T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK GÜÇ SANTRALİ İLE DESTEKLENEN GÜÇ SİSTEMİNDE ZAYIF KAYNAK BESLEME KOŞULLARINDA DESTEK VEKTÖR MAKİNALARIYLA MESAFE KORUMANIN GELİŞTİRİLMESİ

Yaşar Beyazıt YOLDAŞ

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Temmuz, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK GÜÇ SANTRALİ İLE DESTEKLENEN GÜÇ SİSTEMİNDE ZAYIF KAYNAK BESLEME KOŞULLARINDA DESTEK VEKTÖR MAKİNALARIYLA MESAFE KORUMANIN GELİŞTİRİLMESİ

Yaşar Beyazıt YOLDAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 20.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Recep YUMURTACI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Nurettin UMURKAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Bülent ORAL, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN, Üye
Kırklareli Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Recep YUMURTACI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Fotovoltaik Güç Santrali ile Desteklenen Güç Sisteminde Zayıf Kaynak Besleme Koşullarında Destek Vektör Makinalarıyla Mesafe Korumanın Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yaşar Beyazıt YOLDAŞ

İmza

Aileme ve işyeri arkadaşlarıma

TEŞEKKÜR

TEİAŞ'taki işim ile akademik çalışmalarımın birleşmesi vizyonunu veren yüksek lisans tez danışmanım Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU hocama; güveni ve rehberliğiyle akademik çalışmamdaki bu yolu açan doktora tez danışmanım Doç. Dr. Recep YUMURTACI hocama; TEİAŞ 4. Bölge Müdürlüğü Koruma Sistemleri Grup Başmühendisliğinde çalışan tüm işyeri arkadaşlarıma; hep yanımda olan, destek olan aileme gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Yaşar Beyazıt YOLDAŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti ... 1
1.2 Tezin Amacı ... 5
1.3 Orijinal Katkı ... 7
2 GÜÇ SİSTEMLERİNDE MESAFE KORUMA 8
2.1 Güç Sistemlerinde Korumanın Temeli ... 8
2.2 Enerji İletim Hatlarında Koruma ... 11
2.3 Mesafe Koruma Rölesi ... 14
3 DESTEK VEKTÖR MAKİNALARI 31
3.1 Destek Vektör Makinaları Regresyonu ... 31
3.2 Destek Vektör Makinaları Regresyonu Temelleri ... 33
3.3 SVM Çekirdek Fonksiyonlar ... 35
3.4 SVM Regresyon Kriterleri ... 36
4 PV SANTRALİ İLE BESLENEN GÜÇ SİSTEMİNE BAĞLI HATTA MEYDANA GELEN ARIZALARDA MESAFE KORUMA RÖLESİ EMPEDANS SONUÇLARININ İNCELENMESİ 38
4.1 Güç Sistemi Modeli ... 38
4.2 PV Güç Santrali Modeli ... 39
4.3 PV Santrali ile Beslenen Güç Sistemine Bağlı Hatta Kısa Devre Arıza Benzetim Çalışması ... 46
4.4 Mesafe Koruma Empedans Hesabına İlişkin Tespitler ... 52
5 PV SANTRALİYLE BESLENEN HATTA MESAFE KORUMA RÖLESİ EMPEDANS HESABININ DESTEK VEKTÖR MAKİNALARIYLA PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ 53
5.1 SVM ile Geliştirilmiş Mesafe Koruma Empedans Hesabı ... 53
5.2 Önerilen Empedans Hesabı Performansı ... 54
5.3 Tek Faz-Toprak Arızası Sonuçları ... 55
5.4 Faz-Faz Arızası Sonuçları ... 58

5.5 Üç-Faz Arızası Sonuçları 61
6 SONUÇ **64**
KAYNAKÇA **67**
A EK **72**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **88**

SİMGE LİSTESİ

AG, BG, CG	Faz-toprak arızaları
ABG, BCG, CAG	Faz-faz toprak arızaları
ABC	Üç-faz arızası
ACSR	Aluminium-conductor steel-reinforced (Çelik özlü alüminyum iletken)
A1	Temel frekans fazörü
Dyn11, YNyn0	Trafo bağlantı türleri
i_X	Akım büyüklüğü (ilgili domende)
k_0	Rezidüel kompanzasyon faktörü
K_x	Kontrolör parametresi
P_α, P_β	Giriş bağımlı güç kontrol parametresi
P_{xx}	Aktif güç
Q_{xx}	Reaktif güç
T_S	Örnekleme aralığı
u_X	Gerilim büyüklüğü (ilgili domende)
V_{dc}	DC gerilim büyüklüğü
ω_0	Açısal frekans
θ	Faz açısı
Z_1	Hat pozitif bileşen empedansı
Z_0	Hat sıfır bileşen empedansı
Z1, Z2, Z3	Mesafe koruma bölgeleri

KISALTMA LİSTESİ

AI	Artificial intelligence (Yapay zeka)
ANFIS	Adaptive neuro-fuzzy inference system (Adaptif sinirsel-bulanık çıkarım sistemi)
ANN	Artificial neural network (Yapay sinir ağları)
BPNN	Back-propagation neural networks (Geri yayılmalı sinir ağları)
CIREPP	Converter-interfaced renewable energy power plant (Dönüştürücü arabirimli yenilenebilir enerji santrali)
CSI	Current source inverter (Akım kaynaklı inverter)
CT	Current transformer (Akım trafosu)
DFT	Discrete Fourier transformation (Ayrık Fourier dönüşümü)
DG	Distributed generation (Dağıtık üretim)
DNN	Deep neural network (Derin sinir ağları)
DT	Decision tree (Karar ağacı)
DWT	Discrete wavelet transform (Ayrık wavelet (dalgacık) dönüşümü)
EİH	Enerji iletim hattı
EMD	Empirical mode decomposition (Ampirik mod ayrışımı)
EMT	Electromagnetic transients (Elektromanyetik transiyentler)
FIR	Finite impulse response (Sonlu impuls (dürtü) yanıtı)
FL	Fuzzy logic (Bulanık mantık)
GES	Güneş enerjisi santrali
IGBT	Insulated gate bipolar transistor (Kontrol girişi (gate) yalıtılmış çift kutuplu transistör)
IIREG	Inverter-interfaced renewable energy generator (Inverter arabirimli yenilenebilir enerji generatörü)
IM-DWT	Improved discrete wavelet transform (Geliştirilmiş ayrık wavelet (dalgacık) dönüşümü)
LES	Least squares (En küçük kareler)
L-L	Phase-phase (Faz-faz)
LL-G	Phase-phase to ground (Faz-faz toprak)
LVRT	Low voltage ride through (Alçak gerilim geçişi)

MAE	Mean absolute error (Ortalama mutlak hata)
MFCDFT	Modified full cycle discrete Fourier transform (Değiştirilmiş tam çevrim ayrık Fourier dönüşümü
MLT	Machine learning technique (Makine öğrenmesi tekniği)
MPP	Maximum power point (Maksimum güç noktası)
MRA	Multi resolution analysis (Çoklu çözünürlük analizi)
MSE	Mean squared error (Ortalama kare hatası)
PCC	Point of common coupling (Ortak kuplaj noktası)
PLL	Phase locked loop (Faz kilitli çevrim)
PNN	Probabilistic neural networks (Olasılıksal sinir ağları)
PPT	Power point tracking (Güç noktası takibi)
PSO	Particle swarm optimization (Parçacık sürüsü optimizasyonu)
PV	Photovoltaic (Fotovoltaik)
PWM	Pulse width modulation (Dalga genlik modülasyonu)
RBF	Radial basis function (Radyal tabanlı fonksiyonu)
RBFNN	Radial basis function neural network (Radyal tabanlı fonksiyonlu sinir ağları)
SLG	Single phase-ground (Tek faz-toprak)
SPWM	Sinusoidal pulse width modulation (Sinusoidal dalga genlik modülasyonu)
SSSC	Static synchronous series compensator (Statik senkron seri kompanzatör)
SVM	Support vector machine (Destek vektör makinası)
SVR	Support vector regression (Destek vektör regresyonu)
TOV	Transient overvoltage (Geçici aşırı gerilim)
VSC	Voltage source converter (Gerilim kaynaklı dönüştürücü)
VSI	Voltage source inverter (Gerilim kaynaklı inverter)
VT	Voltage transformer (Gerilim trafosu)
WF	Wind farms (Rüzgar tarlası)
WT	Wavelet transform (Wavelet dönüşümü)
XLPE	Cross linked polyethylene (Çapraz bağlı polietilen)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Örnek güç sistemi tek hat şeması 9
Şekil 2.2 Örnek güç sistemi koruma bölgeleri 10
Şekil 2.3 Hat empedans gösterimi 15
Şekil 2.4 Mesafe koruma rölesi kademe (zone) bölgeleri 18
Şekil 2.5 Mesafe koruma rölesi Mho kademe (zone) bölgeleri 21
Şekil 2.6 Mesafe koruma rölesi dörtgen kademe (zone) bölgeleri 21
Şekil 2.7 Güç sisteminde mesafe koruma rölesi kademelerine ark direncinin ve topraklama direncinin etkisi 23
Şekil 2.8 Mesafe koruma rölesinde yük empedansının etkisi 25
Şekil 2.9 Güç sisteminde mesafe koruma rölesinde kaynak besleme etkisi 26
Şekil 2.10 Ardışık örnekleme penceresi ile gerilim değerleri 28
Şekil 2.11 Comtrade dosyasından empedans hesaplanması 29
Şekil 3.1 SVM için doğrusal ayrılabilir hiperdüzlem 33
Şekil 3.2 SVM için doğrusal olmayan ayrılabilir hiperdüzlemde veri dizisi 34
Şekil 4.1 Güç sistemi modeli 39
Şekil 4.2 Inverter kontrolörünün temel modeli 43
Şekil 4.3 Şebekeye bağlı PV sistemin temel gösterimi 44
Şekil 4.4 PV inverterin blok diyagramı 45
Şekil 4.5 Digsilent PowerFactory güç sistem modeli 47
Şekil 4.6 Tek faz-toprak arızasında üç faz gerilimleri ve akımları 48
Şekil 4.7 Tek faz-toprak arızasında sıfır bileşen gerilimi ve akımı 49
Şekil 4.8 Faz-faz arızasında üç faz gerilimleri ve akımları 49
Şekil 4.9 Faz-faz arızasında sıfır bileşen gerilimi ve akımı 50
Şekil 4.10 Üç-faz arızasında üç faz gerilimleri ve akımları 51
Şekil 4.11 Üç-faz arızasında sıfır bileşen gerilimi ve akımı 51
Şekil 5.1 SVM ile geliştirilmiş mesafe koruma empedans hesabı 54
Şekil 5.2 Güç sistem modeli 55
Şekil 5.3 Tek faz-toprak arızaları için arıza empedansı DFT ile-arıza konumu 57
Şekil 5.4 Tek faz-toprak arızaları için arıza empedansı ve arıza empedansı SVM ile-arıza konumu 57
Şekil 5.5 Faz-faz arızaları için arıza empedansı DFT ile-arıza konumu 60

Şekil 5.6 Faz-faz arızaları için arıza empedansı ve arıza empedans SVM ile-arıza konumu 60
Şekil 5.7 Üç-faz arızaları için arıza empedansı DFT ile-arıza konumu 63
Şekil 5.8 Üç-faz arızaları için arıza empedansı ve arıza empedansı SVM ile-arıza konumu 63

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Mesafe koruma empedans kademeleri 19
Tablo 2.2 Mesafe korumada arıza empedansı hesaplama 22
Tablo 4.1 Enerji iletim hattı empedans bilgileri 38
Tablo 4.2 Kaynak bilgileri 38
Tablo 5.1 Tek faz-toprak arızaları için empedans-arıza konumu 56
Tablo 5.2 Faz-faz arızaları için empedans-arıza konumu 59
Tablo 5.3 Üç-faz arızaları için empedans-arıza konumu 62

ÖZET

FOTOVOLTAİK GÜÇ SANTRALİ İLE DESTEKLENEN GÜÇ SİSTEMİNDE ZAYIF KAYNAK BESLEME KOŞULLARINDA DESTEK VEKTÖR MAKİNALARIYLA MESAFE KORUMANIN GELİŞTİRİLMESİ

Yaşar Beyazıt YOLDAŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Fotovoltaik (PV) güç santralleri, geleneksel senkron generatörlerin aksine, nispeten zayıf kaynak besleme özelliklerine sahiptir. Şebekeye bağlı inverterlerin kontrol edilebilirliği ve güç elektroniği cihazlarının sınırlı aşırı akım kapasitesi, PV güç santralleri tarafından beslenen iletim hatlarındaki arızaların özelliklerinin geleneksel kaynaklardan farklı olmasına neden olur. Bu çalışmada Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından işletilen güç sistemindeki 400 kV iletim hattına bağlanan PV güç santrali sistemi incelenmiştir. İletim hattındaki arıza sinyalleri Digsilent PowerFactory yazılımı tarafından üretilmiştir. Üretilen veriler, MATLAB yazılımı ile ayrık Fourier dönüşümü (DFT) ile analiz edilmiştir. Ölçülen akım ve gerilim sinyalleri mesafe korumada kullanılmak üzere önce DFT ile ön işleme tabi tutulmuştur. Elde edilen fazörlerle arıza empedansı hesaplandıktan sonra Destek Vektör Makinesi (SVM) ile makine öğrenme tekniği kullanılarak arıza tespiti iyileştirilmiştir. Bu çalışma, PV santralle beslenen iletim hatlarındaki zayıf besleme koşullarındaki arızaları tespit etmek için DFT ve SVM

yöntemlerinin bir arada kullanılmasını önermektedir. Çalışmadan elde edilen veriler %97,3'e varan ortalama doğruluğa erişmektedir. PV enerji santraliyle desteklenen güç sistemi modelinde iletim hattı boyunca farklı konumlarda ve farklı tiplerde arızalar oluşturularak simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mesafe koruma, PV güneş paneli, ayrık Fourier dönüşümü, destek vektör makinaları.

ABSTRACT

Improvement of Distance Protection with SVM on PV Fed Transmission Lines in for Infeed Conditions

Yaşar Beyazıt YOLDAŞ

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep YUMURTACI

Photovoltaic (PV) power stations have relatively weak infeed characteristics, unlike conventional synchronous generators. The controllability of grid-connected inverters and the limited overcurrent capability of power electronic devices means that the characteristics of faults on transmission lines fed by PV power stations are different than conventional sources. The 400 kV transmission system in the Turkish Electricity Transmission Corporation (TEIAŞ) power system is studied in this paper. Fault signals on the transmission line were generated by Digsilent PowerFactory software. Then, fault signals were analyzed by discrete Fourier transformation (DFT) with MATLAB software. The measured current and voltage signals were first preprocessed with DFT to be used in distance protection and then used machine learning technique with Support Vector Machine (SVM) for fault detection. This research proposes a combined use of DFT and SVM methods for detecting faults in infeed conditions on transmission lines. The results obtained from the study were found an average accuracy of up to 97.3% in the study. The simulation was performed at different locations along the transmission line with different types of faults on a given power system model with the PV power plant.

Keywords: Distance protection, PV power plant, discrete Fourier transform, support vector machines.

1 GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Yenilenebilir enerji santrallerinin güç kalitesine olan etkisi güncel bir araştırma konusudur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan fotovoltaik (PV) güneş santrallerinde enerji depolama sistemleri ve sahte yüklerle gerilim salınımları azaltılabilmektedir. Yüksek oranda dönüştürücü arabirimli yenilenebilir enerji kaynağı bulunan bir güç sisteminde, güç elektroniği devresi kontrolü, sistemin genelinde işletme ve arıza anındaki tepkisi için önem arz etmektedir [1]. PV panellerin şebekeye entegrasyonunda kullanılan fiziksel bir inverterin AC sistemde meydana gelen arızadaki yanıtını görmek için hardware in loop sistemleri kullanılmaktadır [2]. Arıza koşullarında ise sistemdeki gerilim ve akımın sinüzoidal şekli bozulmaktadır, bu durumda benzetim yaparken güç sisteminden okunan gerilim, akım değerlerini sistemin çıkışındaki aktif ve reaktif gücü kontrol edebilmek için Park (d-q) dönüşümü ile ayrık hale getirilmesi gerekir [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeyle entegrasyonunda kullanılan gerilim kaynaklı inverterler (VSI) bu dönüşüm ile aktif ve reaktif güç değeri ayrı bir senkron referans ekseninde kontrol edilebilmektedir [4]. Dalga genişlik modülasyonu (PWM) ile sürülen akım kaynaklı inverter (CSI) ve VSI devrelerini modelleyip çıkış gerilim, akım değerlerini incelemek için genelleştirilmiş model kullanılmaktadır [5]. Güç sistemlerinde VSI tercih edilmesine rağmen CSI kullanılarak güç sisteminde meydana gelen kısa devrede daha yüksek akımlar sisteme verilebilmekte [6], VSI ile benzer yanıtlar alınabilmektedir. Güç sisteminde meydana gelen arızalarda VSI akım yanıtı için oransal integral (PI) kullanılmakta [7], integral kısmı akım kaynaklı bozunumları azaltmaktadır. Değişen faz açısını ve frekansı doğru tespit için faz kilitlemeli çevrim (PLL) kullanılmalıdır. PV santrallerin arıza anında sistemde kalması ve reaktif güç vermesi [8], alçak gerilim geçiş (LVRT) şartlarını sağlaması gerekmektedir [9]. Gerilim kaynaklı dönüştürücüsü (VSC) farklı metotlarla gerçekleştirilen aktif güç, reaktif güç, akım kontrolü ile ortak birleşim noktasında (PCC) meydana gelen kısa devre arızasına yanıt değişmektedir [10].

PV güneş santrallerinin kısa devre arızalarına olan yanıtı farklı benzetim yazılımları kullanılarak incelenmiştir [11], [12]. Dağıtım sisteminde kullanılması durumunda, toplam

kısa devre akımına katkısının düşük seviyede olduğu görülmektedir [13], döner makinalı generatörlere göre 4-10 kat daha düşük bir katkısı olmaktadır. Bu nedenle dağıtım sisteminde aşırı akım ani (50) korumaya ilave olarak düşük gerilim (27) koruma fonksiyonu [14] ya da mesafe koruma [15] önerilmektedir. Kısa devre arızasında akımındaki negatif bileşenin döner makinalı generatörlerin aksine düştüğü ifade edilmiştir [16]. PV güneş santrallerinin şebekeye bağlantısında kullanılan yükseltici trafoların bağlantı şekillerine göre kısa devre arızası akımına ve geçici aşırı gerilimlere (TOV) katkısı farklı eşdeğer devre modelleri kullanılarak incelenmiştir, trafonun şebeke çıkış bağlantısının üçgen olmasını TOV değerini azaltmaktadır [17]. Inverter arabirimli yenilenebilir enerji generatörlerinin (IIREG) kullanılan kontrolöründen bağımsız olarak kısa devre akımları hesabı yapılması durumunda [18], sistemin PCC noktasından sonraki hat için PV güneş santrali tarafında faz açısı olmadan yönsüz koruma kullanılarak koruma yapılabilir. PV inverterde kullanılan PLL'ye göre üç faz arıza durumunda sistemde meydana gelecek bir frekans değişikliğine PV inverter çıkış frekansı açı farkından dolayı kademeli olarak bir gecikmeyle sistemle eşleşecektir [19].

IIREG ile şebekeye enerji sağlayan santrallerin PV ve tip 4 rüzgâr tarlası enerji santralinden (WF) oluşmakta, sistemdeki sayıları hızla artmaktadır. WF ile beslenen bir hat koruması için kullanılacak mesafe koruma rölesinin sabit bir ayara sahip olmaması gerektiği, adaptif bir korumaya sahip olması gerektiği vurgulanmıştır [20], adaptif kademeli mesafe koruma rölesi önerilmiştir [21]. Statik seri senkron kompanzatör (SSSC) bağlı bir hatta ait mesafe koruma rölesi ayarları yapay sinir ağları (ANN) ile SSSC'ye bağlı olarak adaptif ayar [22]; dağıtık şebekenin (DG) değişen besleme topolojisine göre değişen adaptif mesafe koruma şeması da önerilmiştir [23]. Farklı tiplerdeki WF'lerin beslediği hatta ait mesafe koruma rölesinin arıza boyunca izlediği empedans yörüngesinin değiştiği, fakat yörünge sonunda eriştiği noktanın değişmediği belirtilmiştir [24]. Şebekede olası besleme durumuna göre mesafe koruma rölesinin kademeleri bu olasılığa bağlı olarak fonksiyon türünden belirlenerek otomatize edilmiştir [25]. Mesafe koruma rölesinin geri yönündeki arızalarda; arıza empedansını daha düşük görerek lüzumsuz çalışmasına sebep olmaktadır [26], [27]. IIREG önündeki hattaki arızada mesafe koruma rölesinin ölçtüğü empedansın genlik olarak daha büyük ve faz açısında sapmaya neden olduğu tespit edilmiş, doğru arıza tespiti için sıfır bileşen empedansı ile koruma ve ilave zaman gecikmesi önerilmiştir [28]. İletim sistemindeki büyük güçteki PV güneş santrallerinin çıkışındaki hattaki aşırı akım koruma özellikle kaynağa yakın noktadaki

arızalarda yanlış çalışarak koordinasyonu bozduğundan aşırı akım yerine iki kademeli mesafe koruma rölesi tavsiye edilmektedir [29]. PV güneş santrali tarafından beslenen hattaki mesafe koruma rölesinin faz seçicisinin santralin karakteristiğinden etkilendiği, mesafe koruma rölelerinde kullanılan genel faz seçicisi yerine gerilim kaynaklı faz seçicisi ile değiştirilmesinin gerektiği faz-toprak arızalarında görülmüştür [30]. Arıza bileşenli mesafe koruma rölesinin faz-faz arızalarda yanlış çalışmaya sebep olduğu [31], bu korumanın PV güneş santrali çıkışındaki hatlarda kullanılmasının faydalı olmayacağı belirtilmektedir [32]. Dönüştürücü arabirimli yenilenebilir enerji güç santrallerinde (CIREPP) önüne bağlı bir hattın ilerisindeki hattaki kademe 2 ya da kademe 3'te kalan hattaki arızada, arızayı besleyen paralel kaynağın (remote infeed) geleneksel döner makina kaynak olması durumunda CIREPP önündeki mesafe koruma rölesi normalden yakında (underreach) kalacaktır [33]. Tam tersi olması durumunda, yani döner makina generatörü önündeki hattaki mesafe koruma rölesi kademe 2 ya da kademe 3'teki arızayı, paralel kaynağın (remote infeed) da CIREPP olması durumunda arızayı normalden uzakta (overreach) görecektir [33]. Faz-faz arızalarda mesafe koruma rölesi için kullanılacak adaptif infeed katsayısı için yeni bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir [34].

Güç sistemlerinde hatta meydana gelecek arızayı tespit, sınıflandırma, yön tayini, arıza konumu gibi mesafe koruma fonksiyonlarını makine öğrenmesi yöntemleri (MLT) ile yapılabilmesi için birçok yayın bulunmaktadır. Bu yöntemlerin ilk kullanılanlarından biri olan yapay sinir ağlarıyla akım, gerilim ve bu ikisi arasındaki açı bilgisiyle arıza tespiti yapılmıştır [35]. Sinir ağları yöntemi ile mesafe koruma fonksiyonlarını içeren 72 adet yayın ile kullanılan yöntem farklı açılardan incelenmiştir [36].

Yapay sinir ağları (ANN) ‘ye ilave olarak mesafe koruma ile kullanılan yöntemlerden olan bulanık mantık (FL), adaptif yapay sinir ağlarıyla bulanık mantık (ANFIS) ve genetik algoritma (GA) da tercih edilmektedir [37].

Wavelet dönüşümüyle kullanılan sinir ağları ile mesafe koruma rölesi için arıza tespit fonksiyonu gerçekleştirilmiştir [38]. Wavelet dönüşümü ve ANFIS yöntemiyle mesafe koruma rölesi arıza tespiti [39] ve hızlı arıza tespiti [40] yapılmıştır. ANN ile mesafe koruma rölesinde kademe-1 (Z1) korumasını hızlı ve yüksek hassasiyette yapılabildiği gösterilmiştir [41].

Wavelet dönüşümüyle parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılarak mesafe koruma rölesiyle arıza yeri tespiti yapılmıştır [42]. Ayrık wavelet dönüşümü (DWT) ile olasılıksal

sinir ağları (PNN), geri beslemeli sinir ağları (BPNN) ve SVM yöntemleri kullanılarak arıza sınıflandırma metotları kıyaslanmıştır [43].

Arıza akım ve gerilim değerleri yinelemeli en küçük kareler yöntemiyle (LES) elde edildikten sonra radyal temelli fonksiyonlu sinir ağları (RBFNN) ile arıza yeri tespit edildikten sonra farklı türdeki arızaların tespiti ve konumu için SVM ile birlikte kullanılmıştır [44].

Yüksek gerilim hatlarında DWT ve SVM ile birlikte kullanılarak yeni bir arıza türü ve yeri tespiti yapılmış, %99'a varan yüksek bir başarı oranı gözlenmiştir [45]. Arıza tespiti, sınıflandırması ve konumu için iki aşamalı sonlu etki elemanı (FIR) ile ANN, SVM ve SVM regresyonu kullanılarak yeni bir hibrit yaklaşım geliştirilmiştir [46].

Ampirik mod ayrıştırma (EMD) ile SVM birlikte kullanılarak arıza sınıflandırmasının kabul edilebilir bir hassasiyette yapılabileceği belirtilmektedir [47].

Karar ağacı (DT), SVM ve farklı regresyon türleri gibi çeşitli MLT'lerle görüntü işleme yöntemiyle XLPE kablo ve enerji iletim hattından oluşan karma iletim hatlarında arıza yeri tespiti her bir yönteme göre incelenerek birbiriyle kıyaslanmış, farklı regresyon türlerine göre öneride bulunulmuştur [48].

Koruma rölesi görevleri için klasik makine öğrenimi algoritmalarının kullanımına, en yakın komşulara odaklanmaya, lojistik regresyona ve destek vektör tekniklerine ilişkin bir analiz gerçekleştirilir. Uygulama için simüle edilmiş koşulların hatasız kategorizasyonunu sağlayan referans destek vektör makinesi yaklaşımı tercih edilmiştir [49]. Rüzgâr enerjisi kaynaklarının varlığında iletim hattı arızalarının tespiti ve sınıflandırılması için SVM ve ANN tabanlı yaklaşımlar kullanılmıştır; SVM sınıflandırıcı, sınıflandırma verimliliği ve sınıflandırma süresi açısından ANN'den daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [50].

