Bayesian approach to load phase detection in unbalanced distribution system,” Feb. 2017, doi: https://doi.org/10.1109/tpec.2017.7868280.

[51] Sebastián García, J. M. Mora-Merchán, Diego Francisco Larios, E. Personal, A. Parejo, and C. León, “Phase topology identification in low-voltage distribution networks: A Bayesian approach,” vol. 144, pp. 108525–108525, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108525.

[52] M. Xu, R. Li, and F. Li, “Phase Identification With Incomplete Data,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2777–2785, Jul. 2018, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2619264.

[53] J. Li et al., “Identification of distribution network topology parameters based on multidimensional operation data,” vol. 7, pp. 304–311, Apr. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.065.

[54] Peng Qingning, X. Liu, F. Hu, J. Ma, and K. Sun, “Consumers’ Phase Identification in Low Voltage Station Area Based on Wavelet Analysis of Consumption Data*,” Jul. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/icpics52425.2021.9524193.

[55] H. Pezeshki and Wolfs, “Consumer phase identification in a three phase unbalanced LV distribution network,” Oct. 2012, doi: https://doi.org/10.1109/isgteurope.2012.6465632.

[56] A. Hoogsteyn, M. Vanin, A. Koirala, and D. Van Hertem, “Low voltage customer phase identification methods based on smart meter data,” Electric Power Systems Research, vol. 212, p. 108524, Nov. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108524.

[57] B. Foggo and N. Yu, “Improving Supervised Phase Identification Through the Theory of Information Losses,” vol. 11, no. 3, pp. 2337–2346, May 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2952080.

[58] Olivier Frédéric, A. Sutera, P. Geurts, Raphaël Fonteneau, and D. Ernst, “Phase Identification of Smart Meters by Clustering Voltage Measurements,” Jun. 2018, doi: https://doi.org/10.23919/pscc.2018.8442853.

[59] L. Zhou et al., “Consumer phase identification in low-voltage distribution network considering vacant users,” vol. 121, pp. 106079–106079, Oct. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106079.

[60] F. Olivier, D. Ernst, and R. Fonteneau, “Automatic phase identification of smart meter measurement data,” CIRED - Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 1579–1583, Oct. 2017, doi: https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1143.

[61] T. A. Short, “Advanced Metering for Phase Identification, Transformer Identification, and Secondary Modeling,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 651–658, Jun. 2013, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2219081.

[62] M.Á. González-Cagigal et al., “Identification of the Phase Connectivity in Distribution Systems Through Constrained Least Squares and Confidence-Based Sequential Assignment,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022.

[63] R. Mitra et al., “Voltage Correlations in Smart Meter Data,” Aug. 2015, doi: https://doi.org/10.1145/2783258.2788594.

[64] L. Blakely, M. J. Reno, and W. Feng, “Spectral Clustering for Customer Phase Identification Using AMI Voltage Timeseries,” IEEE Xplore, Feb. 01, 2019.

[65] Z. Nicholas, V. Rao., "Denoising with Singular Value Decomposition for Phase Identification in Power Distribution Systems," 2022.

[66] A. Simonovska and L. F. Ochoa, “Phase Grouping in PV-Rich LV Feeders: Smart Meter Data and Unconstrained k-Means,” Jun. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/powertech46648.2021.9495097.

[67] Miles, Reza Arghandeh, Alexandra von Meiery, Kameshwar Poollay, and Victor, “Phase identification in distribution networks with micro-synchrophasors,” Jul. 2015, doi: https://doi.org/10.1109/pesgm.2015.7286066.

[68] L. Zhou, Q. Li, Y. Zhang, J. Chen, Y. Yi, and S. Liu, “Consumer phase identification under incomplete data condition with dimensional calibration,”

vol. 129, pp. 106851–106851, Jul. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106851.

[69] Y. Liao, Y. Weng, G. Liu, Z. Zhao, C.-W. Tan, and R. Rajagopal, "Unbalanced multi-phase distribution grid topology estimation and bus phase identification," IET Smart Grid, vol. 2, no. 4, pp. 557–570, Dec. 2019, doi: https://doi.org/10.1049/iet-stg.2018.0291.

[70] M. Bariya, D. Deka, and A. von Meier, "Guaranteed Phase & Topology Identification in Three Phase Distribution Grids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 12, no. 4, pp. 3605–3612, Jul. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3061392.

[71] Z. S. Hosseini, Amin Khodaei, and Aleksi Paaso, "Machine Learning-Enabled Distribution Network Phase Identification," vol. 36, no. 2, pp. 842–850, Mar. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3011133.

[72] W. Wang and N. Yu, "Maximum Marginal Likelihood Estimation of Phase Connections in Power Distribution Systems," vol. 35, no. 5, pp. 3906–3917, Sep. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2977071.