Güç salınımı durumlarında mesafe rölesinin kademe 3'te yanlış çalışmasını önlemek için denetim tabanlı bloke etme stratejisi önerilmiştir [51]. Mesafe rölesinin çalışma işlevini seçmek için geliştirilmiş ayrık wavelet dönüşümü (IM-DWT) katsayısını analiz etmek için derin sinir ağları (DNN) kullanılır.

Bir arıza sırasında üç fazlı gerilim ve akım ölçümlerinin bir çevrim ortalamasının karekökünü kullanan bir yaklaşım önerilmiştir [52]. Bu veriler, arıza izolasyonu ve konumu için bir modülün geliştirilmesi için girdi görevi görür. Bu modül, merkezi

koruma sisteminin bir bileşeni olarak tasarlanmıştır. Arıza tespiti için destek vektör makinesi ve arıza yeri tahmini için Gauss süreci regresyonu kullanılarak tasarlanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde tüm dünyada ekonomik ve çevresel nedenlerle yenilenebilir enerji kaynakları güç sistemlerinde yaygın olarak kendine yer bulmaktadır. Yenilebilir enerji kaynaklarında rüzgâr santralleri ön planda durmaktadır. Bununla birlikte elektrik enerjisi kaynağı olarak da güneş, yeni sayılmakla birlikte kullanımı gittikçe yaygınlaşan bir kaynak durumundadır.

Elektrik güç sistemlerinde bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük çoğunluğunu rüzgâr ve güneş kaynakları oluşturmaktadır. Rüzgâr, güneş enerjisi kaynakları ve enerji depolama sistemleri şebekeye bir inverter üzerinden bağlanmaktadır. Dolayısıyla konvansiyonel döner makine kaynakları ile çalışan şebekenin yapısı artık güç elektroniği devrelerinden oluşan inverter tabanlı kaynaklarının artması ile büyük bir değişim geçirmektedir. Bu durum aynı zamanda kısa devre akımlarının değişmesine ve kaynakların arızaya verdiği dinamik tepkinin değişmesine neden olmaktadır. Arıza akımının ve arıza karakteristiğinin değişmesi de mevcut koruma rölelerinin arızaya verdiği tepkinin döner makinalı kaynaklara verdiği tepkiye nazaran farklı olmasına neden olmaktadır.

Güç sistemlerinde asıl kaynak olarak senkron generatörler kullanılmaktadır. Sistem senkron generatörlerin alışılagelmiş tek tip kaynak olması ile sorunsuz bir şekilde işletilebilmekteydi. Büyük güçlü kaynaklar olması sayesinde sistem bu kaynağa göre kolayca şekillendirilebilmekte ve bu durum koruma koordinasyonunu sağlamayı kolaylaştırmaktaydı.

Senkron generatörlerin kaynak olarak kullanıldığı güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızaları; senkron makinanın dinamik karakteristiklerinin iyi biliniyor olması ve arızayı temizleyebilmek için yeterince süre tanıyor olmasıyla doğru açma tesis edilebilmekte ve röleler arası koordinasyon kolaylıkla sağlanabilmekteydi.

Temel olarak güneş enerjisinden elektrik enerjisi, ışığın fotovoltaik paneller üzerinde oluşturduğu DC gerilimin, inverterler vasıtasıyla AC gerilime dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. AC gerilim yükseltici transformatörlerle de güç sistemine iletilmektedir.

İnverter ile güç sistemine bağlanan güneş enerjisi kaynağı konvansiyonel döner makina kaynağından belirgin bir şekilde farklı bir prensiple çalışmakta; şebekenin işleyişinde, kontrolünde ve korunmasında ciddi farklılıklar oluşturmaktadır.

Yüksek güçteki güneş enerjisi kaynaklarının güç sistemlerine bağlanması dünyada yaygınlaşmaya başlamış olmakla birlikte Türkiye elektrik şebekesi için yeni sayılmaktadır. Bu nedenle yüksek güçlü güneş enerjisi santrallerinin ulusal şebekeye olası etkileri araştırma konusudur.

Güneş enerjisi santrallerinin şebekeye olan etkisinin incelenmesi için dinamik modelinin ortaya konulması gereklidir. Şebekeye bağlı bir güneş santralinin dinamik durumdaki karakteristiğinin incelenmesi; şebekede meydana gelecek bir kısa devre arızasında nasıl davranış göstereceğini anlamak için önemlidir.

İnverter tarafından beslenen ve paralelinde döner makine kaynak ile beslenen enerji iletim hattında (EİH) inverterle beslenen taraftaki mesafe koruma rölesi kademe-2 (Z2) ve kademe-3 (Z3) zayıf kaynakla besleme (weak infeed) durumuna düşmektedir, bu durumda mesafe koruma rölesinin arızanın türüne bağlı olarak arıza empedansını olduğundan daha büyük veya daha küçük görmesi, arızayı olduğundan daha uzakta veya yakında algılaması riski ortaya çıkmaktadır.

Endüstriyel bir mesafe koruma rölesindeki zayıf kaynak besleme sorunu, bir eko işleviyle çözülür [57]. Beslemenin zayıf tarafındaki mesafe koruma rölesi, anlık açma için arıza sinyalini geri yansıtır. Literatürde zayıf kaynak besleme koşulları için çeşitli haberleşme destekli mesafe koruma şemaları da vardır. Zayıf kaynak besleme sorununu ortadan kaldırmak için hat/kablo diferansiyel koruma kullanılabilir, fakat bu koruma da röleler arası haberleşmeye bağlı bir korumadır. Literatürde bu sorunun çözümü için farklı hatları açıp kapayarak besleme durumunun değiştirilmesiyle adaptif besleme sistemi geliştirilmiştir. Mevcut arıza bileşenli mesafe koruma rölesinin PV kaynakla beslenen bir sistem için uygun olmadığı bilinmektedir. Zayıf kaynak durumundaki bir mesafe rölesinde haberleşme destekli koruma kullanılabildiği gibi yönlü elemanlar kullanılarak da lojikle çözüm önerileri geliştirilmiştir. Literatürde yine bu problem için ölçülen akım veya gerilim bileşenleri kullanılarak arızalı faz seçici algoritmalarıyla da çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Geleneksel mesafe koruma rölesinde zaman gecikmeli bölge-3 korumasının erişim ayarı, kısa devre akım kaynaklarının neden olduğu besleme etkisini içermelidir.

Bu tez çalışması kapsamında GES ile ve paralel olarak konvansiyonel döner makine kaynak ile beslenen bir EİH'da zayıf kaynak besleme durumundaki mesafe koruma rölesi performansı incelenmiş, kademe-3 (Z3) arızasındaki ölçümler ve empedans yanıtı da kullanılarak destek vektör makinalar yöntemiyle rölenin arıza empedansını doğru tespit etme başarımı artırılmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışmada mevcut literatürden farklı olarak yapılan orijinal katkılar aşağıda ifade edilmiştir:

- Yapılan literatür taramasında GES ile beslenen hatlarda mesafe koruma rölesinin zayıf kaynak besleme koşullarında kalan hatlardaki arızalarda yanlış çalıştığı tespit edilmiş, bu besleme koşullarındaki mesafe koruma rölesinin yanlış çalışmasının önüne makine öğrenmesi tekniği olan SVM regresyon kullanılarak geçilmiştir.
- GES tarafından beslenen bitişikteki bir iletim hattının zayıf kaynak besleme durumunda meydana gelen hat arızalarında mesafe koruma rölesinin karar başarımı SVM yöntemiyle iyileştirilmiştir.
- Mesafe koruma rölesinde ölçülen akım ve gerilim değerleri DFT ile fazöre dönüştürüldükten sonra hesaplanan geleneksel empedans değerleri, SVM ile birlikte kullanılarak hibrit çalışan arıza empedans tespiti tekniği geliştirilmiştir.
- Önerilen yöntemin mesafe koruma rölelerinin kademe-3'te kalan iletim hattında üç-faz, faz-faz ve faz-toprak arızalardaki empedans yanıtı SVM regresyon kullanılarak yüksek başarımla geliştirilmiştir.

2
GÜÇ SİSTEMLERİNDE MESAFE KORUMA

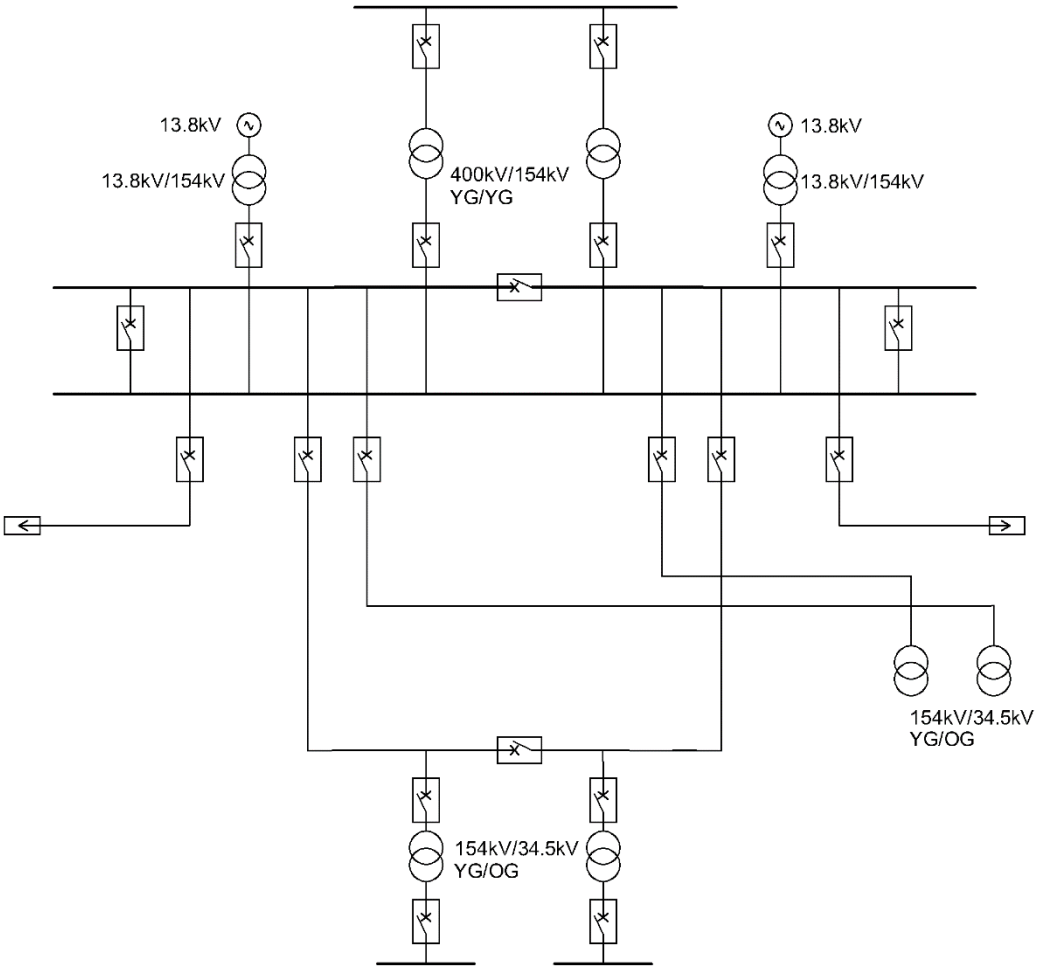
2.1 Güç Sistemlerinde Korumanın Temeli

Elektrik enerjisinin üretildiği santraller çoğu zaman tüketim bölgelerinden uzakta kurulur. Bu bakımdan elektrik enerjisinin üretildiği yerlerden tüketim bölgelerine taşınması gerekmektedir. Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımının ekonomik bir şekilde yapılabilmesi, enerji alanında en önemli konulardan biridir.

Ülkenin tamamının ya da belirli bölgelerinin elektrik enerji gereksinimlerini karşılayabilecek bir biçimde üretim ile tüketim merkezleri arasındaki enerji alışverişini sağlayan ağ şeklindeki enerji taşıma sistemine enterkonnekte sistem denir. Enterkonnekte sistemde uzak mesafeler arası enerji iletimi havai hatlar ve yeraltı kablolarıyla sağlanmaktadır.

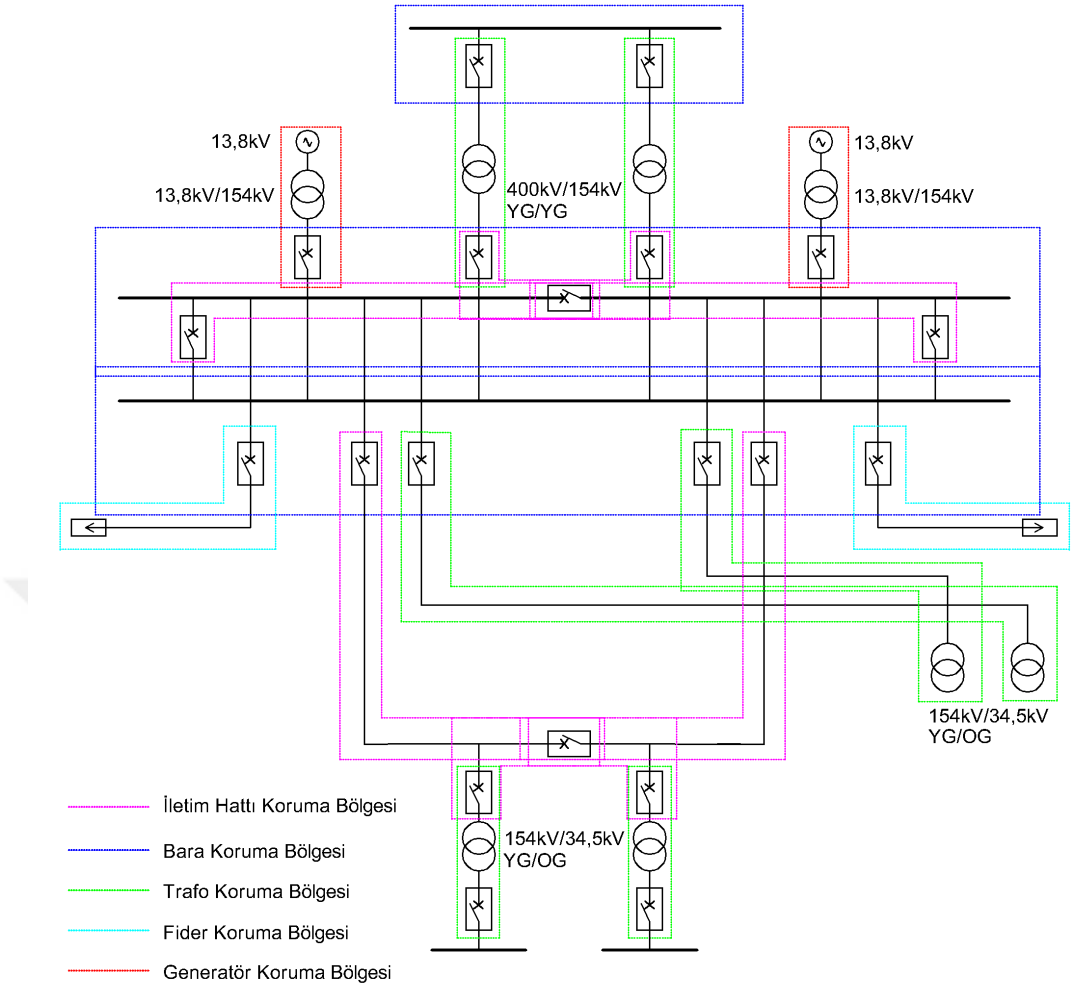
Türkiye'nin enterkonnekte güç sisteminde enerji iletimi için kullanılan nominal gerilimler 400 kV, 154 kV ve 66 kV'tur.

Enterkonnekte güç sistemini oluşturan generatör, enerji iletim hattı, kablo, trafo gibi elemanların arıza anında servis harici edilmesi ve genel olarak sistemde meydana gelen arızalara karşı korunması gerekmektedir.



Şekil 2.1 Örnek güç sistemi tek hat şeması

Bir güç sistemi, generatörler, transformatörler, baralar, iletim ve dağıtım hatları vb. elemanları içerir. Güç sistemi, koruma için bölgelere ayrılmıştır. Sistemin belirli bir koruma düzeniyle korunan kısmına koruma bölgesi denir. Koruma bölgesi, bir güç sisteminin bir veya en fazla iki öğesini kapsar. Generatör koruması, transformatör koruması, iletim hattı koruması, bara gibi güç sisteminin her bir ekipman veya elemanı için ayrı bir koruma bölgesi vardır. Tüm güç sistemi koruma bölgeleri tarafından kapsanacak şekilde planlanmıştır, bu nedenle korunmayan hiçbir kısmın bırakılmaması amaçlanır.



Şekil 2.2 Örnek güç sistemi koruma bölgeleri

Bir güç sisteminde koruma röleleri, sistem tasarımı ile planlanır. Kesiciler, olağan işletim ve bakım gereksinimleri için ve ayrıca kısa devreler gibi anormal koşullar sırasında güç sisteminin herhangi bir bileşeninin bağlantısını kesilebilecek şekilde uygun bir noktaya yerleştirilmiştir.

Teçhizatın önem derecesine, konumuna, maddi değerine, arıza olasılığı ve anormal koşullara bağlı olarak, her bir güç sistemi bileşeni (generatör, trafo, iletim hatları, bara, kablolar, kapasitörler, yükler) bir koruma bölgesi kapsamı dahilindedir. Tüm güç sistemi birkaç koruma bölgesiyle çevrilidir ve sistemin hiçbir parçası korumasız bırakılmaz.

Koruma bölgesinin sınırı, akım trafolarının konumu ile belirlenir. Bu nedenle akım trafoları, kesicilerin koruma bölgelerinin içinde kalacak şekilde yerleştirilir.

Elektrik teçhizatındaki bir arıza, akım akışının izin verilen değerden sapması nedeniyle elektrik devresindeki bir kusur olarak tanımlanır. İletim hatlarındaki arızalar, iletkenlerin kopması veya yalıtımın arızalanmasından kaynaklanır. Arıza empedansı genellikle düşüktür ve arıza akımları genellikle yüksektir. Arızalar sırasında üç fazın gerilimleri dengesizleşir ve komşu devrelerin beslemesi etkilenir. Arıza akımlarının aşırı olması, sadece arızalı teçhizata değil, aynı zamanda arıza akımının beslendiği tesisata da zarar verebilir. Bu nedenle güç sistemlerinde belirli bir teçhizatta, belirli bir bölgede, hızlı çalışacak, doğru açma sağlayacak korumanın yapılması gereklidir.

Güç sistemlerinde korumanın amacı:

1. Teçhizatı, insanı, mülkü korumak
2. Arızalı kısmı sistemden ayırmak
3. Normal işletme şartlarına geri dönmek
4. Gerilim (V), akım (I) ve frekansı (f) belirli değer aralığında tutmaktır.

Güç sisteminden ölçü trafoları vasıtasıyla alınan verilerin (data) koruma röleleri tarafından işlenerek koruması yapılan teçhizatla ilişkili anahtarlama elemanına kumanda edilmesi amaçlanır.

Güç sisteminde ölçü trafolarıyla alınan veri akım, gerilimdir. Akım ve gerilim verisi işlenerek frekans, açı, güç gibi korumada kullanılacak değerler hesaplanır.

2.2 Enerji İletim Hatlarında Koruma

Enerji iletim hatları; elektrik santralleri ile elde edilen elektrik enerjisinin santrallerden dağıtım hatlarına iletilmesini sağlayan hatlardır. Elektrik üretim tesisleri ile elektrik tüketim bölgeleri yakınlarındaki trafo merkezleri ile son tüketici arasında elektrik enerjisi iletimini sağlar. Yüksek Gerilim (YG) sisteminde enerji iletimi havai hatlar ve/veya güç kablolarıyla yapılmaktadır. Havai hatlar için güzergahın temin edilemediği yoğun yerleşim bölgelerinde, özellikler yoğun yerleşim olan şehir içinde kalan yerlerde güç kablosu tesis edilmektedir. Yer altı güç kabloları yüksek izolasyon gerektirdiğinden, havai hatlara oranla oldukça pahalıdır ve daha özel koruma sistemleri tercih edilmektedir.

Elektrik üretim tesisleri ile transformatör istasyonları arasındaki hatlar yüksek gerilim; büyük transformatör istasyonları ile dağıtımda kullanılan küçük transformatör istasyonları arasındaki hatlar orta gerilim, küçük transformatör istasyonları ile son tüketici arasındaki hatlar alçak gerilim olarak adlandırılır. Türkiye'deki enerji iletim

hatları ve güç kabloları Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından tesis edilip işletilmektedir.

Elektriksel yönden ele alındığında, enerji iletim hatları ve güç kabloları hat parametreleri ve uzunluklarıyla karakterize edilirler. Enerji iletim havai hatlarının ve kabloların direnç, endüktans, kapasitans değerleri empedans hesaplarında kullanılmaktadır. Arıza türlerine göre arıza akımının izlediği yol ve arıza empedans değeri farklıdır. Arıza empedans değeri hesabında pozitif bileşen, negatif bileşen ve sıfır bileşen empedans değerleri kullanılır.

Mesafe koruma röleleri, iletim hatları korumasında uzun yıllardır yaygın olarak uygulanmaktadır. Mesafe korumanın prensibi, arıza yeri ile koruma rölesi arasındaki temel bir frekansta empedansı ölçmek, böylece bir arızanın bir koruma bölgesinin içinde mi yoksa dışında mı olduğunu belirlemektir. Geleneksel olarak, bir arıza yerinin bir koruma bölgesi içinde olup olmadığını belirlemek için empedans gerçek zamanlı olarak hesaplanır.

Enerji iletim hatlarında kilometre başına empedans sabit kabul edilir. Bu nedenle mesafe koruma rölesinin arızaya verdiği yanıt arıza empedansıyla birlikte arıza kilometresini de içerir.

Mesafe koruma için geleneksel empedans hesaplaması, gerilim ve akım sinyallerinin temel fazörlerinin ölçümüne dayanır. Bir arıza meydana geldiğinde, gerilim ve/veya akım sinyalleri ciddi şekilde bozulur ve harmonikler ve katlanarak azalan DC bileşenleri içerebilir.

Geleneksel bir mesafe koruma rölesi algoritması, akım ve gerilim sinyallerinden arıza empedansını hesaplamak için temel frekansın bir periyoduna eşdeğer uzunlukta bir veri penceresi gerektirir. Algoritma arıza meydana geldikten yaklaşık bir periyot sonra arızayı tespit eder. Empedans hesaplaması için kullanılan kısa veri pencerelerinin boyutu, hızlı empedans tahminine ve arıza tespitine olanak sağlar. Ancak, nispeten kısa veri pencerelerine dayalı olarak tasarlanan algoritmalar, genellikle modern iletim ağları için kullanılan rölelerin güvenilirlik gereksinimlerini karşılamamaktadır. Tam dalga formu periyodu kullanılarak fazör hesabı yapılan algoritmaların güvenilirliği daha yüksektir.

İletim hatları koruma röleleriyle aşağıdaki yöntemlerle korunmaktadır:

1. Zaman kademeli aşırı akım koruma

2. Akım kademeli aşırı akım koruma

3. Mesafe koruma

4. Hat diferansiyel koruma

Korumada seçicilik, röle ayarlarının koordine edilmesiyle elde edilir.

Toprak arızaları için ayrı koruma sistemleri gereklidir, çünkü havai iletim hatlarında toprak arızaları faz arızalarından daha sık görülür ve toprak arıza akımı büyüklük olarak faz arıza akımından farklıdır.

Enerji iletim hatları başta olmak üzere arızaların geçici veya kalıcı olmasına göre güç sisteminde meydana gelen arıza türleri aşağıdaki şekilde olmaktadır:

1. Geçici arızalar: Yıldırım, tarla yangınları, kuş pislikleri ve endüstriyel (duman) kirlilikten kaynaklanır.

2. Kalıcı arızalar: Meydana geldiklerinde onarım gerektiren mekanik veya elektriksel arızalardan kaynaklanır.

3. Tekrarlı arızalar: Geçici ve kalıcı hatalardan kaynaklanır ve kesicinin kilitlenmeye gitmesine neden olur.

Zaman ve akım kademeli koruma, gecikmeye izin verilebilen ve ani çalışmanın gerekli olmadığı durumlarda, yani arıza gidermedeki gecikme süresinin kararsızlığa veya kablolarda, hatlarda vb. hasara neden olmadığı veya ekonomik olarak daha az önem verildiği durumlarda kullanılır. İletim sisteminde aşırı akım, ana ünite koruması için yedek bir korumadır.

Mesafe rölesi, zamanlı ve kademeli akım korumanın çok yavaş olduğu, seçicilik sağlanamadığı veya korunan teçhizatın sistem için öneminin ve değerinin yüksek olması durumunda kullanılır.

Mesafe koruma rölesi genellikle enerji iletim hatlarında ana ve artçı koruma olarak kullanılır. Hatlarda meydana gelen faz-toprak, faz-faz, üç-faz kısa devre arızalarına karşı daha hızlı koruma sağlar.

Sistemde yüksek oranda meydana gelen faz-toprak, faz-faz ve iki faz-toprak kısa devre arızalarına asimetrik arıza denir. Asimetrik arızalar arasında en sık meydana gelen faz-toprak arızalardır. Sistemdeki üç-faz arızalara dengeli olması nedeniyle simetrik arıza denmektedir. Enerji iletim hatlarında meydana gelen asimetrik ve simetrik arızaları sistemden temizlemek için mesafe koruma röleleri tercih edilmektedir.

2.3 Mesafe Koruma Rölesi

Enerji iletim hatlarında arıza akım ve gerilim değerleri oldukça yüksektir. Güç sisteminde stabilitenin bozulması ve teçhizatın aşırı derecede hasar görme ihtimali nedeniyle arıza hızla giderilmelidir. Bu nedenle mesafe koruma rölelerine ihtiyaç vardır.

Mesafe koruma rölesi arızayı yüksek hassasiyetle ve yüksek hızla temizleme, röleler arası daha kolay hesaplama ve koordinasyon yapılabilme, kaynak ve kısmen yük empedansından bağımsız koruma olanağı sağladığı için özellikle enerji iletim hattı ve güç kablosu korumasında tercih edilir.

2.3.1 Mesafe Koruma Prensibi

Yüksek gerilim iletim sistemi, genellikle birden fazla gerilim seviyesindeki güç sistemi elemanlarının ağ şeklinde birbirine bağlanmasıyla oluşur. Arıza akımları, enterkonnekte sistemde herhangi bir hattın her iki ucundan arıza noktasına akabileceğinden, birçok hattın ara bağlantısı, koruma cihazlarının koordinasyonu üzerinde yeni bir dizi koşul sunar. Bu, radyal devreler için oldukça yeterli koruma sağlayan cihazlar olan aşırı akım röleleri, genellikle enterkonnekte iletim sistemleri için uygun şekilde koordine edilememesi nedeniyle tercih edilmez. Aşırı akım rölelerinin bu yetersizliğinden dolayı, daha seçici olan ve onları yüksek gerilim iletim devrelerinin ihtiyaçlarına daha uygun hale getiren performans özelliklerine sahip olan diğer röle türleri geliştirilmiştir.

Bir mesafe rölesi, bulunduğu yerden bir iletim hattı veya güç kablosu boyunca önceden ayarlanmış bir mesafe içinde bir hatayı tespit etme yeteneğine sahiptir. Her iletim hattının tasarımı ve yapısı ile ilgili kilometre başına bir direnci ve reaktansı vardır, bu nedenle hattın toplam empedansı hattın uzunluğunun bir fonksiyonu olacaktır. Bu nedenle bir mesafe rölesi, akım ve gerilime bakarak bu iki değeri Ohm yasası temelinde karşılaştırır.

Bir iletim hattının empedansı uzunluğuyla orantılı olduğundan, mesafe ölçümü için önceden belirlenmiş bir noktaya (erişim noktası) kadar bir hattın empedansını ölçebilen bir röle kullanılması uygundur. Mesafe rölesi, sadece röle konumu ile önceden belirlenmiş erişim noktası arasında oluşan arızalarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır, böylece farklı hat bölümlerinde oluşabilecek arızalar için ayrım sağlar. Mesafe korumanın temel prensibi, ölçülen gerilimin ölçülen akıma bölünmesidir. Hesaplanan görünür empedans, erişim noktası empedansı ile karşılaştırılır. Ölçülen empedans, erişim noktası empedansından küçükse, röle ile erişim noktası arasındaki hatta bir arıza olduğu varsayılır.

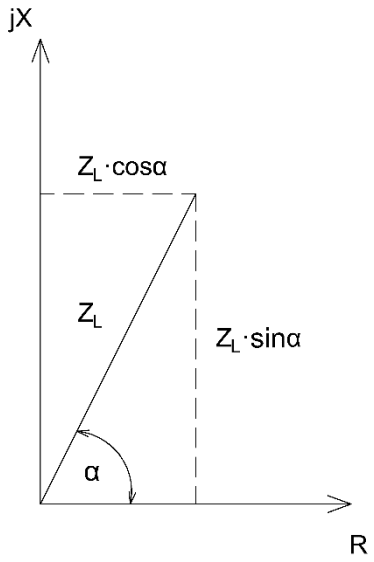
Röle ölçüm empedansı Z_R, okunan V_R geriliminin, I_R akım değerine bölümüyle bulunur:

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} \tag{2.1}$$

Hattın sekonder empedansı ATO akım trafo dönüştürme oranı, GTO gerilim trafo dönüştürme oranı ile bölünür, elde edilen bu değer hattın bilinen $Z_{L_{pri}}$ primer empedans değeri ile çarpılarak bulunur:

$$Z_{L_{sek}} = Z_{L_{pri}} \frac{ATO}{GTO} \tag{2.2}$$

Kısa devre arızasında gerilim değeri azalır, akım değeri artar. Dolayısıyla kısa devre empedansı normal işletme koşullarındaki yük empedansından daha küçüktür. Rölenin ölçtüğü empedans değeri, arıza noktası ile röle arasındaki mesafeye bağlıdır. Yani arızadaki empedans değeri, hattın uzunluğu ile orantılıdır. Dolayısıyla mesafe koruma adı, bu özellikten kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.3 Hat empedans gösterimi

Enerji iletim hatlarında metalik arızalar nispeten nadirdir. Çoğu arızalar faz ve toprak arasında veya iki faz arasında bir atlamadan kaynaklanır. Bu arızada çoğunlukla bir ark direnci R_f bulunmaktadır. Toprak arızaları sırasında kule ayak direnci (yüksek gerilim direğinin topraklama direnci) de ortaya çıkmaktadır. Arıza direncine ark direnci ve kule ayak direnci de dahil olmaktadır. Mesafe koruma röleleri arıza çevirimi sırasında hat

empedansını ve arıza direncini kapsamalıdır. Kule ayak dirençleri normalde 10 Ω'un altında tutulmalıdır. Kuleleri birbirine bağlayan hatların üstündeki topraklama teli paralel olarak kule ayak direncini düşürecektir. Bazı güzergahlarda 30 Ω'dan yüksek değerlerde olabilir ve bu durumda toprak arızalarına karşı koruma için özel önlemler gerekli olacaktır.

Bir mesafe korumanın tasarımı kullanılan tekniğe büyük ölçüde bağlıdır. Bu tasarım rölenin çalışma performansını ve hızını belirlemektedir. Geçmişte elektromekanik ve statik olarak tasarlanan rölelerin yerini; yarı iletken teknolojinin gelişmesi, ekonomik hale gelmesi, sayısal işlem yapmada kolaylık sağlaması ve hızı sayesinde nümerik röleler almaktadır.

İki ana mesafe koruma rölesi türü anahtarlamalı şema ve tam şemadır. Anahtarlamalı şema röleleri, ölçüm rölesine doğru ölçüm döngüsünü seçen bir başlatma rölesinden oluşur. Başlatma röleleri, en basit formda, her üç fazda ve nötrde bulunan akım röleleridir. Daha pahalı çözümlerde başlatma röleleri düşük empedans röleleridir. Tam şema röle, her ölçüm döngüsü ve her bölge için bir ölçüm elemanına sahiptir. Tüm ölçüm elemanları daha sonra paralel olarak ölçüm yapar ve bu da daha hızlı sürede yanıt alınmasını sağlar. Nümerik röleler tam şemalı rölelerdir, tüm hesaplamalar mikro işlemci tarafından yapılır.

Röle içindeki ölçü trafoları, analog sinyalleri elektronik devreler için uygun bir gerilime dönüştürür. Pasif analog filtreler, anti aliasing sayesinde analog sinyaldeki gürültüyü ve çentiklenmeyi önler. Tüm gerilimler ve akımlar için analog değerler, analog-sayısal dönüştürücü ile sayısal değerlere çevrilir, sayısal filtrelemeden sonra ölçüm ünitesine gönderilir.

Ölçüm ünitesinde Fourier analizi ile fazörel büyüklükler elde edilir, bu değerlerle empedans hesaplaması, yön kontrolü de yapılır. Yön kontrolü, yakın bir arızada tamamen çökmüş bir voltajda bile doğru işlevi güvence altına almak için pozitif dizili bir bellek polarizasyonu içerir.

Mesafe koruma rölesinde doğru bir açma kararı vermek için başlatma ile arıza tespiti, arıza çevrimi tespiti, arıza çevrim empedansını hesaplaması ve yön tayini yapmak gerekir. Röle bu her bir fonksiyon için akım ve gerilim trafolarından sürekli aldığı ölçüm bilgileri ile hesaplama yaparak karar verir.

2.3.2 Toprak Empedans Hesabı

Belirli bir arıza konumundaki ölçüm empedansı, arıza tipine bağlı olmamalıdır. Bu nedenle, her arıza çevrimi için doğru gerilimler ve akımlar ölçülmeli ve her çevrim için arıza empedansının değerlendirilmesi yapılmalıdır. Bu durumda, olası altı arıza çevriminin tümü (AG, BG, CG, AB, BC, CA) için sayısal teknoloji ile empedans sürekli olarak hesaplanır.

Mesafe koruma rölelerinde empedans, her ölçüm döngüsü için hesaplanır ve ayarlanan empedans ile karşılaştırılır.

İki ve üç fazlı arızalar için faz gerilimi ve faz akımları arasındaki fark kullanılır. Bu ilke ile ölçülen empedans, arıza yerindeki pozitif dizi empedansına eşittir. Toprak arızası ölçümü daha karmaşıktır. Faz akımlarının ve faz gerilimlerinin kullanılması pozitif ve sıfır dizi empedansının bir fonksiyonu olarak bir empedans verir.

$$U = I_1 Z_1 + I_0 Z_0 + I_2 Z_2 \tag{2.3}$$

$$Z_1 = Z_2 \tag{2.4}$$

$$U = Z_1(I_0 + I_1 + I_2) + I_0 Z_0 - I_0 Z_1 \tag{2.5}$$

$$I = I_0 + I_1 + I_2 \tag{2.6}$$

$$U = IZ_1 + I_0 Z_1 \left(\frac{Z_0}{Z_1} - 1\right) \tag{2.7}$$

$$U = IZ_1 + \frac{I_N}{3} Z_1 \left(\frac{Z_0}{Z_1} - 1\right) \tag{2.8}$$

$$U = IZ_1 + I_N Z_1 \left(\frac{Z_0 - Z1}{3Z_1}\right) \tag{2.9}$$

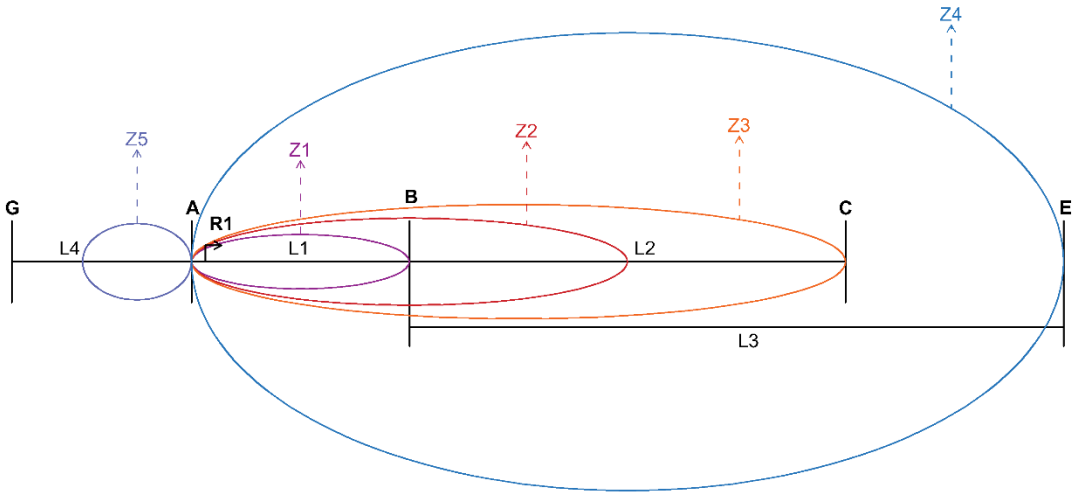
$$U = IZ_1 + I_N Z_1 (k_0) \tag{2.10}$$

Sıfır bileşen kompanzasyon faktörü olan k_0 tüm hat boyunca aynı değerde kabul edilir. Mesafe koruma bölgesinin her kademesi için ayrı k_0 değeri girilmesine müsade eden röleler de bulunmaktadır.

2.3.3 Mesafe Korumada Kademe Hesaplama

Bir güç sisteminde kullanılan mesafe koruma rölelerinde asıl amaç rölenin ileri yönünde bulunan enerji iletim hattının ya da kablonun korunmasıdır. Korunan bu asıl hatta ya da kabloda meydana gelen arızada rölenin en hızlı şekilde açma yaptırarak arızalı kısmı sistemden ayırmak amaçlanır. Buna ilaveten mesafe koruma rölesinin koruduğu asıl hattın ya da kablonun ilerisindeki ve gerisindeki hatlardaki arızalar için de artçı/yedek koruma yapması beklenir. Bunun nedeni hattı ya da kabloyu koruyan asıl mesafe koruma rölesinin arızalanması veya çalışmaması durumunda arkasındaki ya da önündeki mesafe koruma rölesinin artçı olarak koruma yaparak güç sisteminde meydana gelen arızalı kısmı en sayıda teçhizatı servis dışı bırakarak gidermektir.

Bu nedenlerde mesafe koruma rölelerinde birden çok kademe (zone) kullanılır. Kullanılan kademe sayısı güç sistemi topolojisine, röleler arası iletişime, kullanıldığı ülkelerin tercihine göre değişmektedir. Genellikle yüksek gerilim enterkonnekte güç sisteminde kullanılan mesafe koruma rölelerinde dört ileri yönlü, bir geri yönlü kademe tercih edilmektedir. Kademeler arası zaman koordinasyonu yapılarak çalışma öncelik sırası belirlenir.



Şekil 2.4 Mesafe koruma rölesi kademe (zone) bölgeleri

Mesafe koruma rölelerinde kademeler Z ile ifade edilir, koruma öncelik sırasına göre numaralandırılır. Mesafe koruma rölesinde kademe-1 korunan asıl hatta kullanılır, fakat bu hattın tamamı tamamını kapsayacak şekilde ayarlanmaz. Bunun nedeni akım trafosu-

gerilim trafosu ölçümü, röle ölçümü ve ayar olarak girilen empedans değeri olası hatası nedeniyle %10-%20 arası eksik girilir.

Mesafe koruma rölesinde korunan hattın veya kablonun uzunluğuna ve iletim sistemi işleticisinin tercihine göre kademe-1 korunan hattın empedansının %80'i, kademe-2 korunan hattın %100'ü ile komşu kısa hattın %50'sinin toplam empedansı, kademe-3 korunan hattın %100'ü ile komşu en uzun hattın %100'ünün toplam empedansı, kademe-4'te kademe-3 empedans değerinin %120'si, geri yön olan kademe-5 geri yöndeki en kısa hattın empedansının %50'si olarak ayarlanabilir.

Tablo 2.1 Mesafe koruma empedans kademeleri

Kademe	Kademe yönü	Kademe hat bilgileri	Kademe hat empedans yüzdeleri	Kademe açma zamanı (s)
Z1	İleri (Forward)	Korunan hattın % 80	% 80 x L1	0
Z2	İleri (Forward)	Korunan hattın % 100' ü ve komşu kısa hattın % 50	% 100 x L1 + % 50 x L2	0,4
Z3	İleri (Forward)	Korunan hattın % 100' ü ve komşu en uzun hattın % 100	% 100 x L1 + % 100 x L3	0,8
Z4	İleri (Forward)	% 120 x L1 + % 120 x L3	% 120 x L1 + % 120 x L3	1,2
Z5	Geri (Reverse)	Geri yöndeki en kısa hattın % 50	% 50 x L4	1,5

2.3.4 Mesafe Koruma Rölesinde Polarizasyon

Arıza anında arızalı fazın gerilim değeri röle tarafından ölçülemeyecek değere düşebilir. Bu durumda röle yön tayini yapamayacak ve arıza empedansını doğru olarak hesaplayamayacaktır. Bunun önüne geçebilmek için mesafe koruma rölelerinde doğru gerilim değerini elde edebilmek için farklı polarizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Mesafe koruma rölesi teknolojinin gelişmesiyle polarizasyon yöntemlerin birçoğu aynı anda kullanılabilmektedir. Kullanılan başlıca polarizasyon yöntemleri [54]:

1- Kendinden (self) polarizasyon: Arızalı faza ait gerilim kullanılarak yapılan polarizasyondur.

2- Çapraz (cross) polarizasyon: Arıza olmayan fazların gerilimler kullanılarak yapılan polarizasyondur, yönlü aşırı akım rölelerinde de bu polarizasyon tercih edilir.

3- Bellek (memory) polarizasyonu: Gerilim değeri sürekli belleğe kaydedilir, arıza anında arıza öncesi bellekte olan gerilim değerleri kullanılarak yapılan polarizasyondur. Rölelerde kullanılan işlemci ve hafıza elemanları ile bu polarizasyon numerik rölelerde tercih edilmektedir.

4- Adaptif polarizasyon: Kendinden, çapraz ve bellek polarizasyon yöntemlerinin meydana gelen arıza koşullarına göre birbirleri yerine veya birlikte kullanıldığı polarizasyon yöntemidir. Nümerik mesafe koruma rölelerinde bu yöntem kullanılmaktadır, kullanılan algoritma röle marka, modeline göre değişmektedir.

2.3.5 Empedans Eksen Karakteristiği

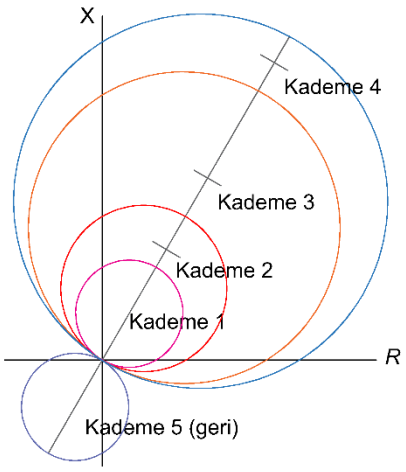
İstenilen reaktans ve direnç erişimi, prensip olarak mevcut iki farklı özellik ile sağlanır. Bu özellikler "dörtgen" ve "Mho" karakteristiktedir.

Modern mesafe röleleri, dirençli ve reaktif erişimi bağımsız olarak ayarlanabilen dörtgen özelliği sunar. Bu, özellikle ark dirençlerinin ve toprak arıza direncinin en yüksek arıza direnci değerine katkıda bulunduğu toprak arıza empedansı ölçümü için geçerlidir. Çokgen empedans özellikleri hem faz hem de toprak arızaları için arıza empedansı kapsamı açısından oldukça esnektir. Bu nedenle, çoğu dijital röle bu özelliği sunar.

2.3.5.1 Mho (dairesel) Karakteristik

En iyi bilinen Mho (dairesel) karakteristiğidir. Bu dairenin çevresi, R-X diyagramının başlangıç noktasından geçer ve bu nedenle, yön ve mesafe ölçümünü (kendinden polarize Mho) birleştirir.

Kısa hatlarda Mho karakteristikli mesafe koruma rölesi yanlış kademeden açma yapmaya müsaittir. Yüksek dirençli arızaların kademe dışında kalması nedeniyle, gerçek bir arızada açma meydana gelmeyebilir. Uzun hatlarda röle empedansı büyüdükçe direnç değeri de büyür, hattaki aşırı yüklenme durumunda Mho karakteristiğinin açma bölgesine girerek yanlış açmaya neden olabilir.

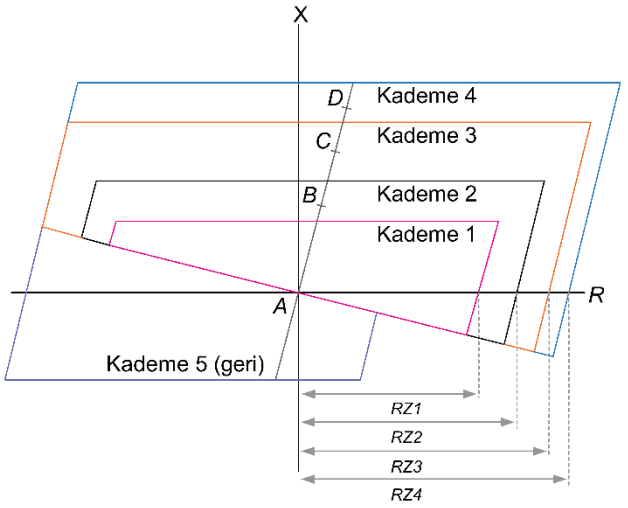


Şekil 2.5 Mesafe koruma rölesi Mho kademe (zone) bölgeleri

2.3.5.2 Dörtgen (kuadratik) Karakteristik

Dörtgen karakteristik (poligonal veya kuadratik karakteristik) ise R ve X erişimi için bağımsız ayarlara sahiptir. Bu nedenle, her hat uzunluğu için yeterli ark kompanzasyonu elde etmek mümkündür.

Kısa hatlar için herhangi bir Mho tipi karakteristikten daha iyi dirençli kapsama alanı sağlar. Bu, özellikle ark dirençlerinin ve toprak arıza direncinin en yüksek arıza direnci değerlerine katkıda bulunduğu toprak arıza empedansı ölçümü için geçerlidir. Hattın aşırı yüklenmesi durumunda yük koşullarındaki empedans bölgesi arıza kademeleri dışında bırakılarak yanlış açmanın kolaylıkla önüne geçilebilir.



Şekil 2.6 Mesafe koruma rölesi dörtgen kademe (zone) bölgeleri

2.3.6 Arıza Empedansını Hesaplama

Güç sisteminde meydana gelen arızalar öncesinde de belirtildiği gibi simetrik veya asimetriktir. Üç-faz arıza tek simetrik arıza türüdür. Asimetrik arıza faz-faz (AB, BC, CA), faz-faz toprak (ABG, BCG, CAG) ve faz-toprak (AG, BG, CG) şeklindedir. Mesafe koruma rölesi aşağıda Tablo 2.2'de belirtilen türdeki empedans hesaplamalarını her an yapmaktadır [54]. Arıza empedansını hesapladıktan sonra, daha önceden belirlenen empedans değeri ile kıyaslayıp arızanın kademe değerine erişimini gözlemler.

Tablo 2.2 Mesafe korumada arıza empedansı hesaplama

Arıza Türü	**Hesaplama**
AG	$V_A/(I_A + 3k_0I_0)$
BG	$V_B/(I_B + 3k_0I_0)$
CG	$V_C/(I_C + 3k_0I_0)$
AB veya ABG	$(V_A - V_B)/(I_A - I_B)$
BC veya BCG	$(V_B - V_C)/(I_B - I_C)$
CA veya CAG	$(V_C - V_A)/(I_C - I_A)$
ABC	V_A/I_A

V_A, V_B ve V_C faz gerilimleri, I_A, I_B ve I_C faz akımlarıdır. Z_0 = hat sıfır bileşen empedansı Z_1 = hat pozitif bileşen empedansı, k_0 = toprak kompanzasyon katsayısıdır. $k_0 = (Z_0 - Z_1)/3Z_1$ şeklinde hesaplanır.

2.3.7 Ark Direncinin ve Topraklama Direncinin Etkisi

Bir iletim hattının altında meydana gelen bir arızanın dinamik özellikleri ve havada yanan arkın meydana gelmesi, ark uzunluğunda değişikliklere ve bunun sonucunda ilave arıza direncine neden olur. Meydana gelen bu arıza direncine ark direnci denilmektedir.

Ark direnci hesaplamak için farklı yöntemler mevcuttur. En çok kabul gören yöntem olan Warrington formülüyle ifade edebiliriz [55].

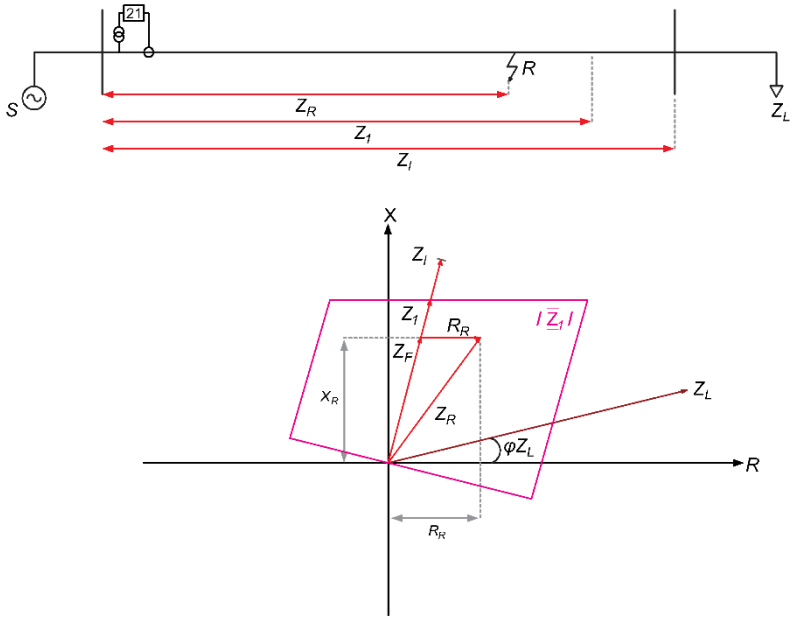
$$R_a = \frac{28710}{I^{1,4}} L \tag{2.11}$$

R_a ark direncini, I ark akımını, L ise metre cinsinden ark uzunluğunu ifade etmektedir. Faz-toprak arızalarında ark direnç değerinin tamamı, faz-faz arızalarında ark direnci değerinin yarısı (genellikle) hesaba katılır.

Ark direncine ek olarak, toprak arızaları büyük ölçüde toprak direncinden etkilenir. Toprak direnci, toprak yolunda ark direncine ilave olarak direnç oluşturur. Toprak direnci değerine direk topraklama direnci de dahil edilebilir.

$$R_R = R_a + R_t \tag{2.12}$$

R_R arıza akımı kaynaklı toplam direncini, R_a ark direncini, R_t direk topraklama direncini ifade etmektedir. Bu direnç değerinin faz-toprak arızalarında hesaba katılması gerekir. Bu çalışmada ark ve topraklama direnç değeri sıfır olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.7 Güç sisteminde mesafe koruma rölesi kademelerine ark direncinin ve topraklama direncinin etkisi

Toprak arızalarında, toprak direnci de arıza yoluna dahil edilir. Toprak direnci, direk direncini, direk topraklama direncini, ark direncini ve toprak dönüş yolu direncini içerir. Birlikte toprak direnci ve ark direnci, arıza direnci olarak bilinir. Faz-faz arızalarında,

arıza akım yolunda toprak direnci olmadığından arıza direnci hat direnç değerine ilave olarak sadece ark direncinden oluşur.

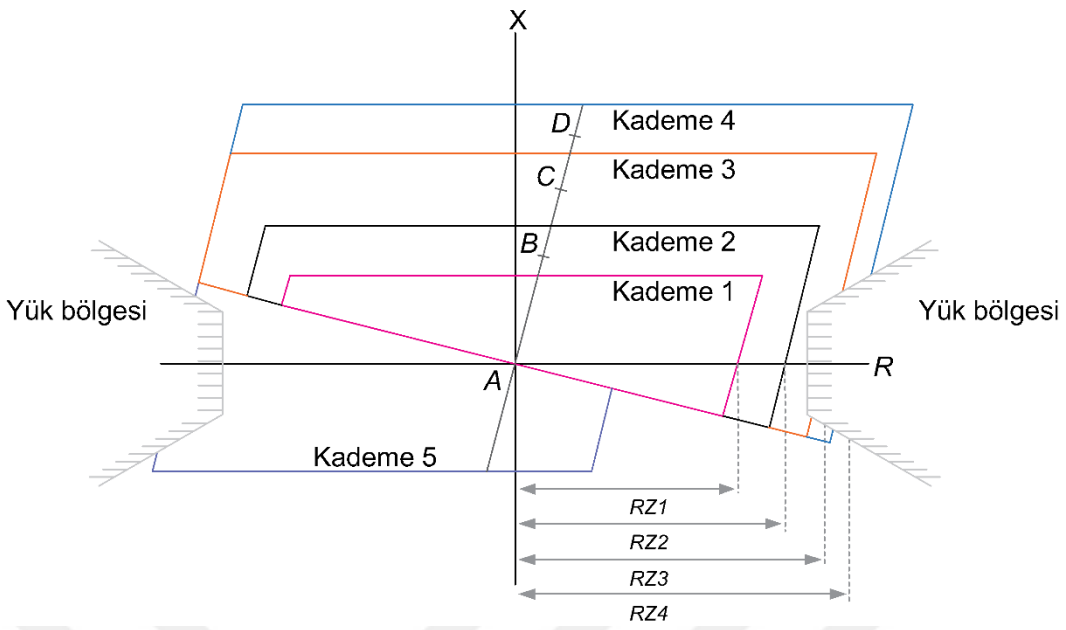
Şekil 2.7'de Z_R arıza akımı kaynaklı rölenin gördüğü toplam empedansı, X_R arıza akımı kaynaklı toplam reaktansı, R_R arıza akımı kaynaklı toplam direncini, R_a ark direncini, Z_F hattın arıza noktasına kadar olan empedansını, Z_1 rölenin ayarlandığı kademe-1 empedansını, Z_l korunan hattın toplam empedansını, Z_L rölenin normal yük koşulunda gördüğü yük empedansını ifade etmektedir.