[73] Vaclav Vycital, M. Ptacek, P. Toman, D. Topolanek, J. Drapela, and J. Zamphiropolos, "Phase Identification in smart metering pilot project Komorany," Jun. 2019, doi: https://doi.org/10.34890/944.

[74] S. Wang, S. Bi, and Y.-J. A. Zhang, "Locational Detection of the False Data Injection Attack in a Smart Grid: A Multilabel Classification Approach," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 9, pp. 8218–8227, Sep. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2983911.

[75] M. Esmalifalak, L. Liu, N. Nguyen, R. Zheng, and Z. Han, "Detecting Stealthy False Data Injection Using Machine Learning in Smart Grid," IEEE Systems Journal, vol. 11, no. 3, pp. 1644–1652, Sep. 2017, doi: https://doi.org/10.1109/jsyst.2014.2341597.

[76] James J.Q. Yu and Y. Hou, "Online False Data Injection Attack Detection With Wavelet Transform and Deep Neural Networks," vol. 14, no. 7, pp. 3271–3280, Jul. 2018, doi: https://doi.org/10.1109/tii.2018.2825243.

[77] Y. He, G. J. Mendis, and J. Wei, "Real-Time Detection of False Data Injection Attacks in Smart Grid: A Deep Learning-Based Intelligent Mechanism," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 5, pp. 2505–2516, Sep. 2017, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2703842.

[78] Z. Liu, Q. Wang, Y. Ye, and Y. Tang, "A GAN Based Data Injection Attack Method on Data-Driven Strategies in Power Systems," IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1–1, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2022.3159842.

[79] D. Flynn, A. B. Pengwah, R. Razzaghi, and L. L. H. Andrew, "An Improved Algorithm for Topology Identification of Distribution Networks Using Smart Meter Data and its Application for Fault Detection," IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1–1, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2023.3239650.

[80] Y. He, N. Jenkins, and J. Wu, “Smart Metering for Outage Management of Electric Power Distribution Networks,” Energy Procedia, vol. 103, pp. 159–164, Dec. 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.266.

[81] G. Huang, W. Yan, Z. Lu and X. Zhang, “Identification Method of Electricity Theft Based on DBSCAN and Pearson Correlation Analysis,” 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Chongqing, China, pp. 1010-1015, doi: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475642.

[82] D. Gu, Y. Gao, K. Chen, S. Junhao, Y. Li, and Y. Cao, “Electricity Theft Detection in AMI with Low False Positive Rate Based on Deep Learning and Evolutionary Algorithm,” IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1–1, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2022.3150050.

[83] H.-M. Chung, W.-T. Li, C. Yuen, W.-H. Chung, Y. Zhang, and C.-K. Wen, “Local Cyber-Physical Attack for Masking Line Outage and Topology Attack in Smart Grid,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 4, pp. 4577–4588, Jul. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2865316.

[84] Z. Liu and L. Wang, “Leveraging Network Topology Optimization to Strengthen Power Grid Resilience Against Cyber-Physical Attacks,” IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1–1, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2020.3028123.

[85] G. Liang, S. R. Weller, J. Zhao, F. Luo, and Z. Y. Dong, “A Framework for Cyber-Topology Attacks: Line-Switching and New Attack Scenarios,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1704–1712, Mar. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2776325.

[86] A. K. Erenoglu, S. Sancar, I. S. Terzi, O. Erdinc, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalao, “Resiliency-Driven Multi-Step Critical Load Restoration Strategy Integrating On-Call Electric Vehicle Fleet Management Services,” IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1–1, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2022.3155438.

[87] A. Khodaei, “Resiliency-Oriented Microgrid Optimal Scheduling,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1584–1591, Jul. 2014, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2311465.

[88] M. Khederzadeh and S. Zandi, “Enhancement of Distribution System Restoration Capability in Single/Multiple Faults by Using Microgrids as a Resiliency Resource,” IEEE Systems Journal, vol. 13, no. 2, pp. 1796–1803, Jun. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/jsyst.2019.2890898.

[89] Y. Wang et al., “Coordinating Multiple Sources for Service Restoration to Enhance Resilience of Distribution Systems,” vol. 10, no. 5, pp. 5781–5793, Jan. 2019, doi: https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2891515.

[90] J. Zhu, Y. Yuan, and W. Wang, “An exact microgrid formation model for load restoration in resilient distribution system,” International Journal of

Electrical Power & Energy Systems, vol. 116, p. 105568, Mar. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105568.

[91] Houssem R. E. H. Bouchekara, “Comprehensive Review of Radial Distribution Test Systems,” Jun. 2020, doi: https://doi.org/10.36227/techrxiv.12578648.

[92] Plugshare EV data, https://www.plugshare.com/, [Online; 2023].

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. A. Yaldiz, T. Gokcek, O. Erdinc, Y. Ates, "Resilience Oriented Restoration Strategy of Networked Microgrids Considering Grid Topology Against Data Intrusion Attacks," 2023 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Mugla, 2023.