2.3.8 Yük Empedansı

Enerji iletim hatlarının aşırı yüklenmesi durumunda mesafe koruma rölesinin ölçtüğü empedans mesafe koruma kademesi bölgesi içine girebilir. Bu durumda röle hattın aşırı yüklenmesi bir arıza olarak görür ve açma meydana getirir. Ölçülen empedansın tanımlanan yük bölgesi sınırları içerisinde olması halinde rölenin çalışması bloke edilir, bu blokaja yük körleştirme adı verilir. Normal sistem koşullarında rölenin ölçtüğü sistem empedansı yük empedansı değerini verir. Akım ve gerilim açısındaki açı ise yük açısını verir.

Güç sistemleri üç fazlı, dengeli işletildiği için enerji iletim hattında meydana gelen yük empedansı kaynaklı aşırı yüklenme de üç fazlı, dengeli olacaktır. Bu durumda mesafe koruma rölesinde faz empedans kısmında yük empedans bölgesi tanımlanarak ayarlanır.

Yük empedansı güç sistemleri üç fazlı, dengeli olduğundan faz empedans olarak ayarlanması yeterli olsa da bazı röleler toprak empedans olarak da ilave ayar sunmaktadır. İki faz ya da dengesiz yüklü hatlarda mesafe koruma rölesinde toprak arızaları için de yük empedans bölgesi tanımlanması sistem işletmesi güvenliğini artırmak açısından faydalı olacaktır.



Şekil 2.8 Mesafe koruma rölesinde yük empedansının etkisi

Yük empedans değeri minimum işletme gerilim değeri ve maksimum yük akımı ile hesaplanmaktadır.

$$Z_{yük} = \frac{U_{min}}{\sqrt{3} \times I_{maks}} \tag{2.13}$$

$$\varphi_{yük} = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) \tag{2.14}$$

$$R_{yük} = Z_{yük} \times \varphi_{yük} \tag{2.15}$$

Bu eşitliklerde; U_{min} minumum gerilim, I_{maks} maksimum yük akımı, P yük tarafındaki aktif gücü, Q yük tarafındaki reaktif gücü, $R_{yük}$ minimum yük direncini, $\varphi_{yük}$ maksimum yük açısını ifade etmektedir.

2.3.9 Kaynak Besleme (infeed) Etkisi

Röle ile arıza noktası arasındaki kaynak akımlarının etkisine kaynak besleme etkisi denilmektedir. Bu etki mesafe rölesinin düşük menzil ya da yüksek menzile düşmesine neden olmaktadır. R1 rölesinin gördüğü empedans değeri [54]:

$$Z = Z_1 + \left(\frac{I_1 + I_2}{I_1}\right) Z_2 \tag{2.16}$$

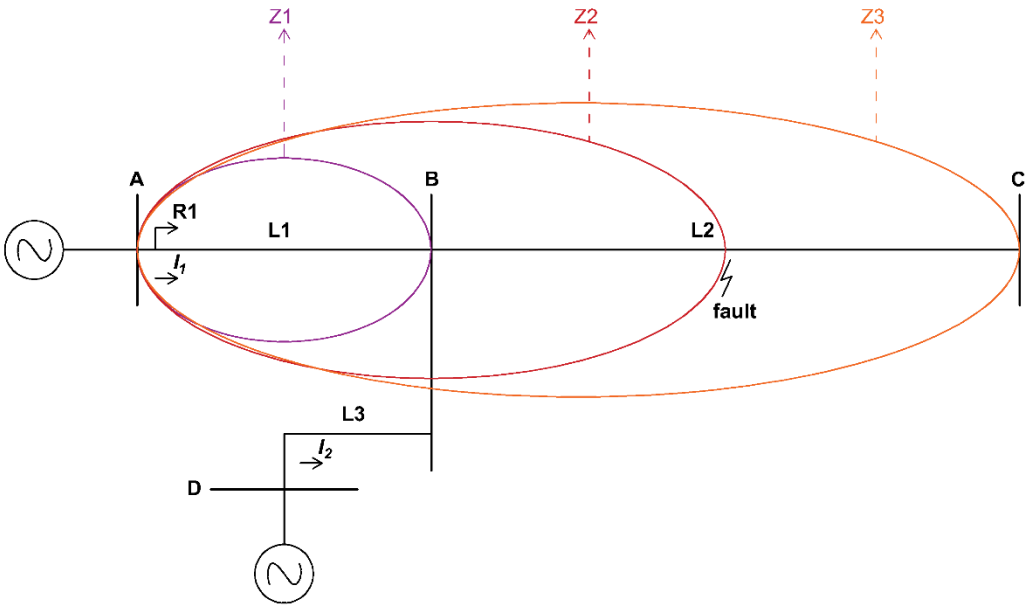
Paralel besleyen kaynakların iki veya daha fazla olması durumunda R1 rölesinin göreceği empedans değeri:

$$Z = Z_1 + \left(\frac{I_1 + I_2 + \cdots + I_n}{I_1}\right) Z_2 \tag{2.17}$$

Burada rölenin ölçtüğü Z arıza empedansı, Z_1 AB hattının empedansı olan kademe-1'i, Z_2 AB+%50 BC arasındaki hat empedansı olan kademe-2'yi, Z_3 AB+%100 BC arasındaki hat empedansı olan kademe-3'ü ifade etmektedir. Şekil 2.9'de gösterilen kaynak besleme etkisinde şu iki durum meydana gelmektedir.

1- BC arasındaki L2 hattında meydana gelecek arızada: D barasına bağlı kaynağın güçlü olması durumunda I_2 akımı yüksek olacak, arıza empedansı Z_{hat}, aslında röle tarafından ölçülen Z empedansından büyük olacaktır, bu durumda R1 rölesi arızayı olduğundan daha uzakta görmesine sebep olacaktır.

2- BC arasındaki L2 hattında meydana gelecek arızada: D barasına bağlı kaynağın zayıf olması durumunda I_2 akımı düşük olacak, arıza empedansı Z_{hat}, aslında röle tarafından ölçülen Z empedansından küçük olacaktır, bu durumda R1 rölesi arızayı olduğundan daha yakında görmesine sebep olacaktır.



Şekil 2.9 Güç sisteminde mesafe koruma rölesinde kaynak besleme etkisi

2.3.10 Fazör Kestirim Tekniği

Son zamanlarda, doğru ve hızlı fazör kestirimi için çok sayıda filtre algoritması mevcuttur. Walsh, Kalman, en küçük kareler hatası (LSE) teknikleri gibi çeşitli algoritmalar mevcuttur. Yukarıdaki yöntemlerin çoğunda, fazör tahmini, gerilim ve akım dalga biçimlerinin en az bir veya daha fazla çevrim için örneklenmesiyle gerçekleştirilir. Arızayı tespit etmek ve uyarlamalı düzeltici önlemi almak için, kullanımı kalıcı arızalarla sınırlanan hızlı ve doğru koruma açması için anlık fazör tahmini gereklidir. Herhangi bir sayısal mesafe koruma rölesinin doğruluğu ve tepki süresi, kullanılan giriş sinyallerinin fazörel kestirimindeki algoritmaya bağlıdır. Bu algoritmalarla ilgili temel sorunlar: tahmin hatası ve azalan DC bileşeninin etkisi nedeniyle gecikmeli işlem süresidir. Bunun dışında, azalan DC bileşeninin zaman sabiti bilinmemektedir; zaman sabitinin varsayılan değeriyle eşleşirse, o zaman sadece doğru fazör tahmini yapılabilecektir.

Günümüzde, daha verimli fazör kestirim algoritmaları da geliştirilmiştir.

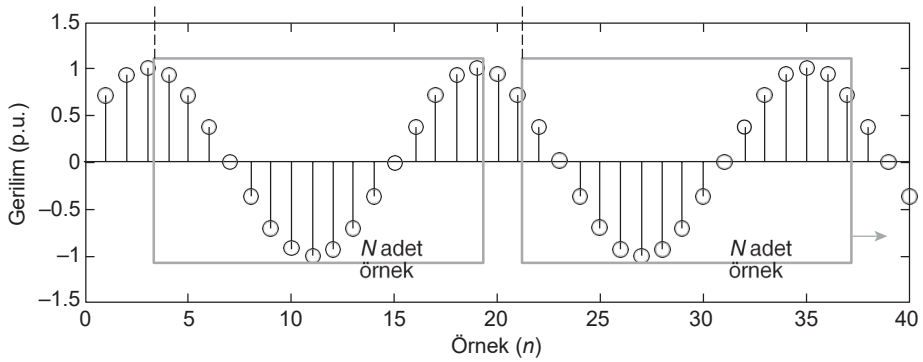
2.3.11 Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT)

Statik rölelerle karşılaştırıldığında, sayısal röleler, ölçülen tüm analog büyüklüklerin analog/sayısal dönüşümü imkânı sunar ve koruma algoritmasını uygulamak için bir mikroişlemci kullanır.

Sayısal mesafe koruma rölelerinde en yaygın olarak kullanılan fazör kestirim tekniği, DC bileşeni ve harmonikleri ayırarak analog sinyalden temel bileşenin uygun şekilde çıkarılmasını sağlayan ayrık Fourier dönüşümüdür (DFT).

Veri örneklemesi ile elde edilen büyüklükler DFT ile genlik ve faz bilgisine çevrilir. Elde edilen bu büyüklükler hesaplamada kullanılır veya röle ayar değerleri ile kıyaslanır.

Temel frekans fazörünün gerçek ve sanal bileşenlerini hesaplamak için tam döngü veri penceresi üzerinden elde edilen N (döngü başına örnek sayısı) düzgün aralıklı veri örnekleri dizisi kullanılır. Yeni gerilim ve akım örnekleri oluştuğunda, pencere bir örnek tarafından aşamalı olarak ilerletilir. Bu, en son örneğin veri penceresine dahil edildiği ve en eski örneğin atıldığı anlamına gelir, bu da veri penceresinin uzunluğunu N örnekte sabit tutar.



Şekil 2.10 Ardışık örnekleme penceresi ile gerilim değerleri

Fourier serileri, bir dizi fazörün, bazı temel frekansın katları olan frekanslara sahip olduğunu varsayımı ile hesaplanır.

$$x(t) = \sum_{k=-N}^{N} A_k \, e^{j(k\omega_0 t)} \tag{2.18}$$

Sayısal alanda (ayrık zaman), sürekli işlevi, t, $\omega_0 T_S$ atlamalarında ilerleyen bir işlevle değiştirin, böylece tek frekans sinyalinin fazör açıklaması şöyle olur;

$$x(n) = Ae^{j(n\omega T_S + \alpha)} \tag{2.19}$$

$$e^{j(n\omega T_S)} = \cos(n\omega T_S) + j\sin(n\omega T_S) \tag{2.20}$$

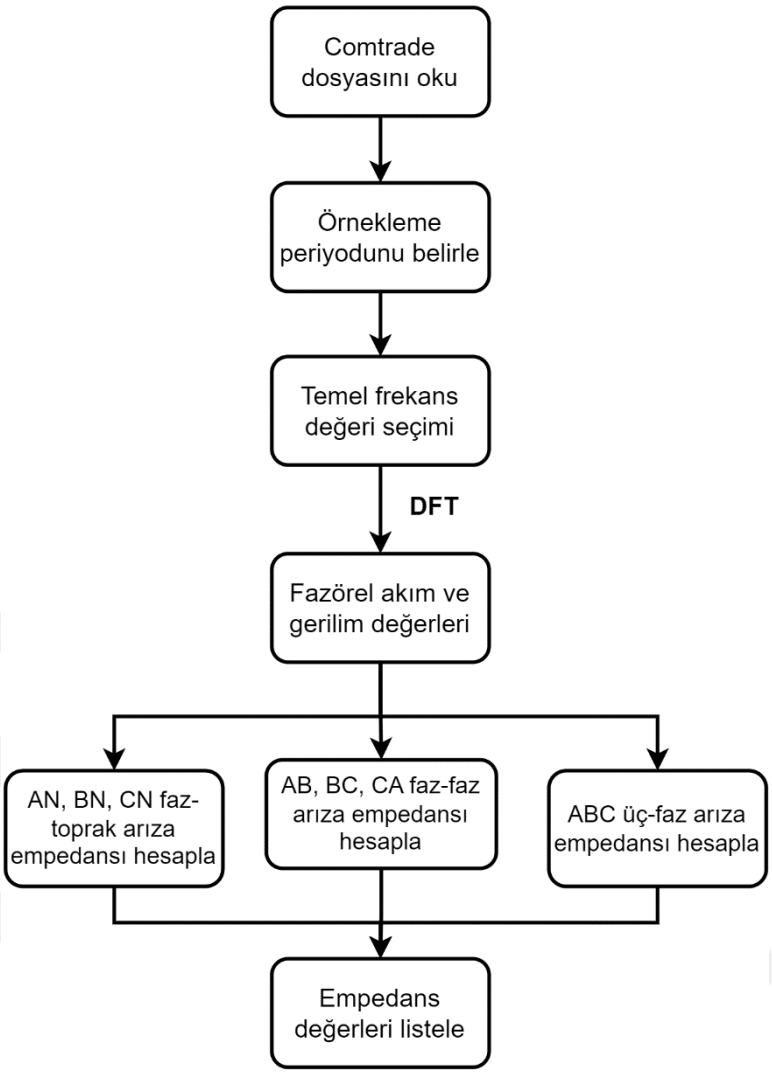
Burada T_S örnekleme aralığıdır.

$$x(n) = \sum_{k=-N}^{N} A_k e^{j(k\omega_0 T_S n)} \tag{2.21}$$

A_1 temel frekans fazör değeri, θ_1 faz açısı değeridir.

$$A_1 = \sqrt{X_{1real}^2 + X_{1imag}^2} \tag{2.22}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(X_{1imag} \Big/ X_{1real}\right) \tag{2.23}$$



Şekil 2.11 Comtrade dosyasından empedans hesaplanması

Comtrade standardı [53], elektrik güç sistemi geçici (transiyent) değişimi için ortak bir dosya kayıt formatı tanımlar. Bu dosyalar, gerçek veya simüle edilmiş güç sistemi olaylarının bir kaydını içerir. Gerilim ve akım dalga biçimlerinin sayısallaştırılmış kayıtlarını ve zaman uyumlu bir kayıtta röle işlemleri gibi mantıksal olayları içerirler. Format, farklı tescilli kayıt veya simülasyon sistemleri kullanan kişilerin veri alışverişi yapması gerektiğinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Comtrade, güç sistemi ve koruma analiziyle ilgilenenlerin, güç sistemi olayları hakkında sayısal veri dosyaları biçiminde bilgi alışverişinde bulunabilecekleri ortak bir dil sağlamaktadır.

Comtrade dosyası röle arıza kayıtlarından alınabileceği gibi simülasyon yazılımları ile oluşturulan geçici arızalar ile de oluşturulabilir. Modellemede kullanılan comtrade dosyaları Digsilent PowerFactory yazılımı ile oluşturulmuştur.

Oluşturulan arızanın Comtrade dosyası, Matlab m-dosyasıyla DFT işlemi uygulanmıştır. Kaydedilen arızanın Comtrade dosyasını bir m-dosyasın içinde açılarak: fazör değerlerini elde etmek için tüm gerilim ve akımlarda belirlenen örnekleme periyodu içinde DFT uygulanmış, bu fazörlerle her arıza türü için arıza empedans değeri hesaplanmıştır.

3
DESTEK VEKTÖR MAKİNALARI

SVM, esas olarak sınıflandırma ve regresyon tabanlı problemler için kullanılan bir makine öğrenme yöntemidir [56]. SVM, yeni değerleri tahmin etmeye çalışan bir "karar verici" sistem oluşturan bir dizi örnekten ayrılan bir istatistiksel öğrenme dalı olan denetimli öğrenmenin bir parçasını oluşturur. SVM, hem ikinci dereceden (veya konveks) programlamayı hem de büyük veri kümeleriyle uğraşmak için gelişmiş yöntemleri kapsar.

SVM ileri yönde beslemeli bir ağ kategorisidir. SVM, model karmaşıklığı sorununu çözebilmesi, iyi genelleme kabiliyeti ve kuadratik programlama tekniği olması nedeniyle tercih edilmektedir.

SVM temel olarak iki sınıfa ait verileri birbirinden en uygun şekilde ayırmak için kullanılır. Bunun için karar sınırlar ya da hiper düzlemler belirlenir.

- Yüksek boyutlu uzaylarda etkilidirler.
- Boyut sayısının, örneklem sayısından fazla olduğu durumlarda etkilidirler.
- Karar fonksiyonunda bir takım eğitim noktaları kullanılır. Dolayısıyla bellek verimli bir şekilde kullanılmış olur.
- Çok yönlüdür. Karar fonksiyonu için çok farklı çekirdek fonksiyonları (kernel functions) kullanılabilmektedir.

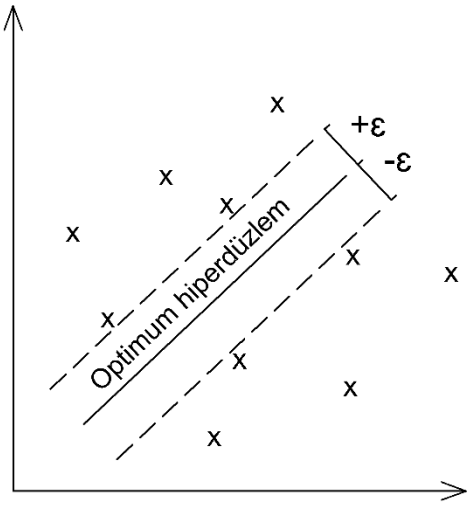
Farklı çekirdek fonksiyonlar kullanılarak normalde doğrusal olarak ayrılamayan sınıflar doğrusal olarak ayrılabilir hale getirilir.

3.1 Destek Vektör Makinaları Regresyonu

SVM yalnızca sınıflandırma için değil, aynı zamanda regresyon görevleri için de kullanılabilir. Destek Vektörü Regresyonu (SVR) olarak da bilinen SVM regresyonu, sürekli sayısal değerleri tahmin etmek için etiketli eğitim verilerini temel alan bir modeli analiz eden ve oluşturan denetimli bir öğrenme algoritmasıdır. Geleneksel regresyon algoritmalarında amaç, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki hatayı en aza indirmektir. Bununla birlikte, SVM regresyonu, eğitim verilerinin çevresinde maksimum marjı olan ve bu marj içindeki hatalara toleranslı bir işlev bulmayı amaçlar. Bu marj

içinde kalan veri noktalarına destek vektörleri denir. SVM regresyonunun şu şekilde çalışmaktadır:

- Veri gösterimi: Eğitim verileri, giriş-çıkış çiftlerinden (x, y) oluşur; burada x, giriş özelliklerini ve y, karşılık gelen çıkış değerlerini temsil eder.
- Özellik dönüşümü: Gerekirse, girdi özellikleri bir çekirdek işlevi kullanılarak daha yüksek boyutlu bir uzaya dönüştürülebilir. Çekirdek işlevi, SVM'lerin girdi ve çıktı arasındaki karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesine izin verir.
- Kenar boşluğu (marjin) tanımı: SVM sınıflandırmasına benzer şekilde, SVM regresyonu, marjı en üst düzeye çıkarırken verileri ayıran bir hiper düzlem bulmayı amaçlar. Regresyonda sınır, tahmin edilen regresyon çizgisinin etrafındaki bir tüp olarak tanımlanır. Borunun genişliği iki parametre tarafından kontrol edilir: borunun genişliğini belirleyen epsilon (ε) ve marjı maksimize etme ile marj içinde hatalara izin verme arasındaki dengeyi kontrol eden C.
- Kayıp fonksiyonu: SVM regresyonunda kullanılan kayıp fonksiyonuna epsilon duyarsız kayıp denir. Kenar boşluğu genişliğini (epsilon) aşan hataları cezalandırır, ancak kenar boşluğu içindeki hataları yok sayar. Amaç, marj içinde tutarken bu hataların toplamını en aza indirmektir.
- Model optimizasyonu: SVM regresyonundaki optimizasyon problemi, hataları marj içinde tutma kısıtlamasına tabi olarak, kayıp fonksiyonunu en aza indiren hiperdüzlem parametrelerini (ağırlıklar ve sapma) bulmayı içerir. Bu optimizasyon problemi, ikinci dereceden programlama teknikleri kullanılarak çözülebilir.
- Tahmin: Model eğitildikten sonra, yeni, görünmeyen veri noktaları için çıktı değerlerini tahmin etmek için kullanılabilir. Tahmin edilen değer, karşılık gelen giriş özelliklerinde regresyon fonksiyonu değerlendirilerek elde edilir.

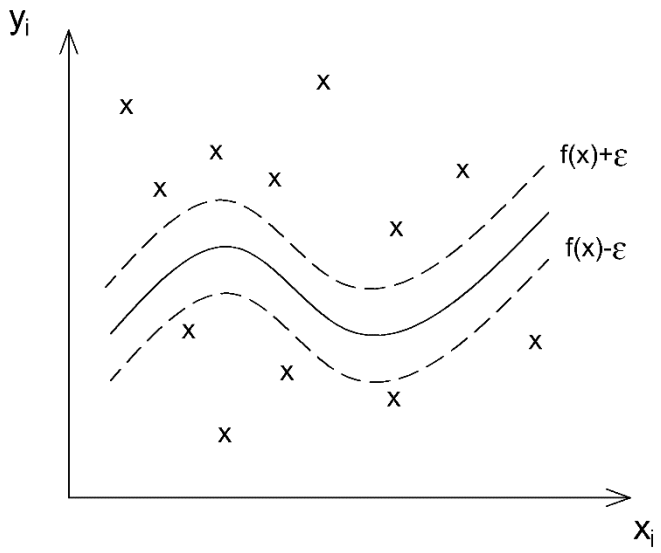


Şekil 3.1 SVM için doğrusal ayrılabilir hiperdüzlem

SVM regresyonunun, yüksek boyutlu verileri işleme yeteneği, fazla uydurmaya karşı direnç ve aykırı değerlere karşı sağlamlık dahil olmak üzere çeşitli avantajları vardır. Çekirdek fonksiyonlarının sağladığı esneklik sayesinde, giriş ve çıkış değişkenleri arasında doğrusal olmayan ilişkiler olduğunda özellikle kullanışlıdır.

3.2 Destek Vektör Makinaları Regresyonu Temelleri

Veri dizisinin $T = \{(x_i, y_i): i = 1, 2, \dots, N\}$ 'den oluştuğunu kabul edebiliriz. SVR, tüm eğitim veri noktaları için fiilen elde edilen hedeflerden y_i en fazla ε sapmaya sahip olan ve aynı zamanda mümkün olduğu kadar düz olan bir $f(x) = wx + b$ fonksiyonunu bulur.



Şekil 3.2 SVM için doğrusal olmayan ayrılabilir hiperdüzlemde veri dizisi

Problemi bir optimizasyon problemi olarak yazarsak:

$$\min_{w} \frac{1}{2} w^T \cdot w \tag{3.1}$$

$$\text{'e tabi} \begin{cases} y_i - (w^T \cdot \phi(x) + b) \leq \varepsilon \\ (w^T \cdot \phi(x) + b) - y_i \leq \varepsilon \end{cases} \tag{3.2}$$

$\phi(x)$ çekirdek işlevidir, w kenar boşluğudur, (x_i, y_i) eğitim kümesidir. Regresyon için taahhüt edilebilecek hata toleransını ayarlamak için bağ ekliyoruz:

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} w^T \cdot w + C \sum_{i=1}^{l} (\xi_i + \xi_i^*) \tag{3.3}$$

$$\text{'e tabi} \begin{cases} y_i - (w^T \cdot \phi(x) + b) \leq \varepsilon + \xi_i \\ (w^T \cdot \phi(x) + b) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, i = 1..l \end{cases} \tag{3.4}$$

C sabiti, $f(x)$' nin düzgünlüğü ile ε' den büyük sapmaların tolere edildiği miktar arasındaki dengeyi belirler.

$$L = \frac{1}{2}\|w^T\|^2 + C\sum_{i=1}^{N}(\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^{N}(\eta_i\xi_i + \eta_i^*\xi_i^*) \tag{3.5}$$
$$-\sum_{i=1}^{N}\alpha_i(\varepsilon + \xi_i - y_i + wx_i + b)$$
$$-\sum_{i=1}^{N}\alpha_i^*(\varepsilon + \xi_i^* + y_i - wx_i - b)$$

$\eta_i, \eta_i, \alpha_i, \alpha_i^*$ 'la pozitif Lagrange çarpanlarını, L Lagrange değerini ifade etmektedir.

$$maks.\ \begin{cases}\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{N}(\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_i - \alpha_i^*)x_i x_j - \varepsilon\sum_{i=1}^{N}(\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^{N} y\ \ (\alpha_i - c \\ 'e\ tabi\ \{\sum_{i=1}^{N}(\alpha_i - \alpha_i^*) = 0\ ve\ \alpha_i, \alpha_i^* \epsilon [0, C]\end{cases} \tag{3.6}$$

Bir kez eğitildikten sonra, SVM regresyonu aşağıdaki formül ile oluşturacaktır:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{l}\theta_i\ \phi(x, x_i) + b \tag{3.7}$$

SVM regresyonun performansı çekirdek seçimine bağlıdır. Optimum çekirdek fonksiyonu seçimi başarımı ciddi oranda artıracaktır.

3.3 SVM Çekirdek Fonksiyonlar

Genel olarak çekirdek fonksiyonlar:

1- Doğrusal çekirdek fonksiyon

$$K(x_i, x_j) = x_i{}^T x_j \tag{3.6}$$

2- Radyal temelli çekirdek fonksiyon (RBF)

$$K(x_i, x_j) = e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{3.7}$$

3- Polinomal çekirdek fonksiyon

$$K(x_i, x_j) = [(x_i{}^T x_j) + 1]^d \tag{3.8}$$

4- Sigmoid çekirdek fonksiyon

$$K(x_i, x_j) = \tanh(\alpha x_i{}^T x_j + c) \tag{3.9}$$

5- Gauss çekirdek fonksiyonu

$$K(x_i, x_j) = exp\left(\frac{-\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3.10}$$

Modelde kullanılan SVM çekirdek yöntemi polinomal çekirdek fonksiyonu kullanılmıştır, bu formüldeki d değeri 2 olarak belirlenmiştir, bu durumdaki çekirdek fonksiyon kuadratik olarak adlandırılmaktadır.

3.4 SVM Regresyon Kriterleri

SVM regresyonu için bir çekirdek işlevi seçtikten sonraki adımlar, modelin eğitilmesini, hiperparametrelerin ayarlanmasını ve performansın değerlendirilmesini içerir. Çekirdek işlevini seçtikten sonra:

Veri ayırma: Etiketli veri kümesi bir eğitim seti ve ayrı bir doğrulama veya test seti olarak ikiye ayrılır. Eğitim seti, SVM regresyon modelini eğitmek için kullanılırken, doğrulama veya test seti performansını değerlendirmek için kullanılır.

Özellik ölçeklendirme: Modeli eğitmeden önce girdi verilerinde özellik ölçeklendirmesi yapmak önemlidir. SVM'ler, özelliklerin ölçeğine duyarlıdır, bu nedenle benzer bir aralığa sahip olduklarından emin olmak için özelliklerin normalleştirilmesi veya standartlaştırılması yaygındır. Bu adım, daha büyük büyüklükleri nedeniyle belirli özelliklerin eğitim sürecine hakim olmasını önlemeye yardımcı olur.

Parametre ayarı: SVM regresyonu, modelin performansını optimize etmek için ayarlanması gereken hiperparametrelere sahiptir. En önemli hiperparametreler epsilon (ε) ve düzenlileştirme parametresidir (C). Izgara arama, rastgele arama veya Bayes optimizasyonu gibi daha gelişmiş optimizasyon teknikleri, hiperparametre değerlerinin farklı kombinasyonlarını keşfetmek ve en uygun olanları seçmek için kullanılabilir. Farklı hiperparametre konfigürasyonlarının performansını değerlendirmek için ayarlama işlemi sırasında çapraz doğrulama uygulanabilir.

Modeli eğitim: Eğitim setini kullanarak, SVM regresyon modelini verilere uyarak eğitilir. Bu, kayıp fonksiyonunu en aza indiren optimum ağırlık vektörünü ve yanlılık terimini bulmak için optimizasyon problemini çözmeyi içerir.

Model değerlendirmesi: Model eğitildikten sonra, doğrulama veya test setini kullanarak performansı değerlendirilir. Modelin doğruluğunu ve öngörü yeteneğini ölçmek için ortalama hata karesi (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) veya R-kare gibi uygun regresyon yöntemleriyle hesaplanır. Bu hesaplar, modelin yeni veriler için ne kadar iyi genelleştirildiğine dair tespit yapılmasını sağlar.

Yinelemeli (iteratif) iyileştirme: Model değerlendirme sonuçlarına göre, süreci yinelemek ve iyileştirmek gerekebilir. Bu, modelin performansını iyileştirmek için hiperparametrelerin ayarlanmasını, farklı çekirdek işlevlerinin denenmesini veya ek özellik mühendisliği tekniklerinin dahil edilmesini içerebilir.

Nihai model dağıtımı: Modelin performansından memnun kalındığında, yeni veriler üzerinde tahminler yapmak için nihai model kullanılır.

SVM regresyonu, finans, sağlık bilimleri ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulama bulan çok yönlü bir metottur. Çok sayıdaki farklı değerlerde karmaşık girişe sahip problemleri ele alma ve görünmeyen verilere iyi genelleme yapma yeteneği nedeniyle mesafe koruma rölesinin empedans yanıtını iyileştirmek için kullanılmıştır. Mesafe koruma rölesi yanıtlarıyla elde edilen doğrusal olmayan çıkışlar arası ilişkileri başarılı şekilde kurma, öngörülen alan dışına aşırı taşmayı daha iyi şekilde kontrol etme yeteneği ile SVM regresyonu tercih edilmiştir. Bu çalışmada SVM metoduyla, PV kaynaktan besleme ile geleneksel döner makine kaynaklarından farklı olarak kısa devre yanıtı üreterek ölçümlenen arıza empedansının bozulan doğrusallığı ile bilinen hat empedansı arasındaki doğrusallık arasında başarılı bağlantı kurması amaçlanmaktadır.

4
PV SANTRALİ İLE BESLENEN GÜÇ SİSTEMİNE BAĞLI HATTA MEYDANA GELEN ARIZALARDA MESAFE KORUMA RÖLESİ EMPEDANS SONUÇLARININ İNCELENMESİ

4.1 Güç Sistemi Modeli

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr ve güneş enerjisi kaynakları kullanımının artmasıyla, büyük ölçekli olan bu santrallerde şebeke arabirimli güç elektroniği inverterlerinin etkin kullanılması gerekmektedir.

Güneş enerjisi santrallerindeki inverterlerin karakteristiği nedeniyle kısa devre akımı, nominal akımın 1,2 katıyla sınırlandırılmıştır. Bu akım senkron generatörlerden oluşan harici şebekenin arıza anında verebildiği kısa devre akımına göre oldukça küçük değerdir.

Bu çalışmada Konya, Karapınar'da tesis edilen 850 MW PV güneş enerjisi santrali model olarak benimsenmiştir. PV üniteler kolaylık için tek bir model olarak tasarlanmıştır. İnverterlerin 0,66/34,5 kV gerilimli ve bağlantı grubu Dyn11 yükseltici trafolar ile gerilim değeri yükseltildikten sonra 34,5/400 kV (YNyn0) gerilimli güç trafoları ile 400 kV iletim sistemi şebekesine bağlanmaktadır.

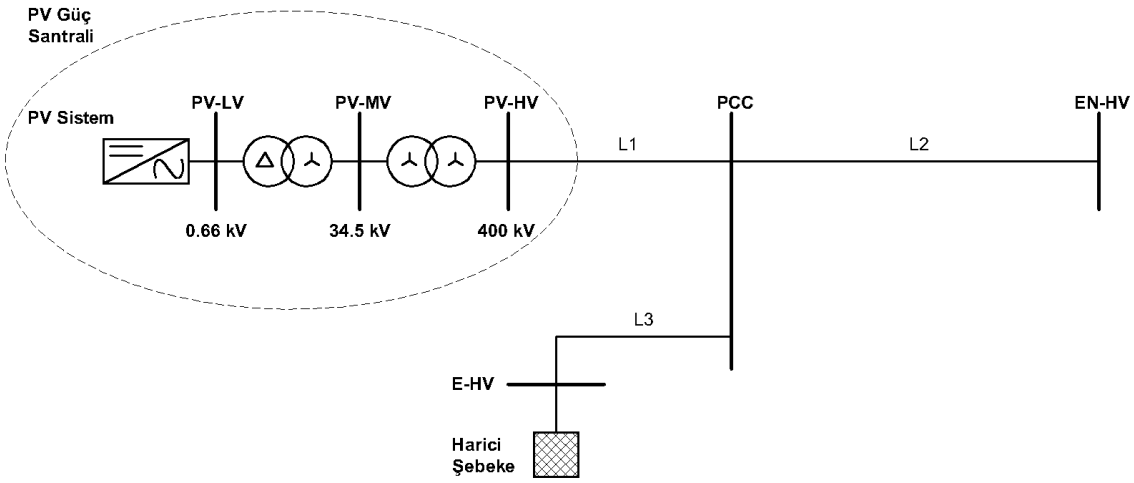
Tablo 4.1 Enerji iletim hattı empedans bilgileri

Hat	Hat uzunluğu (km)	İletken türü	Pozitif bileşen empedansı (Ω)	Sıfır bileşen empedansı (Ω)
L1	1	ACSR 265/35–380 kV	0.027199 + j0.252555	0.126249 + j0.906360
L2	25	ACSR 265/35–380 kV	0.679996 + j6.313825	3.156225 + j22.6590075
L3	1	ACSR 265/35–380 kV	0.027199 + j0.252555	0.126249 + j0.906360

Güç sistemi modelindeki L1 ve L3 hatları uzunluğu 1 km, L2 hattı uzunluğu ise 25 km olarak belirlenmiştir. İletken türü 380 kV ACSR 265/35 olarak seçilmiştir.

Tablo 4.2 Kaynak bilgileri

Kaynak	Kısa devre akımı (kA)	X/R oranı
Harici şebeke	8,66	10
PV sistem	1,37	10



Şekil 4.1 Güç sistemi modeli

4.2 PV Güç Santrali Modeli

4.2.1 Şebekeye Bağlı Üç Fazlı İnverter Temel Modeli

Güneş enerjisi panellerinden elde edilen DC gerilim, DC-AC inverter vasıtasıyla AC'ye çevrilir. Yükseltici trafo vasıtasıyla güç sistemi şebekesine bir kablo veya hat üzerinden bağlanır.

Üç fazlı inverter: yüksek güç seviyeli uygulamalarda kullanılır. Her bir çift arasında faz geçişi 120 derece olan üç çift anahtar vardır. Tek fazlı inverterde olduğu gibi, kuasi-sinüzoidal bir çıkış üretmek ve çıkış gerilimini veya akımını kontrol etmek için sinyal genlik modülasyonu (PWM) tekniği kullanılabilir [58]. Yüksek güçlü uygulamalar için en çok kullanılan anahtarlar IGBT'lerdir.

Model olarak bir aşamalı VSC inverteri seçilmiştir. Modülasyon tekniği olarak sinüsoidal sinyal genliği modülasyonu ile (SPWM) kuasi-sinüsoidal çıkış üretir. Bu durumda modülasyon indeksi m_a (0 ile 1 arasındaki değişken) maksimum değerine eşittir (m_a = 1). Ardından, minimum dc gerilimi m_a kullanılarak belirlenir. Maksimum dc gerilimi, serideki panel sayısı N_{ser} ile çarpılan açık devre gerilimi v_{oc} olacaktır.

$$v_{ac} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a v_{dc} \tag{4.1}$$

$$v_{dc} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} v_{ac} \tag{4.2}$$

$$v_{dc_{maks}} = v_{oc} N_{ser} \tag{4.3}$$

4.2.2 İnverter Kontrolörü için Temel Model

Bir dönüştürücünün temel işlevi, önceden belirlenmiş performanslara dayalı olarak iki alt sistem arasında enerji alışverişi yapmaktır. Alt sistemler genellikle gerilim/akım dalga formları, frekans, faz açısı ve faz sayısı bakımından farklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle, bu alt sistemler doğrudan birbirleriyle etkileşime giremezler, şebekeye enjekte edilen enerjinin kalitesini yükseltmek için farklı kontrol tipleri kullanılması gerekir. Elektrik şebekeleri, sürekli bağlantı ve yüklerin kesilmesi, kopmaların ve rezonansların oluşması, güç salınımlarının meydana gelmesi, fiderlerden kaynaklanan harmonik akımlardan kaynaklanan rezonanslar, iletim sistemine düşen yıldırım kaynaklı arızalar gibi özelliklerle karakterize edilmektedir.

Aşağıdaki kriterler sağlanarak şebeke ile iyi bir bağlantı oluşturulabilir:

- Şebeke senkronizasyonu: Şebekenin durumunun anlık olarak izlenmesini temsil eder. Amaç, DC'den AC tarafına geçerken frekansın değerini sabit sınırlarda tutmaktır. Ayrıca, inverter gerilimi şebeke özellikleri ile faz ve genlik açısından ayarlar;

- PV jeneratöründen şebekeye aktif ve reaktif güç iletmek için. Güç faktörü sabit bir aralıkta tutulur;

- DC gerilimi sabit tutmak için. Sürücünün V_{DC} varyasyonları altında ulaşması gereken bir referans değeri V_{ref} vardır;

- DC'den AC tarafına dönüşüm: SPWM tekniği ile inverter, V_{ref} referans değerinin karakteristiğinin ardından çıkışında sinüzoidal gerilim oluşturur.

Inverter kontrolünde kullanılan temel bileşenler aşağıdaki gibidir:

- Faz Kilitli Döngü kontrolü: PLL, bir iç sinyal osilatörünün ve bir giriş sinyaliyle ayarlanmış açısal ve hızın sabit tutulması için kontrol edilen bir faz dedektörünün bulunduğu bir kontrol sistemidir. Kontrolörün çıkış sinyali aynı özelliklere sahip

olabilir. Aslında, PLL kontrolü faz açısını şebeke geriliminden alır. Bu açı aşağıda d-q çerçevesindeki gerilim ve akımı dönüştürmek için kullanılır.

- Faz dedektörü: Giriş sinyali ile PLL'nin dahili osilatörünün ürettiği sinyal arasındaki faz farkıyla orantılı bir çıkış sinyali üretir.
- Döngü filtresi: Bu blok, yüksek frekanslı AC bileşenlerini faz dedektör çıkışından azaltmak için düşük geçişli bir karakteristik özelliği sunar. Tipik olarak, bu blok birinci dereceden düşük geçiş filtresi veya bir PI kontrol cihazından oluşur.
- Gerilim kontrollü osilatör: Bu blok çıkışında, frekans dönüştürücü tarafından sağlanan giriş gerilimin bir fonksiyonu olarak belirli bir merkezi frekansa göre frekansı değiştirilen bir sinyal üretir.

- Dış akım kontrolü: Dış akım kontrolü, kontrolün giriş olarak aldığı referans değerlerine bağlı olarak aktif ve reaktif gücü düzenler. Ayrıca, kontrol, iç akım kontrolü tarafından dağıtılan d-q çerçevesinde bir referans akım değeri gönderir. Kondansatörün güç noktası kontrolü (PPT) tarafından gönderilen V_{DC} değeri ile şarjlı kalmasını sağlar.
- İç akım kontrolü: d-q kontrolü veya vektör kontrolü, üç fazlı sistemlerin davranışını belirleyen diferansiyel denklemlerin bağımsız vektörlerin döndürülmesinde soyutlanmasına izin verir. $i_d{}^*$ ve $i_q{}^*$ güncel referanslardır ve istenen aktif ve reaktif gücü P^* ve Q^* belirlemek için geliştirilmiştir.

$$P^* = \frac{3}{2}\left(v_{zq} i_q{}^* + v_{zd} i_d{}^*\right) \tag{4.4}$$

$$Q^* = \frac{3}{2}\left(v_{zq} i_d{}^* + v_{zd} i_q{}^*\right) \tag{4.5}$$

$i_d{}^*$ ve $i_q{}^*$ anlık güç teorisinden hesaplanır ve önceki denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$i_q^* = \frac{2}{3}\frac{P^*}{v_{zq}} \tag{4.6}$$

$$i_d^* = \frac{2}{3}\frac{Q^*}{v_{zq}} \tag{4.7}$$

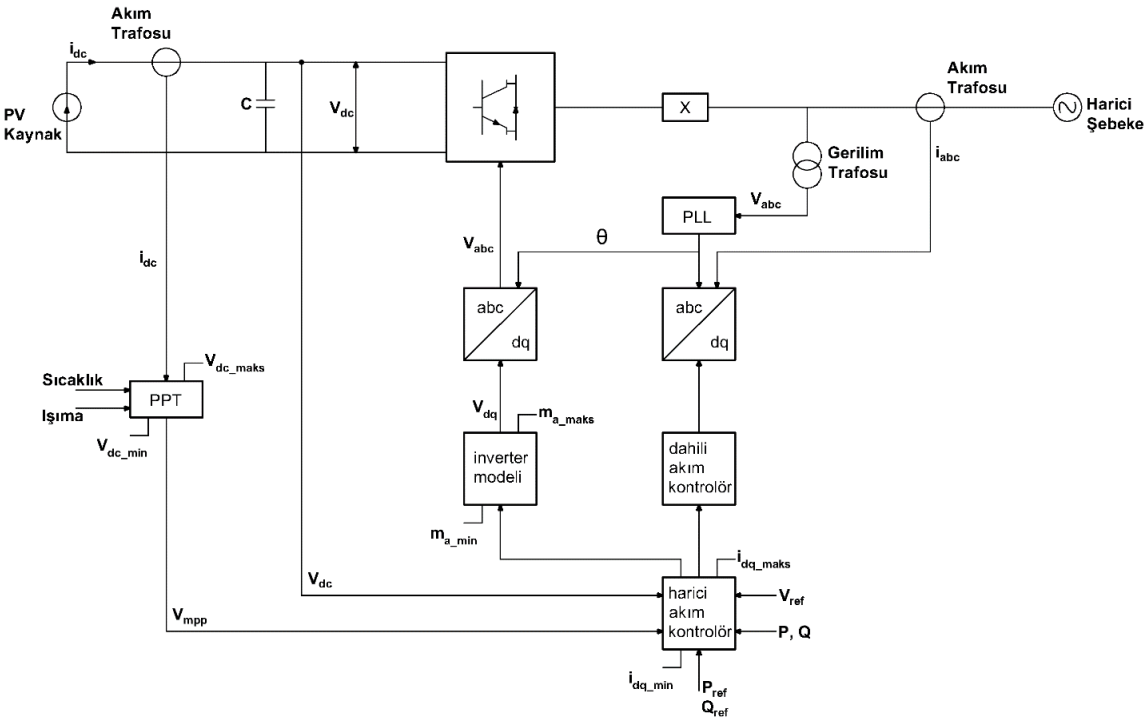
- DC gerilim regülatörü: Bu kontrol dış akım kontrolünün içine yerleştirilmiştir. DC gerilim regülatörü, üretim kaynağı ile şebekeye enjekte edilen güç arasında güç dengesi sağlayan DC barasının gerilimini kontrol etmek için gereklidir. DC geriliminin kontrolü minimum ve maksimum sınırlamalara göre bir referans değerini takip etmelidir. Sınırlama inverter tarafından verilir. Bu durumda, oransal integral (PI) kontrolörü DC gerilim regülatörü ile ilişkilidir. PI kontrolörü, dinamik tepkisini geliştirmek ve ayar noktası ile kontrol edilecek parametrelerin ortalama değeri arasındaki hataları azaltmak için dış gerilim kontrolünde telafi sağlar.

- Gerilim modülasyonu: VSC dönüştürücü, referans verilen gerilimleri, sinyal genlik modülasyonu (PWM) tekniği ile modüle ederek uygulayabilir. Kontrol sinyalleri, referans gerilimi olarak işlev gören sinüs biçimli bir sinyal ile üçgen bir sinyal arasındaki karşılaştırma yoluyla elde edilebilir. Sinüzoidal sinyalin frekansı çıkış geriliminin frekansını tanımlar ve üçgen sinyalin frekansı darbelerin sayısını belirler. SPWM modülasyonlu sinyaller, inverter çıkışındaki genliği, frekansı ve fazı birleştiren üç fazlı dengeli bir set oluşturur.

- PPT kontrolü: Genel olarak güç noktası takibi (PPT) ile şebekeye bağlı PV invertörü, PV sisteminden maksimum gücü almaya çalışır. I-V karakteristiğinde, maksimumu güç noktası (MPP) sıcaklık ve ışıma(radyasyon) değerine bağlıdır. Bu durumda MPP, gerektiğinde güç kısalması için P_{ref} adı verilen farklı bir değerle değiştirilir. Öncelikle, izleme sisteminin her koşulda her zaman MPP'ye ulaştığı düşünülmekteydi, artık sistem çalışma koşullarının hangisi olduğunu seçebilmektedir. Aşağıdaki modelde uygulanan yeni algoritma yalnızca V_{DCmeas} ve P_{meas} değerlerini değil aynı zamanda P_{ref}'in değerini de bilmektedir. Bir PV dizisi tarafından sağlanan güç, yük gerilimine göre değişir. Çalışma gücü noktasını elde etmek için gerilim değeri, dizi sıcaklığı ile oldukça güçlü ve aydınlatma yoğunluğu ile daha yavaş değişir. Daha önce açıklandığı gibi, elektrik santrali ile şebeke arasında, gücü DC'den AC'ye dönüştürmek için bir inverter vardır. Güç dönüştürücünün optimum gerilim dönüşüm oranında çalıştığından emin olmak için, belirli bir kontrol aracılığıyla bir geri bildirim ile nasıl çalıştığını bilmek önemlidir. Bu nedenle, dizi (array) gücünün elde edildiği gerilim değerini ve dizi gerilimini bu değere yakın tutmak için bir kontrol cihazını belirleme gereksinimi ortaya çıkar. Çalışma koşullarını tahmin etmek için birkaç yaklaşım

vardır. En genel olanı dizi akımını taramak, dizi gerilimini ve akımı ölçmek ve çalışma noktasını bulmaktır. Diğer bir pratik yol, dizinin akımını değiştirmek ve bunun sonucunda dizilim güç çıkışının arttığını veya azaldığını gözlemlemek, ardından kontrol, çalışma noktasını istenen noktaya doğru hareket ettirmek için hareket etmelidir.

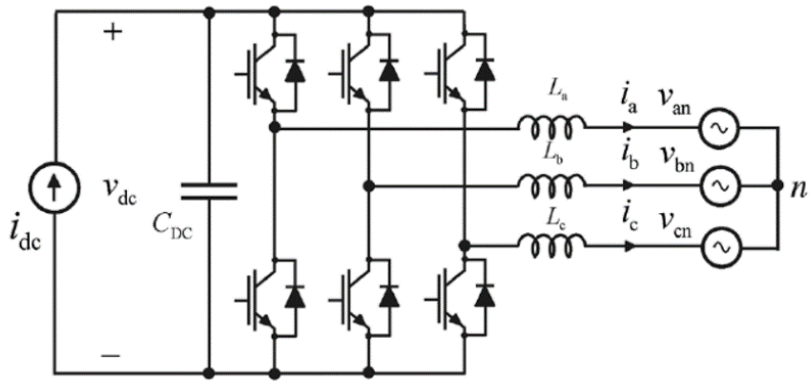
Kullanılan modelde PPT kontrolü bulunmamaktadır.



Şekil 4.2 Inverter kontrolörünün temel modeli

4.2.3 Şebekeye Bağlı PV Sistem Modeli

Akım beslemeli inverterler, kaynağın fiziksel olarak bir fotovoltaik jeneratör gibi bir akım kaynağı olduğu uygulamalarda bulunur. Dönüştürücü, akım kontrollü bir gerilim kaynağı dönüştürücüsü (VSC) olarak çalışacak şekilde yapılandırılmış bir statik jeneratör öğesi kullanılarak PowerFactory'de uygulanır.



Şekil 4.3 Şebekeye bağlı PV sistemin temel gösterimi

Şebeke tarafı üç ideal gerilim kaynağı ile modellenmiştir, DC taraf dinamikleri basitleştirmek amacıyla hesaba dahil edilmemiştir.

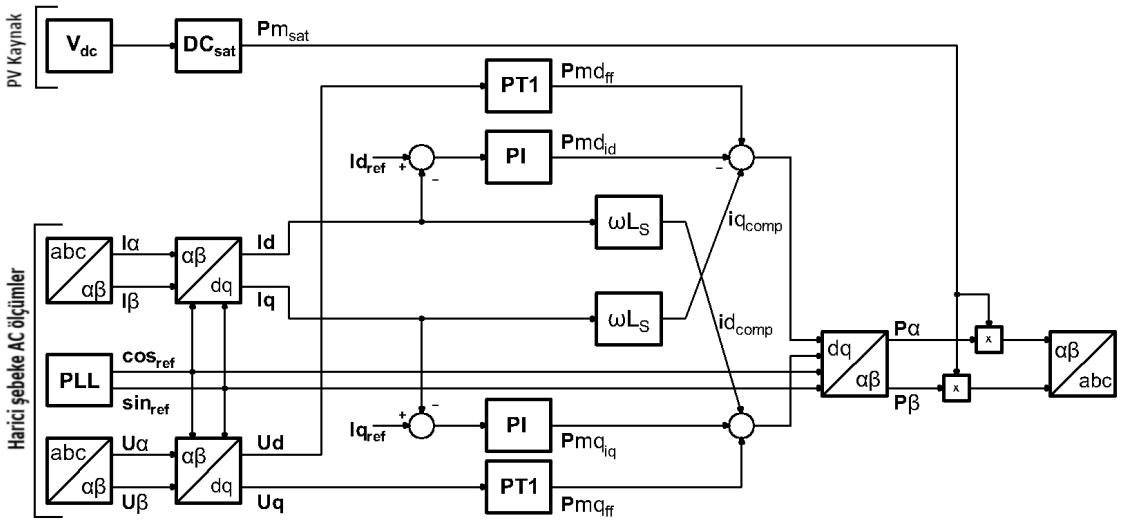
Akım kontrollü VSC sisteminin genel kontrolünde yavaş bir dış kontrolör ve hızlı iç kontrolör bulunmaktadır. Dış kontrolör DC taraf gerilimini düzenler. Kullanılan modelde DC gerilim sabit kabul edildiğinden dış kontrolör kullanılmamıştır.

AC tarafı gerilimi ve PCC barasındaki çıkış gücü uygulamaya bağlı olarak değişen ve dönüştürücü akımını düzenleyen iç akım kontrolörü için akım referansları üretir.

Dönüştürücü akımları, ünitenin aktif ve reaktif akımlarını düzenleyen klasik bir d-q dönen referans sistem akım kontrolörü kullanılarak kontrol edilir.

Faz kilitli döngü (PLL), inverter gerilimini PCC'de ölçülen bir referans gerilimle ayarlar, ayrıca şebeke geriliminin faz açısını da takip etmektedir.

Gerilim ve akım kontrollü VSC'nin dinamik modeli kaynak ve yük empedansının etkisi dahil edilmeden türetilmiştir. Bu modele sonlandırılmamış model denmektedir. Dinamik modeller, üç fazlı sinüzoidal sinyallerin eşdeğer DC sinyalleri olarak analiz edilebildiği d-q alanında türetilmiştir.



Şekil 4.4 PV inverterin blok diyagramı

Clark dönüşümü ile üç eksenli vektörü iki eksenli döner vektöre dönüştürürsek:

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3}\begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \tag{4.8}$$

$$\begin{pmatrix} u_q \\ u_d \\ u_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{pmatrix} \tag{4.9}$$

Park dönüşümü iki eksenli döner vektörü döner eksen tabanlı iki eksenli sabit vektöre dönüştürürsek:

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3}\begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

$$\begin{pmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{pmatrix} \tag{4.11}$$

$$i_r = i_d \cdot \cos phi - i_q \cdot \sin phi \tag{4.12}$$

$$i_i = i_d \cdot \sin phi - i_q \cdot \cos phi \tag{4.13}$$

d-q ekseninde bulunan i_{dref} , akım kontrol şeması i_d akımının i_{dref} referans akımını takip etmeye zorlar. i_d 'nin kontrolü P_{md_id} güç değerinin kontrolünü sağlar. VSC'yi aşırı yük ve dış arızalara karşı koruma amacıyla V_{dc} doyma bloğu ile sınırlandırılmıştır. Akım kontrol şeması i_q akımının i_{qref} referans akımını takip etmeye zorlar. Q_s reaktif gücü i_q akımı ile orantılıdır.

$$P_{md_{id}} = K_d \left(1 + \frac{1}{sT_d}\right) \cdot \left(i_{dref} - i_d\right) \tag{4.14}$$

$$P_{mq_{iq}} = K_q \left(1 + \frac{1}{sT_q}\right) \cdot \left(i_{qref} - i_q\right) \tag{4.15}$$

$$P_{md_{ff}} = \left(\frac{K_{ff}}{1 + sT_m}\right) \cdot U_d \tag{4.16}$$

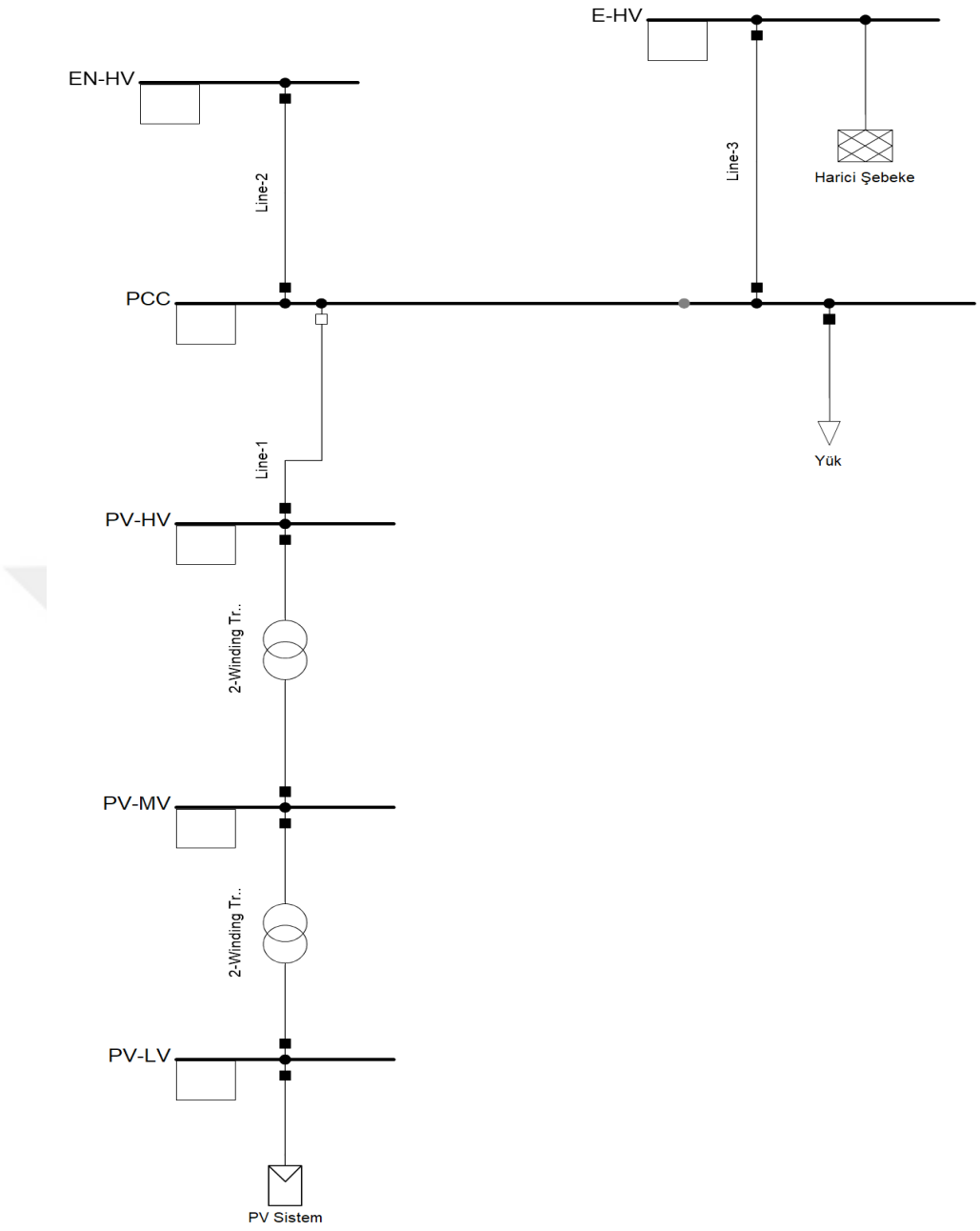
$$P_{mq_{ff}} = \left(\frac{K_{ff}}{1 + sT_m}\right) \cdot U_q \tag{4.17}$$

Müsaade edilen en yüksek akım büyüklüğü tasarımsal bir tercihtir, VSC'nin emniyetli çalışma değerlerine göre seçilir ve i_{dref} doyma limiti değeri vasıtasıyla uygulanmaktadır.

4.3 PV Santrali ile Beslenen Güç Sistemine Bağlı Hatta Kısa Devre Arıza Benzetim Çalışması

Güç sisteminde meydana gelen kısa devre arızaları PCC barası ve EN-HV barası arasındadır. Üç farklı arıza senaryosu incelenmektedir, bunlar tek faz-toprak arızası, faz-faz arıza ve üç-faz arızasıdır. Tüm inverterler arıza öncesinde 0,93 güç faktör değerinde işletilmektedir. Güç sisteminde kararlı bir arıza öncesi koşulları için, 100 MW değerinde güç faktörü 1 olan bir üç fazlı yük PCC barasına bağlanmıştır.

Inverter kontrolüyle arıza durumuna ve aşırı yüklenmeye karşı akan akım sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.5 Digsilent PowerFactory güç sistem modeli

Digsilent PowerFactory yazılımı ile elektromanyetik transiyent (EMT) modülü üzerinden simülasyon koşturulmuştur. Her bir arıza için arıza öncesi süre 199 ms, arıza süresi 300 ms olarak alınmıştır. Harici şebeke bileşeni için Digsilent PowerFactory kütüphanesinden faydalanılmıştır.

İncelenen mesafe koruma rölesi L1 hattına PV-HV barası tarafından bağlanmıştır, ileri yönü PCC barasıdır. Mesafe koruma bölgeleri olarak kademe-1 L1 hattını, kademe-2 L3 hattını, kademe-3 L2 hattını kapsamaktadır.

Tüm arıza türleri L2 hattının %0'ı ile %95 arasında uygulanmıştır.

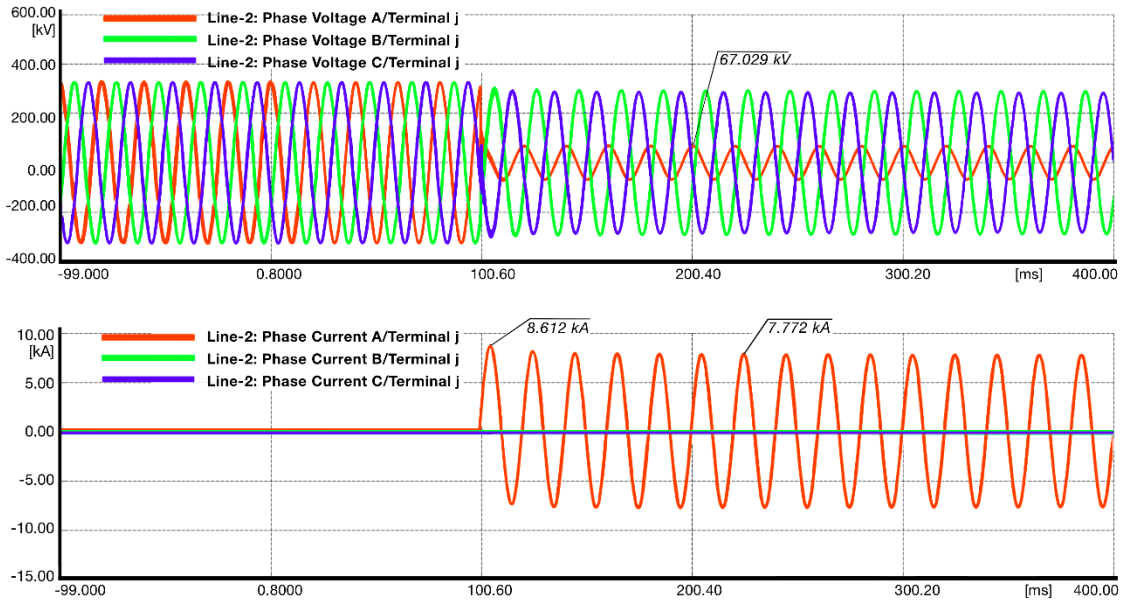
Arıza direnci tüm arıza türleri için sıfır olarak kabul edilmiştir. Mesafe koruma rölesi için tüm ölçümler ve hesaplamalar primer değerlerdedir. L2 hattındaki %0'daki arıza konumu L1 hattının toplam empedansına karşılık gelmektedir.

PV güç santrali uzak beslemenin mesafe koruması üzerindeki etkisini incelemek için oluşturulan sistem kullanarak arıza türlerine göre verdiği yanıtlar incelenmiştir.

4.3.1 Tek Faz-Toprak Arızası

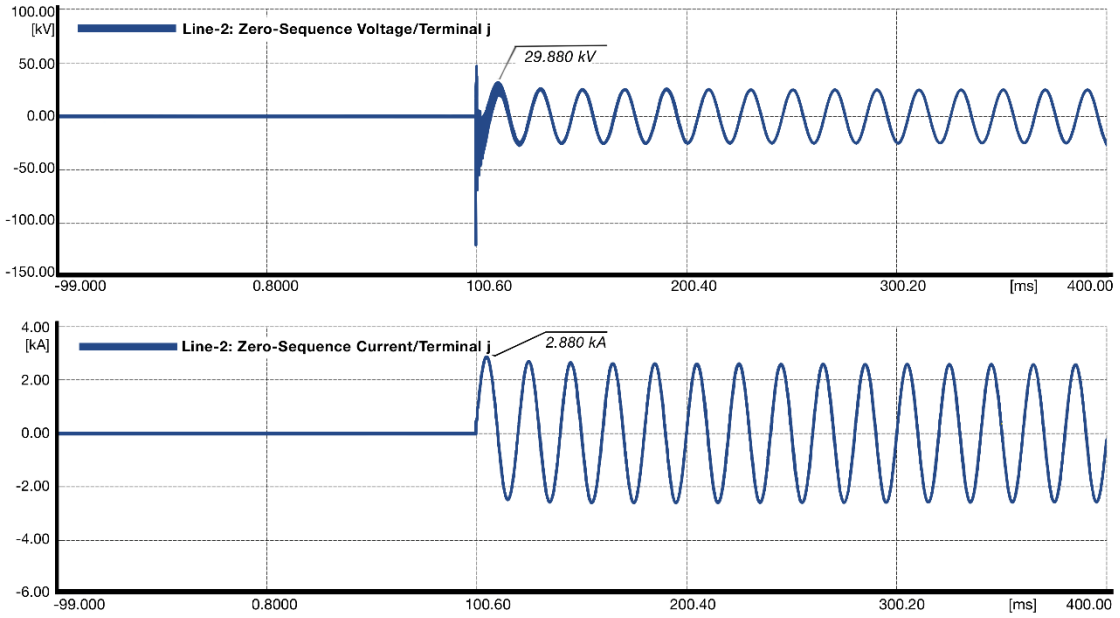
Akım i_{dref} tarafından büyüklük olarak sınırlandırılmıştır. Fazlar arası akım dengesizliği PV sistemin çıkış gücünde salınımlara ve ortalama değerinde düşüşe neden olur.

Arıza başlangıcında akım kontrollü VSC'nin geçici (transiyent) yanıtı nedeniyle gerilim dalga şekli belirgin dalgalanmalara maruz kalır.



Şekil 4.6 Tek faz-toprak arızasında üç faz gerilimleri ve akımları

L2 hattının %25'inde A fazında meydana gelen tek faz-toprak arıza karakteristiği şekilde görülmektedir. Arıza 100. ms'de başlamaktadır. A fazında arıza öncesi tepe değeri 326 kV, arıza anındaki tepe gerilimi 67 kV değerindedir. Arıza akımı 8,6 kA'e erişir, 7,7 kA'de kararlı hale gelir.

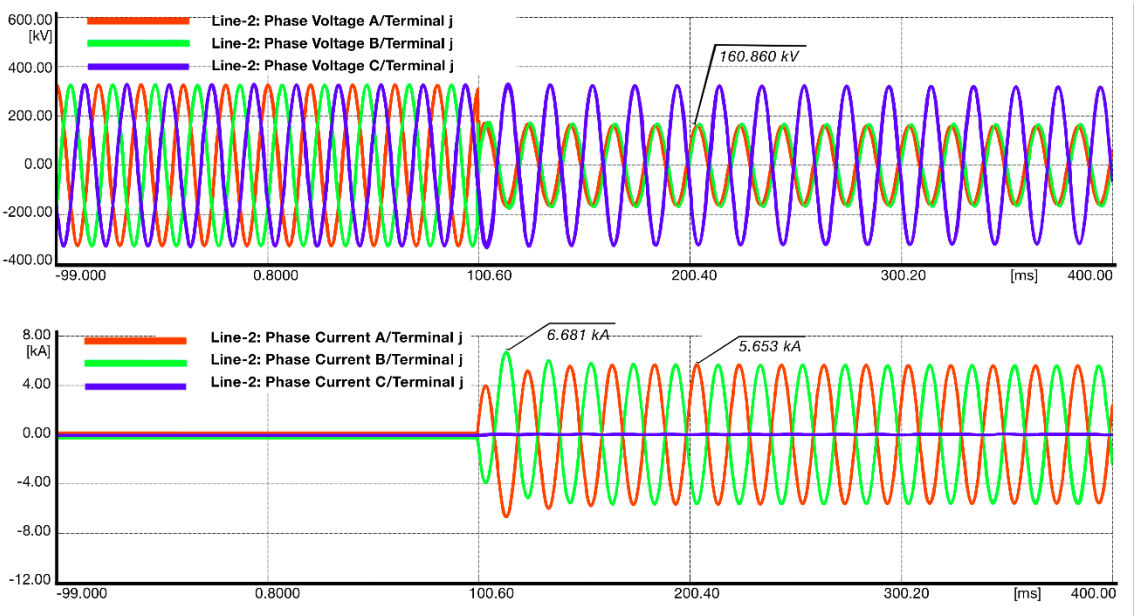


Şekil 4.7 Tek faz-toprak arızasında sıfır bileşen gerilimi ve akımı

Asimetrik arıza PV-HV barası tarafında sıfır bileşen gerilimini 29,8 kV 'a çıkarır, sıfır bileşen akımı ise 2,8 kA değerine çıkar.

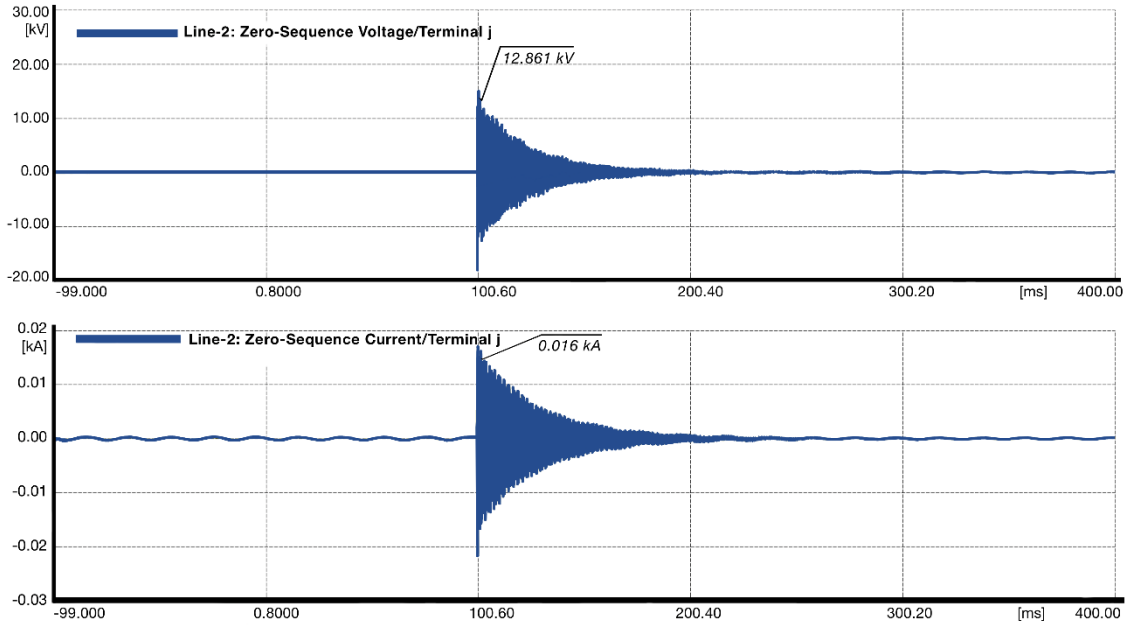
4.3.2 Faz-Faz Arızası

L2 hattının %25'inde A-B fazda meydana gelen faz-faz arıza karakteristiği şekilde görülmektedir. Arızalı fazlarda gerilim tepe değeri 160,8 kV'a, akım tepe değeri ise 6,6 kA'e ulaşır. Arıza akımının tepe değeri 5,6 kA'de kararlı hale gelir.



Şekil 4.8 Faz-faz arızasında üç faz gerilimleri ve akımları

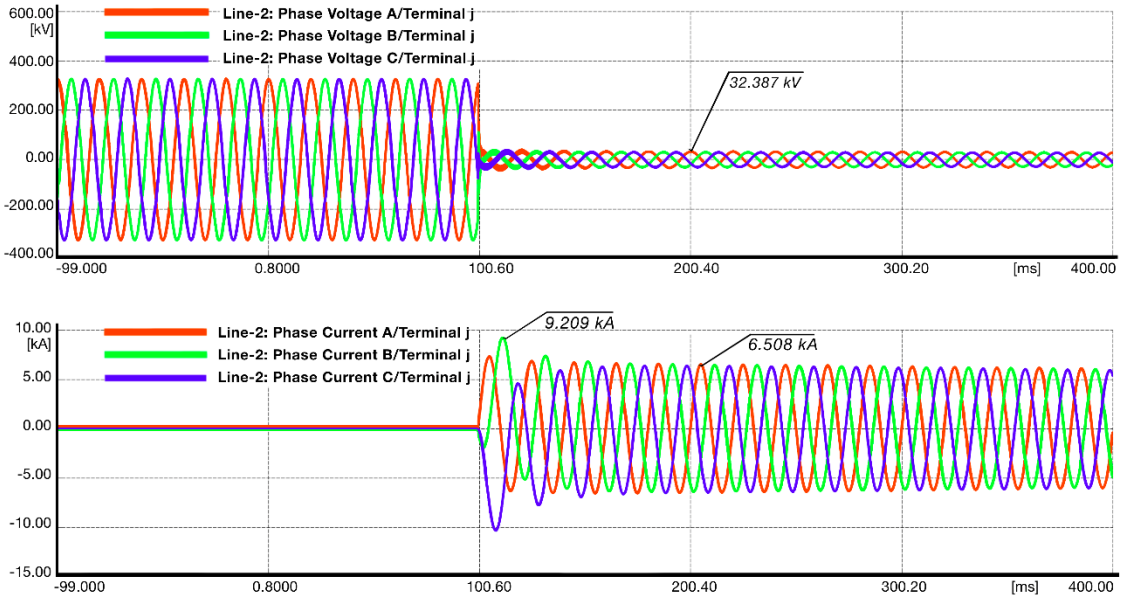
Asimetrik arıza PV-HV barası tarafında sıfır bileşen gerilimini 12,8 kV'a çıkarır, sıfır bileşen akımı ise ihmal edilebilir değerlerdedir.



Şekil 4.9 Faz-faz arızasında sıfır bileşen gerilimi ve akımı

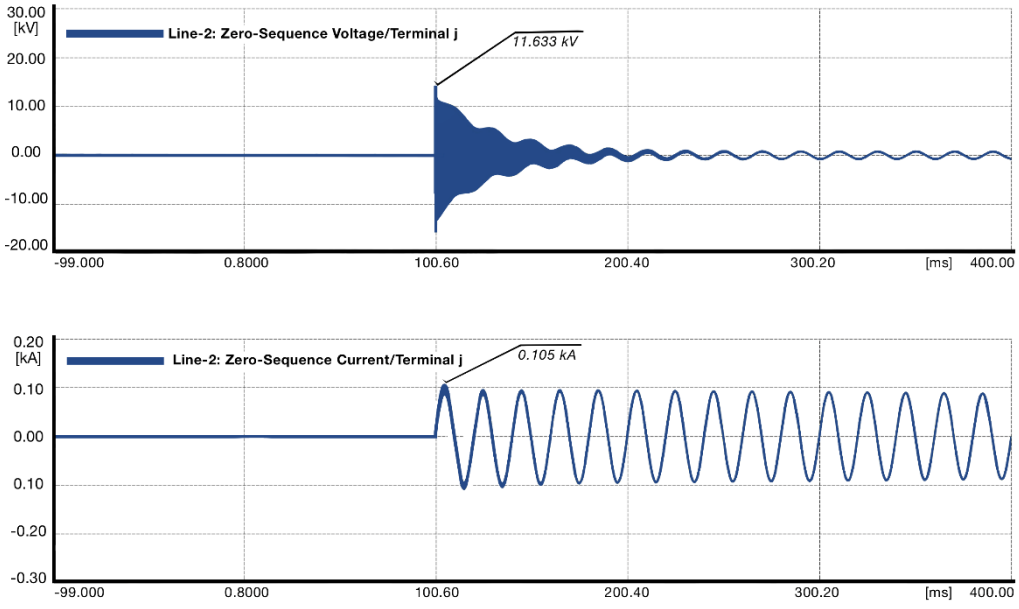
4.3.3 Üç-Faz Arızası

L2 hattının %25'inde meydana gelen üç-faz kısa devre arızasında, PV-HV barasında gerilim tepe değeri 32,3 kV'a kadar düşer, bu değer diğer kısa devre arıza türlerindeki gerilim değerine göre en düşük değerdedir. Arıza anında akım tepe değeri 9,2 kA değerine erişir, 6,5 kA değerinde kararlı hale gelir. Üç-faz kısa devre arızalarında arıza akımı diğer kısa devre arızalarına göre daha yüksek değerdedir.



Şekil 4.10 Üç-faz arızasında üç faz gerilimleri ve akımları

Simetrik kısa devre arızasında sıfır bileşen gerilim tepe değeri 11,6 kV'a ulaşır, sıfır bileşen akım değeri ise her üç fazda da arıza akımı dengeli olduğundan oldukça küçük değerdedir.



Şekil 4.11 Üç-faz arızasında sıfır bileşen gerilimi ve akımı

4.4 Mesafe Koruma Empedans Hesabına İlişkin Tespitler

Bu başlık altında, PV santrali ile beslenen güç sisteminde PCC barası ve EN-HV barası arasında tek faz-toprak arızası, faz-faz arızası ve üç-faz arızaları oluşturularak arızaya PV kaynaktaki inverterin etkisi incelenmiştir.

Sistem yükü, arızaya katkısı olmayan sabit empedans modeliyle temsil edilmiştir. Faz-toprak arızasında akan sıfır bileşen akımı faz akımının üçte biri kadardır. Üç-faz arıza simülasyonunda arıza akımı tepe değeri yaklaşık 9,2 kA'ya ulaşır, arıza akımları dengeli olduğu için sıfır bileşen akımları oluşmaz. Genel olarak oluşturulan sistemden alınan akım, gerilim yanıtları gerçek bir arızayla benzerdir. Yapılan simülasyon çalışmasında PV santral kontrolörlerinin harici şebekeye uyarak makul sınırlar içerisinde yanıt verdiği gözlemlenmektedir.

Harici şebeke arızaya reaktif güç, PV santrali ise arızaya aktif güç sağlamaktadır. Arızaya PV santral tarafından kaynaklanan paralel kaynak besleme akımı toplam arıza akımının %25'inden daha düşük değerdedir. PV santralin harici şebekeye paralel kaynak besleme olarak bağlanması durumunda önündeki hattın ilerisindeki komşu L2 hattının %0-%95'i arasında meydana gelen kısa devre arızalarında gerilim ve akım değerleri elde edilmiştir, bu değerler mesafe koruma empedans hesaplarında kullanılacaktır.

Uzak kaynak besleme durumunda düşük erişim (underreach) veya aşırı erişim (overreach) durumunun faz-toprak ve faz-faz arızaları için yüksek değerde olacağı ölçülen gerilim ve akım değerlerinden anlaşılmaktadır ve arıza empedans değerlerinin bu değerler ile orantılı olarak değişmesi beklenmektedir.

5
PV SANTRALİYLE BESLENEN HATTA MESAFE KORUMA RÖLESİ EMPEDANS HESABININ DESTEK VEKTÖR MAKİNALARIYLA PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ

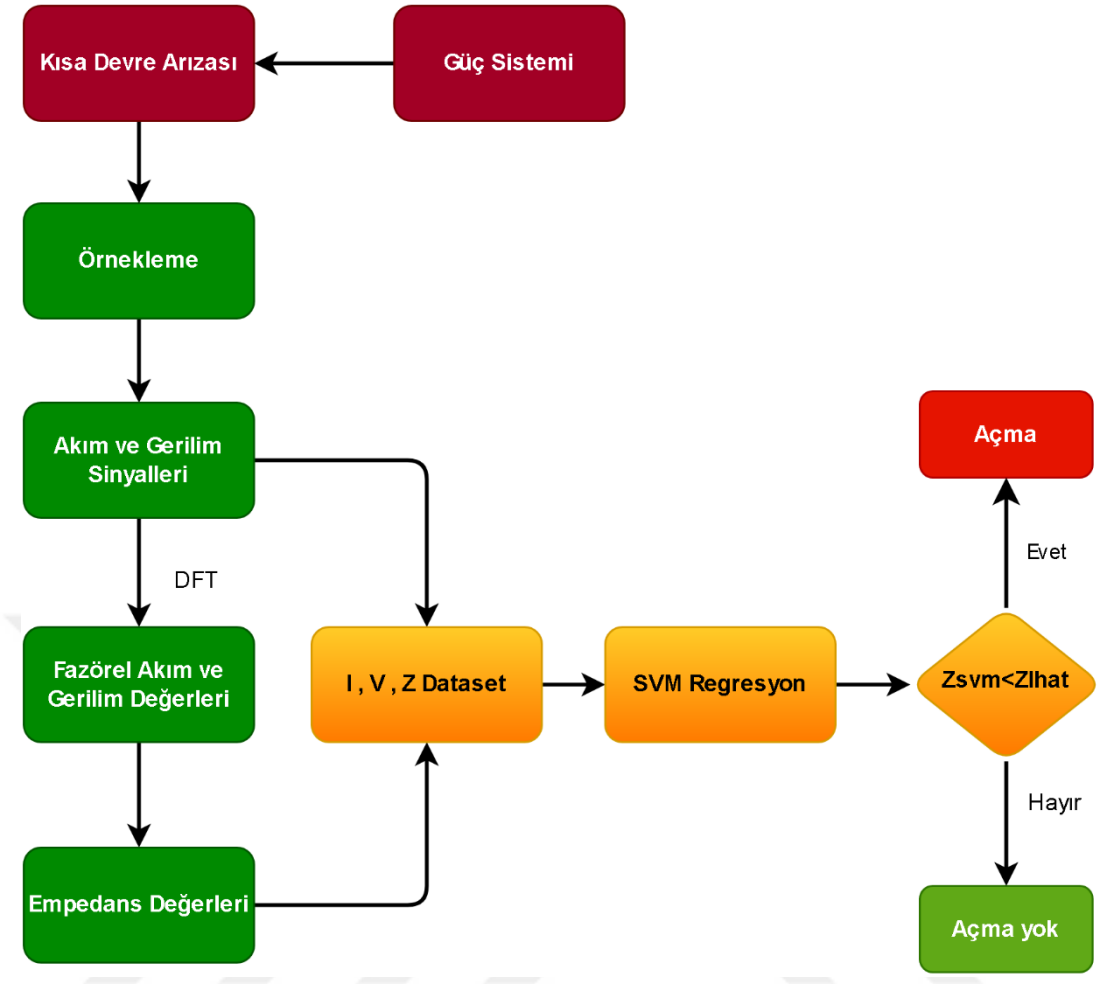
5.1 SVM ile Geliştirilmiş Mesafe Koruma Empedans Hesabı

Önerilen modelde güç sisteminde koşulan tek faz-toprak, faz-faz ve üç-faz kısa devre arızaları ile elde edilen akım ve gerilim anlık değerleri belirli bir örnekleme aralığı ile Comtrade formatında kaydedilmektedir. Bu formatta elde edilen veriler DFT ile hesaplanarak büyüklük ve açıyı içeren fazörel değerlere dönüştürülmektedir. Fazörel değerler kullanılarak ilgili arıza türüne göre empedanslar hesaplanmaktadır, bu değerler DFT ile elde edilen fazörel akım ve gerilimler kullanılarak hesaplanan empedanslardır, kısaca ”Arıza empedansı DFT ile” olarak adlandırılmıştır.

Elde edilen akım, gerilim ve empedans değerleri düzenlenerek bir veri dizisi (dataset) oluşturulmuştur. Bir veri dizisi: üç faz akım, üç faz gerilim ve DFT kullanılarak hesaplanan empedans değeri olmak üzere toplam yedi farklı veri türünden oluşmaktadır. Her bir kısa devre arızası türüyle ilgili: tek faz-toprak, faz-faz ve üç-faz olmak üzere üç adet veri dizisi bulunmaktadır.

Veri dizileri SVM regresyon algoritmasının girişi (input) olarak kullanılmıştır. Girişte kullanılan verinin SVM metodu ile hesaplandıktan sonra olmasını beklenilen değer olan “Toplam arıza empedansı”, mesafe koruma rölesine girilen $Zlhat$ değerine karşılık gelir. Bu değer SVM algoritmasında çıkış (output) olarak kullanılmaktadır. SVM algoritması ile öğrenme sürecinden sonra giriş veri dizisi tekrar hesaba katılarak modelde önerilen empedans sonucu $Zsvm$ elde edilmektedir, bu “Arıza empedansı SVM ile” olarak adlandırılmaktadır.

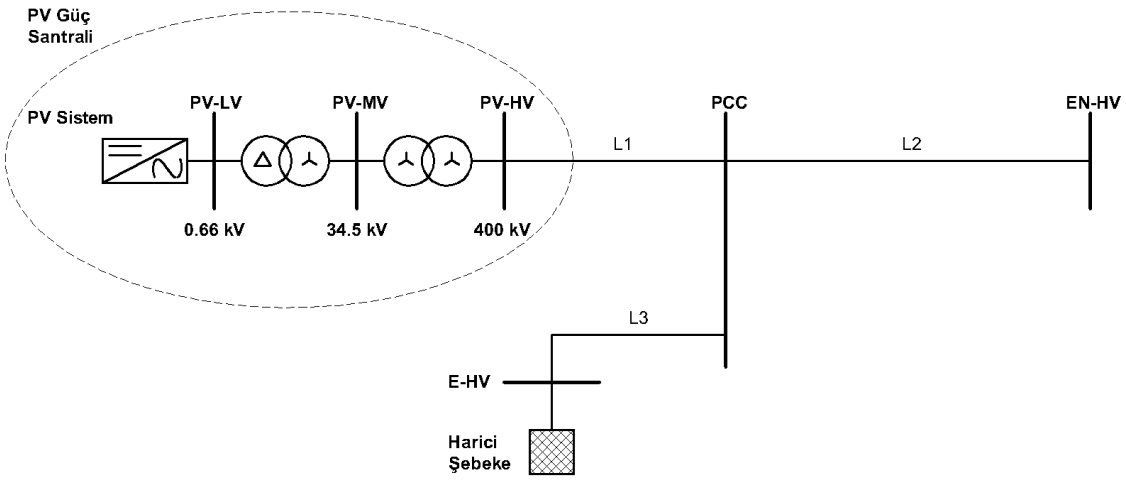
Mesafe koruma rölesi açma (trip) kararını olması istenen $Zlhat$ ile önerilen modelde hesaplanan $Zsvm$ değerini kıyaslayarak vermektedir.



Şekil 5.1 SVM ile geliştirilmiş mesafe koruma empedans hesabı

5.2 Önerilen Empedans Hesabı Performansı

Aşağıda Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te görüldüğü üzere, "Hat empedansı" olan $Zlhat$, L2 hattının gerçek empedans değerini göstermektedir. "Arıza empedansı DFT ile", ölçülen gerilim ve akım değerleri kullanılarak DFT metodu kullanıldıktan sonra hesaplanan empedans değerini gösterir. "Toplam arıza empedansı", arıza noktasındaki L1 ve L2 hatlarının toplam empedans değerini gösterir, mesafe koruma rölesinin hesaplamasını beklediğimiz değerdir. "Arıza empedansı SVM ile" olan $Zsvm$, SVM metodu kullanılarak önerilen model ile hesaplanan empedans değeridir.



Şekil 5.2 Güç sistemi modeli

Simülasyon sonuçları, DFT ile ölçülen arıza empedansının çeşitli arıza konumlarındaki (%0-95) arıza türünden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. SVM ile hesaplanan arıza empedansında, iletim hattının farklı kısımlarında meydana gelen arızalarda önerilen metot ile hesaplanan empedans değerini sağlıklı şekilde arızayı tespit edebildiği görülmektedir. Tüm arıza türleri için hata, modelin eğitimi sırasında düşmektedir.

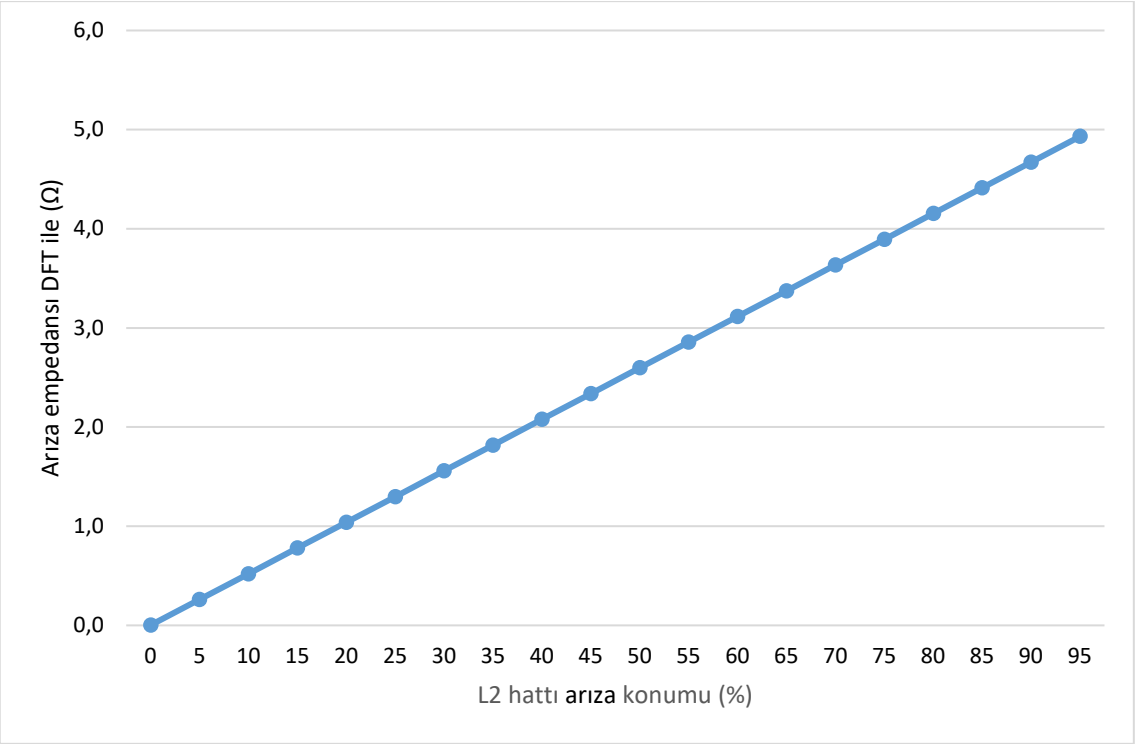
5.3 Tek Faz-Toprak Arızası Sonuçları

Ölçülen arıza empedansı toplam arıza empedansından çok daha küçüktür. Mesafe rölesi düşük erişim durumunda kalır ve DFT değerlerinde görüldüğü gibi faz-toprak arızaları için başarılı bir değer sunar, empedans değerleri arıza konumuna göre doğrusal değişim gösterir.

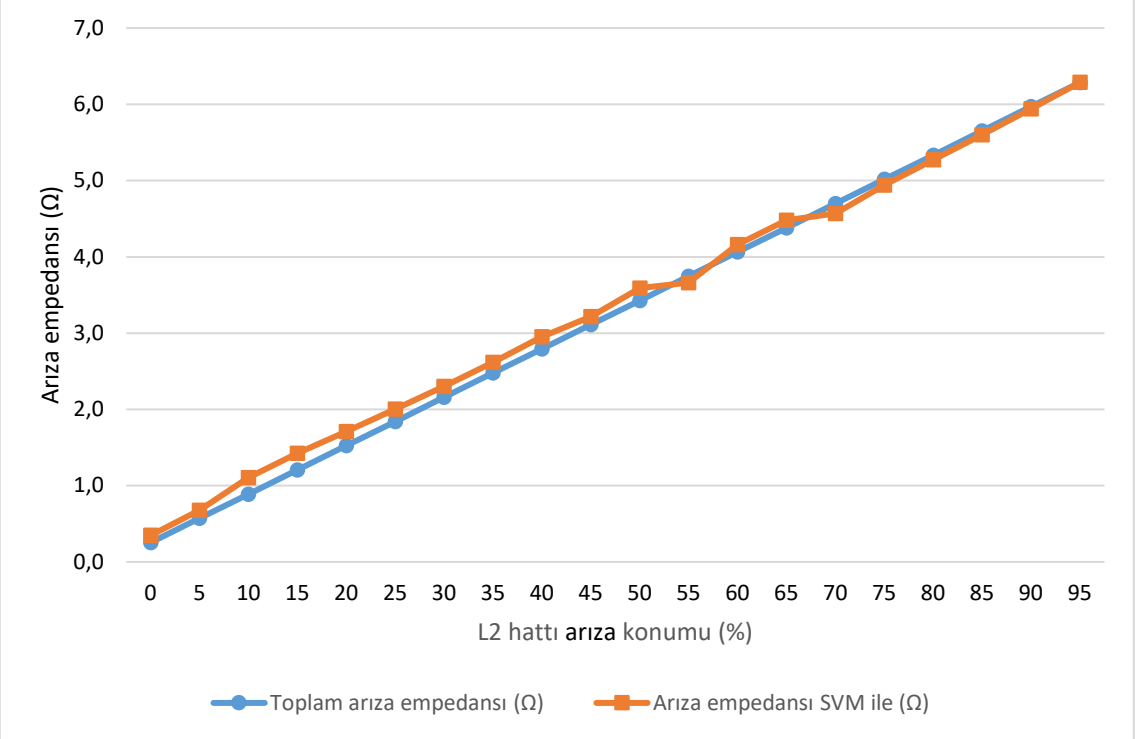
SVM metodu ile hesaplanan arıza empedansı, olması beklenen toplam arıza empedans değerine yakın sonuçlar verir. Hata değeri algoritmanın öğrenme adımları ile düşmektedir. Modelde ilk beş arıza (%0-20) öğrenim için kullanılmıştır kullanılmış, doğruluk hesabına dahil edilmemiştir. Bu koşullarda faz-toprak arızaları için ortalama doğruluk %96,7'dir.

Tablo 5.1 Tek faz-toprak arızaları için empedans-arıza konumu

L2 hattı arıza konumu (%)	L2 hat empedansı (Ω)	Arıza empedansı DFT ile (Ω)	Toplam arıza empedansı (Ω)	Arıza empedansı SVM ile (Ω)	Hata (%)
0	0	0,0027	0,2540	0,3490	37,3784
5	0,3157	0,2598	0,5715	0,6798	18,9357
10	0,6314	0,5195	0,8890	1,1041	24,1944
15	0,9471	0,7792	1,2066	1,4268	18,2560
20	1,2628	1,0389	1,5241	1,7117	12,3135
25	1,5785	1,2985	1,8416	2,0043	8,8323
30	1,8942	1,5581	2,1591	2,3032	6,6731
35	2,2099	1,8178	2,4766	2,6151	5,5898
40	2,5256	2,0773	2,7941	2,9511	5,6157
45	2,8413	2,3369	3,1117	3,2157	3,3448
50	3,157	2,5974	3,4292	3,5906	4,7084
55	3,4727	2,8559	3,7467	3,6640	2,2060
60	3,7884	3,1147	4,0642	4,1621	2,4094
65	4,1041	3,3747	4,3817	4,4824	2,2975
70	4,4198	3,6343	4,6992	4,5705	2,7392
75	4,7355	3,8939	5,0168	4,9431	1,4680
80	5,0512	4,1533	5,3343	5,2740	1,1310
85	5,3669	4,4127	5,6518	5,6021	0,8800
90	5,6826	4,6721	5,9693	5,9407	0,4790
95	5,9983	4,9314	6,2868	6,2881	0,0196



Şekil 5.3 Tek faz-toprak arızaları için arıza empedansı DFT ile-arıza konumu



Şekil 5.4 Tek faz-toprak arızaları için arıza empedansı ve arıza empedansı SVM ile-arıza konumu

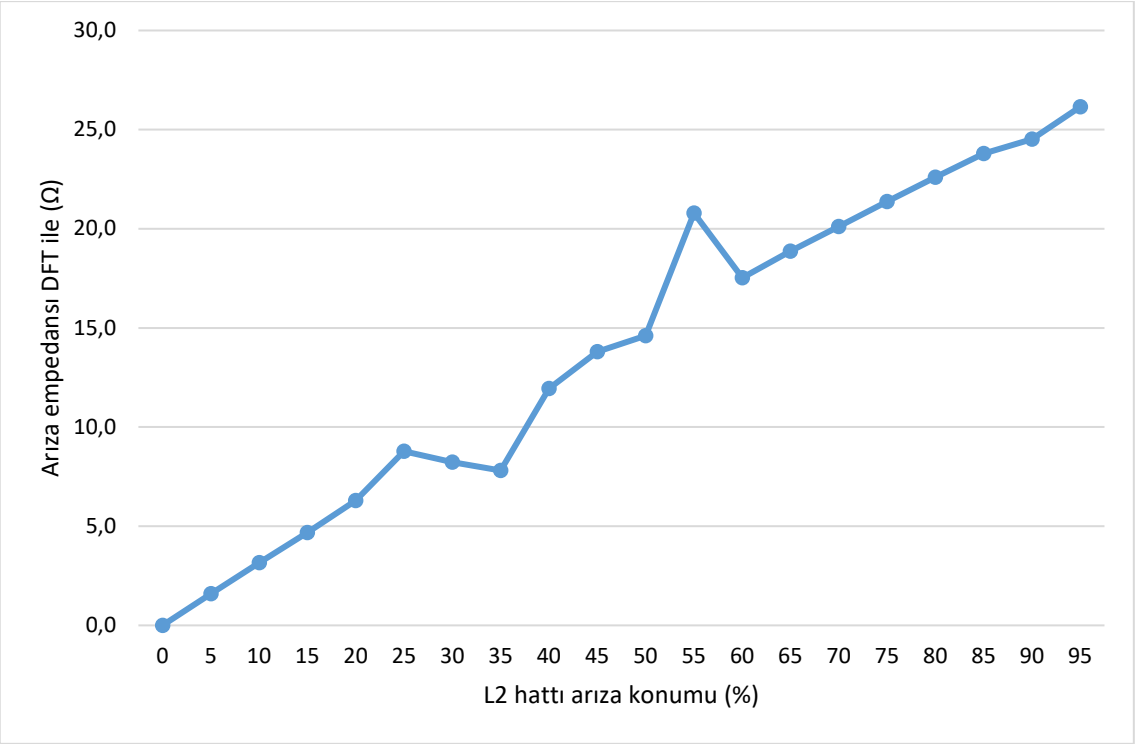
5.4 Faz-Faz Arızası Sonuçları

Röle tarafından ölçülen arıza empedansı toplam arıza empedansından çok daha büyüktür. Faz-faz arızası rölenin aşırı erişimine neden olur. Uzak besleme nedeniyle DFT ile faz mesafe elemanı, hatta bir PV santral bağlıysa başarılı sonuçlar vermez, empedans değişiminin doğrusallığının bozulduğu görülmektedir. Arıza konumu kaynaktan uzaklaştıkça empedans sorunu daha da kötüleşmektedir.

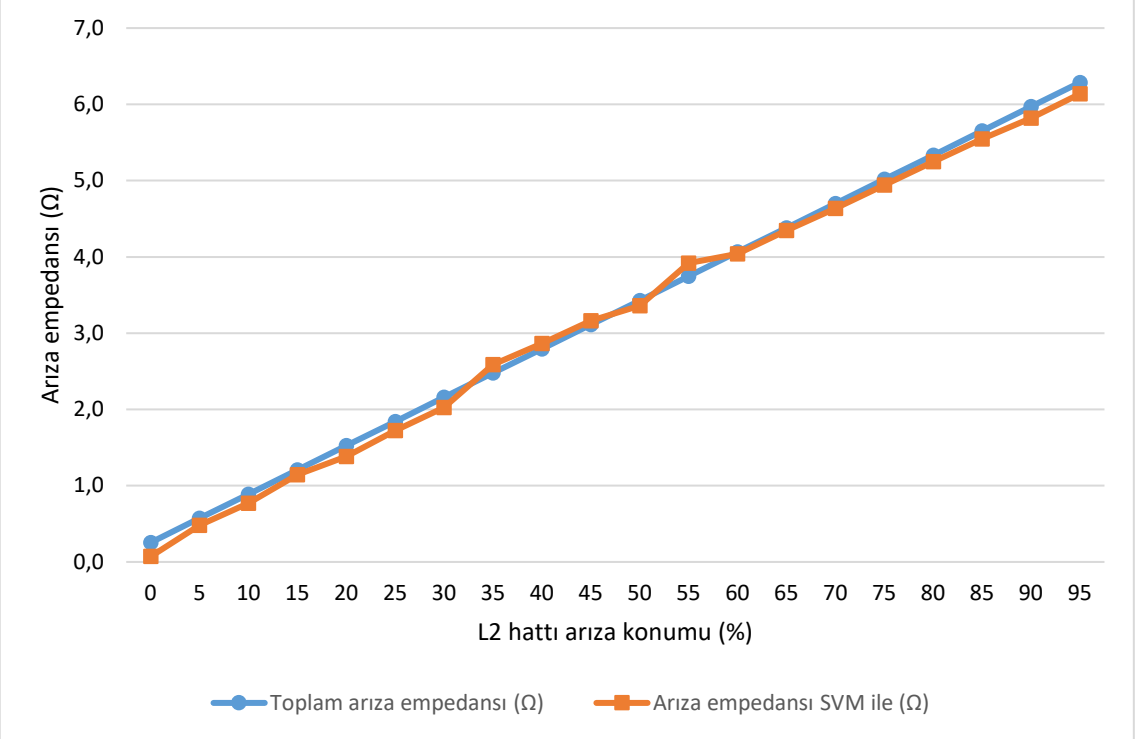
SVM metodu ile hesaplanan arıza empedansı, olması beklenen toplam arıza empedans değerine yakın sonuçlar verir. Modelde ilk beş arıza (%0-20) öğrenim için kullanılmış, doğruluk hesabına dahil edilmemiştir. Bu koşullarda faz-faz arızaları için ortalama doğruluk %97,3'tür.

Tablo 5.2 Faz-faz arızaları için empedans-arıza konumu

L2 hattı arıza konumu (%)	L2 hat empedansı (Ω)	Arıza empedansı DFT ile (Ω)	Toplam arıza empedansı (Ω)	Arıza empedansı SVM ile (Ω)	Hata (%)
0	0	0,0012	0,2540	0,0713	71,9167
5	0,3157	1,5974	0,5715	0,4794	16,1151
10	0,6314	3,1547	0,8890	0,7709	13,2886
15	0,9471	4,6746	1,2066	1,1436	5,2183
20	1,2628	6,2892	1,5241	1,3839	9,1951
25	1,5785	8,7853	1,8416	1,7226	6,4638
30	1,8942	8,2242	2,1591	2,0268	6,1299
35	2,2099	7,8073	2,4766	2,5860	4,4175
40	2,5256	11,9504	2,7941	2,8653	2,5453
45	2,8413	13,7992	3,1117	3,1618	1,6106
50	3,157	14,6038	3,4292	3,3607	1,9978
55	3,4727	20,7931	3,7467	3,9177	4,5630
60	3,7884	17,5354	4,0642	4,0382	0,6396
65	4,1041	18,8662	4,3817	4,3444	0,8519
70	4,4198	20,1189	4,6992	4,6367	1,3300
75	4,7355	21,3733	5,0168	4,9437	1,4558
80	5,0512	22,5914	5,3343	5,2492	1,5951
85	5,3669	23,7933	5,6518	5,5455	1,8814
90	5,6826	24,5139	5,9693	5,8180	2,5349
95	5,9983	26,1534	6,2868	6,1380	2,3678



Şekil 5.5 Faz-faz arızaları için arıza empedansı DFT ile-arıza konumu



Şekil 5.6 Faz-faz arızaları için arıza empedansı ve arıza empedans SVM ile-arıza konumu

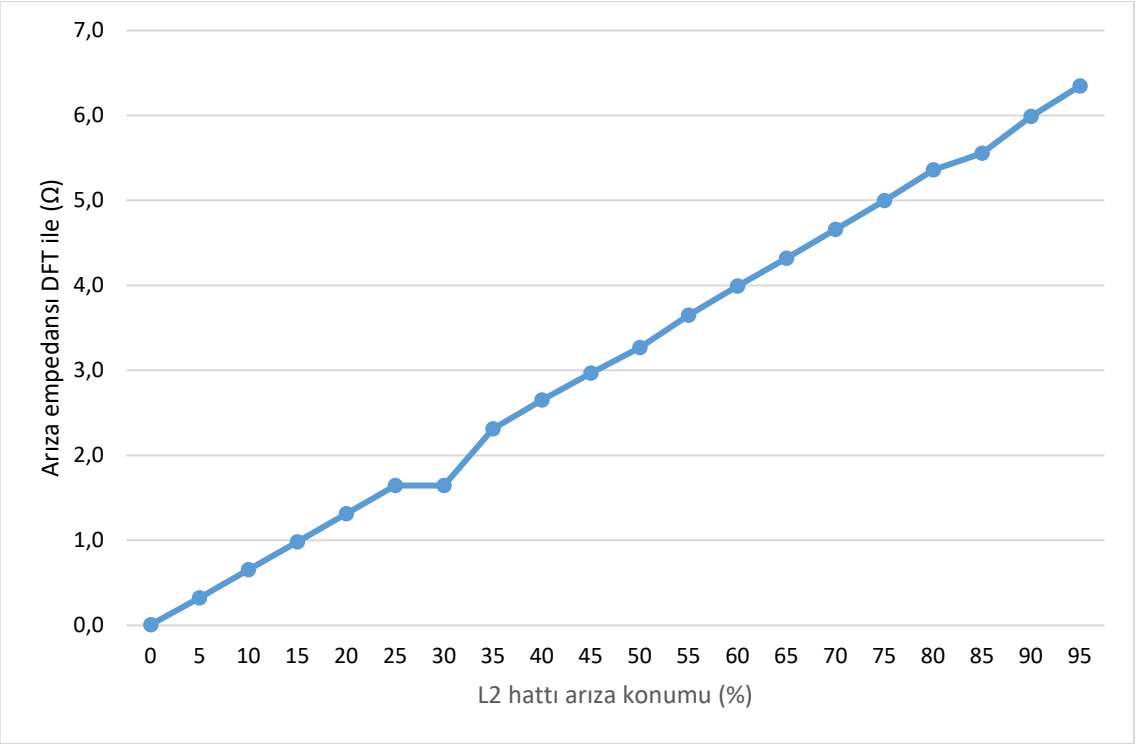
5.5 Üç-Faz Arızası Sonuçları

Üç-fazlı arızalarda DFT kullanılarak hesaplanan arıza empedansı toplam arıza empedansına oldukça yaklaşır, empedans değişimindeki doğrusallık az miktarda bozulmaktadır. Sıfır bileşen akımının olmaması nedeniyle PV güç santrali üç-faz arızalardan daha az etkilenmektedir.

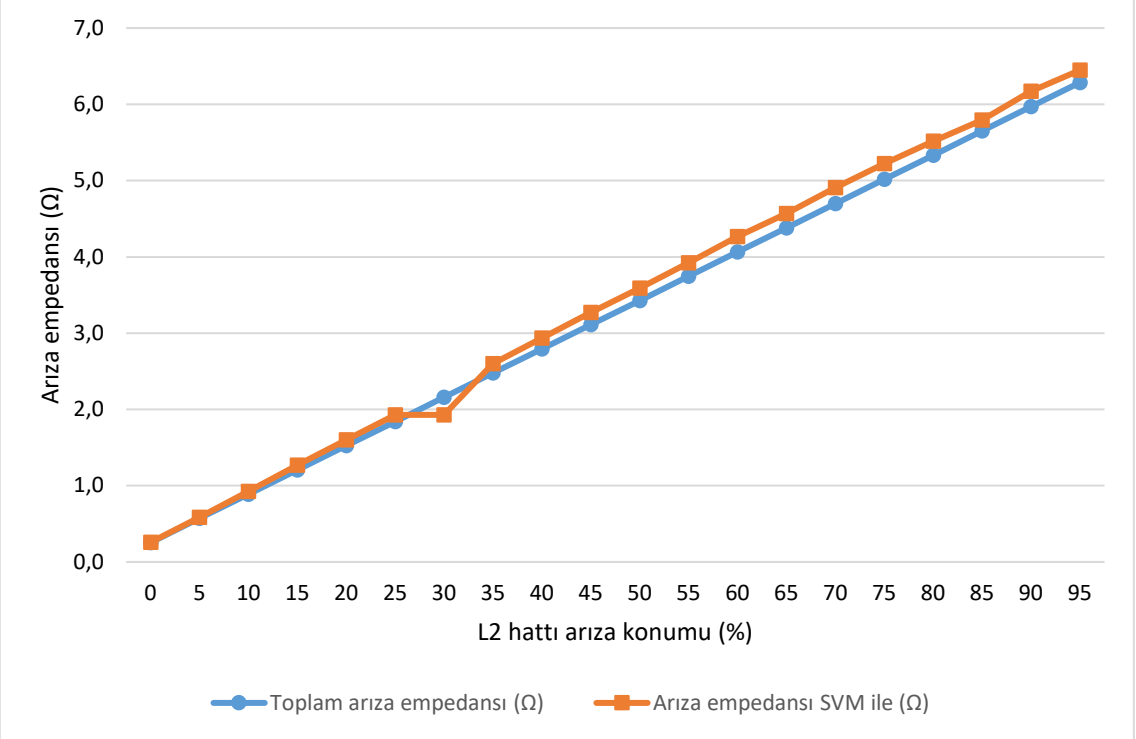
Üç-faz kısa devre arızalarında SVM metodunun koruma performansına etkisi artmaktadır. Modelde ilk beş arıza (%0-20) öğrenim için kullanılmış, doğruluk hesabına dahil edilmemiştir. Bu koşullarda ortalama doğruluk üç-faz arızalarda %95,3'e erişmektedir.

Tablo 5.3 Üç-faz arızaları için empedans-arıza konumu

L2 hattı arıza konumu (%)	L2 hat empedansı (Ω)	Arıza empedansı DFT ile (Ω)	Toplam arıza empedansı (Ω)	Arıza empedansı SVM ile (Ω)	Hata (%)
0	0	0,0081	0,2540	0,2579	1,5324
5	0,3157	0,3251	0,5715	0,5871	2,7262
10	0,6314	0,6529	0,8890	0,9269	4,2522
15	0,9471	0,9822	1,2066	1,2692	5,1880
20	1,2628	1,3135	1,5241	1,5994	4,9431
25	1,5785	1,6455	1,8416	1,9290	4,7465
30	1,8942	1,6455	2,1591	1,9290	10,6574
35	2,2099	2,3127	2,4766	2,6014	5,0373
40	2,5256	2,6509	2,7941	2,9364	5,0926
45	2,8413	2,9681	3,1117	3,2707	5,1121
50	3,157	3,2707	3,4292	3,5896	4,6766
55	3,4727	3,6508	3,7467	3,9211	4,6543
60	3,7884	3,9929	4,0642	4,2647	4,9341
65	4,1041	4,3215	4,3817	4,5687	4,2667
70	4,4198	4,6578	4,6992	4,9079	4,4406
75	4,7355	4,9997	5,0168	5,2257	4,1654
80	5,0512	5,3587	5,3343	5,5168	3,4210
85	5,3669	5,5544	5,6518	5,7932	2,5018
90	5,6826	5,9883	5,9693	6,1728	3,4096
95	5,9983	6,3483	6,2868	6,4490	2,5789



Şekil 5.7 Üç-faz arızaları için arıza empedansı DFT ile-arıza konumu



Şekil 5.8 Üç-faz arızaları için arıza empedansı ve arıza empedansı SVM ile-arıza konumu

6
SONUÇ

Mesafe röleleri, senkron generatörler gibi döner makinalar içeren elektrik santralleri tarafından beslenen elektrik güç sistemlerinde iletim hatlarının korunması için uzun yıllardır güvenle kullanılan başlıca koruma röleleridir. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde yenilebilir enerji kaynaklarının elektrik üretim sistemlerindeki payının artmasıyla birlikte klasik koruma yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Elektrik güç sisteminin geleneksel kaynak olarak tabir edilen senkron generatörler içeren elektrik santrallerine ilaveten zayıf kaynak olarak tanımlanan güneş enerjisine dayalı PV kaynaklar ile beslenmesi halinde iletim hatlarının mesafe röleleri ile korunması durumunda klasik algoritmalara göre çalışan mesafe röleleri arıza empedansını hatalı hesaplamakta ve yeterli koruma gerçekleşmemektedir. Bu tez çalışmasında zayıf kaynak besleme koşulları altında mesafe rölesinin arıza empedansını doğru hesaplaması için destek vektör makinaları (SVM) yardımıyla mesafe koruma röleleri için yeni bir empedans hesaplama yöntemi geliştirilmiştir.

Benzetim çalışmasında geleneksel kaynak ve PV kaynaklarla beslenen güç sistemi modeli gerçek veriler kullanılarak oluşturulmuş, bu modeldeki enerji iletim hattında kısa devre arızalarının benzetimi yapılmıştır. Geleneksel kaynak ve paralel hattaki PV kaynakla beslenen bitişikteki enerji iletim hattında meydana gelen arızalar, mesafe koruma rölesinin 2. kademesine kısmen, 3. kademesine tam olarak dahil olmaktadır. Bu kademede arızayı gören röle gecikmeli açma yapacağı için zaman koordinasyonuyla yanlış açmanın önüne geçilebilmektedir. Ancak arızanın süresinin mesafe rölesinin ayarlandığı zaman gecikmesinden daha uzun olması halinde mesafe rölesinin kesiciye yanlış açma yaptırmasının önüne geçilememektedir. PV kaynağa bağlı hatta ait mesafe koruma rölesinden, komşu hatta meydana gelen bir arızada zayıf kaynak besleme etkisi nedeniyle doğru empedans yanıtı alınamayacaktır. Komşu hattaki arızanın doğru tespit edilebilmesi için mesafe koruma rölesinin ölçümlediği empedans değerinin hattın gerçek empedans değerine erişmesi gerekmektedir. Arıza koşullarında alınan ölçüm değerlerini kullanarak klasik mesafe koruma empedans hesabı yöntemiyle hesaplanan empedans değerinin gerçek arıza empedans değerinden farklı olması nedeniyle rölenin istenilen yanıtı vermesi için arızayı öğrenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bunu sağlamak için

mesafe rölesi tarafından hesaplanan empedans değerlerinin doğruluğunun önerilen yöntemle iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Kaynak olarak PV güç santralinin de bulunduğu güç sistemi modelinde mesafe koruma rölesi tarafından ölçümlenen akım ve gerilim büyüklükleri, fazörleri elde etmek için DFT ile ön işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemle elde edilen üç fazlı akım ve gerilim fazörlerinin temel bileşenleri empedans hesabında kullanılmıştır. Arıza empedansının doğru tespiti için, önerilen yöntemle güç sistemi benzetim modeli üzerinden ölçümlenen akım, gerilim değerleri ve hesaplanan empedans değerleri SVM yöntemiyle empedans hesabında kullanılmıştır. Empedans hesabında kullanılan çoklu parametreli bu yöntem çözüme yeni bir yaklaşım getirmektedir.

Güç sistemlerinde PV güç santrallerinin zayıf kaynak besleme etkisinden kaynaklanan mesafe rölelerinin hatalı çalışmasını analiz etmek için geliştirilen modelle üç farklı arıza türü incelenmiştir. DFT fazörleri ile klasik empedans hesaplaması zayıf kaynak besleme koşullarında, faz-toprak arızalarında düşük menzile, faz-faz arızalarında aşırı menzile düşmektedir. Geleneksel mesafe rölelerinin bu durumda benzetim çalışmasındaki örnek sistemdeki L2 hattındaki 2. ve 3. kademelerdeki arızaları sağlıklı tespit edemediği gözlenmiştir. Benzetim çalışmasında, arıza empedansı, mesafe koruma rölesinin doğru empedansı tespit edebilmesi için PV güç santrali tarafından beslenen bitişik bir iletim hattındaki arızalarda önerilen SVM yöntemiyle yeniden hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen sonuçlar, farklı arıza türleri için %95,3 ile %97,3 arasında bir başarım değerine erişmiştir.

Bu tez çalışmasında güç sistemine bağlı PV santraliyle beslenen iletim sistemlerindeki arızalar için SVM makine öğrenmesi yöntemiyle güçlendirilmiş mesafe koruma empedans hesabının performansı incelenmiştir. Sonuçlar, SVM ile geliştirilen mesafe koruma empedans hesabı yönteminin, PV santral entegrasyonu ile dönüşüm geçiren iletim sisteminin korunması için oldukça etkili ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Önerilen mesafe koruma metodu, farklı arıza konumlarında ve arıza tiplerinde yüksek başarımla çalışmaktadır. Problem çözüm metodolojisi, klasik empedans hesaplamalarından daha iyi ve daha kesin bir sonuç vermektedir.

Sonraki çalışmalar için ark dirençlerinin de dahil edildiği farklı arıza dirençleri de göz önüne alınarak bu çalışmada geliştirilen mesafe koruma rölesi empedans hesaplama yönteminin yanıtının incelenmesi önerilir. İleriki çalışmalar için geliştirilen yöntemle bir

PV güç santrali ile beslenen bitişik iletim hatları üzerinde adaptif mesafe koruma uygulamasının yapılması korunacak hattın güvenilirliğini artıracaktır.

KAYNAKÇA

[1] V. Kumar, A. S. Pandey, and S. K. Sinha, "Grid integration and power quality issues of wind and solar energy system: A review," in 2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), Sultanpur, India, Mar. 2016, pp. 71–80, doi: 10.1109/ICETEESES.2016.7581355.

[2] D. V. Terlip, B. Kroposki, and D. Maksimovic, "A methodology for characterizing and modeling inverters for grid integration studies using Power Hardware-in-the-Loop," in 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, Jul. 2012, pp. 1–5, doi: 10.1109/PESGM.2012.6344955.

[3] A. Ferrero, A. P. Morando, R. Ottoboni, and G. Superti-Furga, "On the meaning of the park power components in three-phase systems under non-sinusoidal conditions," Euro. Trans. Electr. Power, vol. 3, no. 1, pp. 33–43, Sep. 2007, doi: 10.1002/etep.4450030107.

[4] C. Bajracharya and M. Molinas, "Understanding of tuning techniques of converter controllers for VSC-HVDC," p. 8.

[5] E. P. Weichmann, P. D. Ziogas, and V. R. Stefanovic, "Generalized Functional Model for Three-Phase PWM Inverter/Rectifier Converters," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. IA-23, no. 2, pp. 236–246, Mar. 1987, doi: 10.1109/TIA.1987.4504898.

[6] P. P. Dash and M. Kazerani, "Dynamic Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected Current-Source Inverter-Based Photovoltaic System," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 2, no. 4, pp. 443–450, Oct. 2011, doi: 10.1109/TSTE.2011.2149551.

[7] P. Paikray, S. C. Swain, R. Dash, and P. C. Panda, "A review on current control techniques for inverter for three phase grid connected renewable sources," in 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore, Apr. 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/IPACT.2017.8245203.

[8] Faa-Jeng Lin and Kuang-Chin Lu, "Power control of single-stage three-phase grid-tied photovoltaic system during grid faults using recurrent fuzzy cerebellar model articulation controller," in 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), Kaohsiung, Taiwan, Jun. 2017, pp. 716–721, doi: 10.1109/IFEEC.2017.7992127.

[9] "Elektrik Şebeke Yönetmeliği." mevzuat.gov.tr, Mar. 2020, [Online]. Available: mevzuat.gov.tr.

[10] J. Jia, G. Yang, and A. H. Nielsen, "A Review on Grid-Connected Converter Control for Short-Circuit Power Provision Under Grid Unbalanced Faults," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 649–661, Apr. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2682164.

[11] Y. Liu, D. Zhao, L. Zhang, M. Qian, L. Ge, and L. Yang, "Liu - Analysis and Simulation Tools for Short Circuit Dynamic Characteristics of Photovoltaic Power Plants," p. 6.

[12] E. Muljadi, M. Singh, R. Bravo, and V. Gevorgian, “Dynamic Model Validation of PV Inverters under Short-Circuit Conditions,” in 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Denver, CO, Apr. 2013, pp. 98–104, doi: 10.1109/GreenTech.2013.23.

[13] D. Turcotte and F. Katiraei, “Fault contribution of grid-connected inverters,” in 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), Montreal, QC, Canada, Oct. 2009, pp. 1–5, doi: 10.1109/EPEC.2009.5420365.

[14] “IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations,” IEEE Std C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996, pp. 1–48, Oct. 2008, doi: 10.1109/IEEESTD.2008.4639522.

[15] T. Neumann and I. Erlich, “Short Circuit Current Contribution of a Photovoltaic Power Plant,” IFAC Proceedings Volumes, vol. 45, no. 21, pp. 343–348, 2012, doi: 10.3182/20120902-4-FR-2032.00061.

[16] L. Wieserman and T. E. McDermott, “Fault current and overvoltage calculations for inverter-based generation using symmetrical components,” in 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, Sep. 2014, pp. 2619–2624, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953752.

[17] S. Liu, T. Bi, and Y. Liu, “Theoretical Analysis on the Short-Circuit Current of Inverter-Interfaced Renewable Energy Generators with Fault-Ride-Through Capability,” Sustainability, vol. 10, no. 2, p. 44, Dec. 2017, doi: 10.3390/su10010044.

[18] F. Katiraei et al., “Investigation of Solar PV Inverters Current Contributions during Faults on Distribution and Transmission Systems Interruption Capacity,” p. 7.

[19] M. Khoddam and Hosein Kazemi Karegar, “Effect of wind turbines equipped with doubly-fed induction generators on distance protection,” in 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China, Oct. 2011, pp. 1349–1353, doi: 10.1109/APAP.2011.6180588.

[20] A. K. Pradhan and G. Jos, “Adaptive Distance Relay Setting for Lines Connecting Wind Farms,” IEEE Trans. On Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 206–213, Mar. 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.889621.

[21] H. Rastegar and A. Khansaryan, “A New Method for Adaptive Distance Relay Setting in the Presence of SSSC using Neural Networks,” in 2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, May 2006, pp. 1–8, doi: 10.1109/ICIEA.2006.257122.

[22] N. E. Naily, Saad. M. Saad, Reda. E. Elsayed, Safaa. A. Aomura, and F. A. Mohamed, “Planning & application of distance relays coordination for IEC microgrid considering intermediate in-feed factor,” in 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Mar. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/IREC.2018.8362499.

[23] R. I. A. Lúcio, “Behavior of Distance Protections near Wind Farms,” p. 8.

[24] G. Belchior, “Protective Relay Coordination of High Voltage Power Systems with Renewable Generation,” p. 6.

[25] J. M. Dewadasa, A. Ghosh, and G. Ledwich, “Distance Protection Solution for a Converter Controlled Microgrid,” p. 6, 2008.

[26] M. Dewadasa, A. Ghosh, and G. Ledwich, “Line Protection in Inverter Supplied Networks,” Australasian Universities Power Engineering Conference, p. 6, 2008.

[27] D. Uthitsunthorn and T. Kulworawanichpong, “Distance protection of a renewable energy plant in electric power distribution systems,” in 2010 International Conference on Power System Technology, Zhejiang, Zhejiang, China, Oct. 2010, pp. 1–6, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666058.

[28] Y. Fang, K. Jia, Z. Yang, Y. Li, and T. Bi, “Impact of Inverter-Interfaced Renewable Energy Generators on Distance Protection and an Improved Scheme,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 9, pp. 7078–7088, Sep. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2873521.

[29] K. Jia, C. Gu, Z. Xuan, L. Li, and Y. Lin, “Fault Characteristics Analysis and Line Protection Design Within a Large-Scale Photovoltaic Power Plant,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 4099–4108, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2648879.

[30] M. Sun, H. Wang, and X. Zhu, “Fault Characteristics of Photolvoltaic Power Station and Its Influence on Relay Protection of Transmission Line,” p. 5.

[31] Shengshi Zhu, Yibao Xing, and Fenghai Sui, “Fault component reactance relay,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1292–1300, Jul. 1996, doi: 10.1109/61.517483.

[32] Liang, Xu, Zha, and Wang, “Adaptability Analysis of Fault Component Distance Protection on Transmission Lines Connected to Photovoltaic Power Stations,” Energies, vol. 12, no. 8, p. 1578, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081578.

[33] A. Hooshyar, M. A. Azzouz, and E. F. El-Saadany, “Distance Protection of Lines Emanating From Full-Scale Converter-Interfaced Renewable Energy Power Plants—Part I: Problem Statement,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 30, no. 4, pp. 1770–1780, Aug. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2369479.

[34] A. Hooshyar, M. A. Azzouz, and E. F. El-Saadany, “Distance Protection of Lines Emanating From Full-Scale Converter-Interfaced Renewable Energy Power Plants—Part II: Solution Description and Evaluation,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 30, no. 4, pp. 1781–1791, Aug. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2369480.

[35] Khaparde, “An Adaptive Approach in Distance Protection Using an Artificial Neural Network” 1996.

[36] Yadav, A., Dash, Y. 2014. "An Overview of Transmission Line Protection by Artificial Neural Network: Fault Detection, Fault Classification, Fault Location, and Fault Direction Discrimination". Advances in Artificial Neural Systems, 2014, 1-20.

[37] H. Mahajan and A. Sharma, “Various Techniques used for Protection of Transmission Line- A Review,” International Journal of Innovations in Engineering and Technology, vol. 3, no. 4, p. 8, 2014.

[38] M. M. Rao and P. M. Deoghare, “A Novel Approach for Transmission Line Protection Using Wavelet Transform and Neural Network,” Control and Automation, vol. 1, no. 2, p. 7, 2011.

[39] P. Ray, D. P. Mishra, K. Dey, and P. Mishra, “Fault Detection and Classification of a Transmission Line Using Discrete Wavelet Transform & Artificial Neural Network,” in 2017 International Conference on Information Technology (ICIT), Bhubaneswar, Dec. 2017, pp. 178–183. doi: 10.1109/ICIT.2017.24.

[40] A. Abdullah, “Ultrafast Transmission Line Fault Detection Using a DWT-Based ANN,” IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 54, no. 2, pp. 1182–1193, Mar. 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2774202.

[41] N. George, P. Surajnath, O. D. Naidu, and P. Yalla, “Machine Learning Based Setting-free Reach Element For Zone-1 Distance Protection,” in 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), Jaipur, India, Dec. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPS48983.2019.9067658.

[42] Ch. D. Prasad, M. Biswal, and P. K. Nayak, “Wavelet operated single index based fault detection scheme for transmission line protection with swarm intelligent support,” Energy Syst, Dec. 2019, doi: 10.1007/s12667-019-00373-9.

[43] J. Klomjit and A. Ngaopitakkul, “Comparison of Artificial Intelligence Methods for Fault Classification of the 115-kV Hybrid Transmission System,” Applied Sciences, vol. 10, no. 11, p. 3967, Jun. 2020, doi: 10.3390/app10113967.

[44] S. R. Samantaray, P. K. Dash, and G. Panda, “Distance relaying for transmission line using support vector machine and radial basis function neural network,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 29, no. 7, pp. 551–556, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.ijepes.2007.01.007.

[45] S. Ekici, “Support Vector Machines for classification and locating faults on transmission lines,” Applied Soft Computing, vol. 12, no. 6, pp. 1650–1658, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.asoc.2012.02.011.

[46] H. Fathabadi, “Novel filter based ANN approach for short-circuit faults detection, classification and location in power transmission lines,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 74, pp. 374–383, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.08.005.

[47] N. Ramesh Babu and B. Jagan Mohan, “Fault classification in power systems using EMD and SVM,” Ain Shams Engineering Journal, vol. 8, no. 2, pp. 103–111, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.asej.2015.08.005.

[48] S. Budak and B. Akbal, “Karma İletim Hatlarında Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanarak Hata Yeri Tahmini,” European Journal of Science and Technology, Oct. 2020, doi: 10.31590/ejosat.802888.

[49] Kulikov, A.; Loskutov, A.; Bezdushniy, D. “Relay Protection and Automation Algorithms of Electrical Networks Based on Simulation and Machine Learning Methods”. Energies 2022, 15, 6525.

[50] Shah, H.; Chothani, N.; Chakravorty, J. “Fault Detection and Classification in Interconnected System with Wind Generation Using ANN and SVM”. AEEE 2022, 20, 225–239.

[51] Sriram, C.; Somlal, J. “IM-DWT with DNN Based Blocking Scheme of Third Zone Distance Relay in Power Swing Condition” Smart Science 2022, pp. 1–20.

[52] Srivastava, A.; Parida, S.K. “A Robust Fault Detection and Location Prediction Module Using Support Vector Machine and Gaussian Process Regression for AC Microgrid” IEEE Trans. on Ind. Appl. 2022, 58, 930–939.

[53] IEEE, “IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems” Std. 37.111-1999

[54] Modern Distance Protection: Functions and Applications. Paris: CIGRÉ, 2008.

[55] Warrington, A. R., and C. Van. "Reactance Relays Negligibly Affected by Arc Impedance." Electrical World 98, no. 12 (1931): 502-505

[56] S. Ray, "A Quick Review of Machine Learning Algorithms," 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon), Faridabad, India, 2019, pp. 35-39, doi: 10.1109/COMITCon.2019.8862451

[57] Yoldaş, Yaşar Beyazıt, and Yumurtacı, Recep. 2023. "Improvement of Distance Protection with SVM on PV-Fed Transmission Lines in Infeed Conditions" Energies 16, no. 6: 2587. https://doi.org/10.3390/en16062587

[58] Zanatta, Nicolo, “Active Power Control of a PV Generator for Large Scale Photovoltaic Power Plant” 2017

A
EK

```
format shortg ;

fsig = 50 ; T=1/fsig;

N = 20 ;

fs = N * fsig ;

dt = 1/fs ;


load comtrade.mat

%% Comtrade read constants for current data from *.cfg file

fs = N * fsig ;

cfg_cell = fopen('file.cfg');

        C = textscan(cfg_cell, '%t');

        fclose(cfg_cell);

cfg_table = [C{:}] ;

IL1 = cfg_table(10,1) ;

IL2 = cfg_table(11,1) ;

IL3 = cfg_table(12,1) ;

UL1 = cfg_table(14,1) ;

UL2 = cfg_table(15,1) ;

UL3 = cfg_table(16,1) ;

IL1_cfg = IL1{1,1} ;

IL2_cfg = IL2{1,1} ;

IL3_cfg = IL3{1,1} ;

UL1_cfg = UL1{1,1} ;
```

```
UL2_cfg = UL2{1,1} ;

UL3_cfg = UL3{1,1} ;


IL1_cfg_a = IL1_cfg(1,12:35) ;

IL1_cfg_b = IL1_cfg(1,37:60) ;

IL2_cfg_a = IL2_cfg(1,12:35) ;

IL2_cfg_b = IL2_cfg(1,37:60) ;

IL3_cfg_a = IL3_cfg(1,12:35) ;

IL3_cfg_b = IL3_cfg(1,37:60) ;

UL1_cfg_a = UL1_cfg(1,12:35) ;

UL1_cfg_b = UL1_cfg(1,37:60) ;

UL2_cfg_a = UL2_cfg(1,12:35) ;

UL2_cfg_b = UL2_cfg(1,37:60) ;

UL3_cfg_a = UL3_cfg(1,12:35) ;

UL3_cfg_b = UL3_cfg(1,37:60) ;


IL1_cfg_aa = str2num(IL1_cfg_a) ;

IL1_cfg_bb = str2num(IL1_cfg_b) ;

IL2_cfg_aa = str2num(IL2_cfg_a) ;

IL2_cfg_bb = str2num(IL2_cfg_b) ;

IL3_cfg_aa = str2num(IL3_cfg_a) ;

IL3_cfg_bb = str2num(IL3_cfg_b) ;

UL1_cfg_aa = str2num(UL1_cfg_a) ;

UL1_cfg_bb = str2num(UL1_cfg_b) ;

UL2_cfg_aa = str2num(UL2_cfg_a) ;

UL2_cfg_bb = str2num(UL2_cfg_b) ;

UL3_cfg_aa = str2num(UL3_cfg_a) ;
```

```
UL3_cfg_bb = str2num(UL3_cfg_b) ;

%% Comtrade read time data
timedata = comtrade(:,1)' ; %Get time values from table
t_begin = timedata(1)/1000 ;
t_end = timedata(end)/1000 ;

%% Comtrade read current data
IL1_sec = comtrade(:,3)' ; %Get current values from table
IL2_sec = comtrade(:,4)' ;
IL3_sec = comtrade(:,5)' ;
UL1_sec = comtrade(:,7)' ;
UL2_sec = comtrade(:,8)' ;
UL3_sec = comtrade(:,9)' ;

%% Select sample numbers
Num_start = 200 ;
Num_end = 360 ;

IL1_sec_begin = IL1_sec(1) ; %
IL1_sec_end = IL1_sec(end) ; %
IL1_sec = (IL1_sec(Num_start:Num_end )) ;
IL2_sec_begin = IL2_sec(1) ; %
IL2_sec_end = IL2_sec(end) ;
IL2_sec = (IL2_sec(Num_start:Num_end )) ;
IL3_sec_begin = IL3_sec(1) ;
IL3_sec_end = IL3_sec(end) ;
```

```
IL3_sec = (IL3_sec(Num_start:Num_end )) ;
UL1_sec_begin = UL1_sec(1) ;
UL1_sec_end = UL1_sec(end) ;
UL1_sec = (UL1_sec(Num_start:Num_end )) ;
UL2_sec_begin = UL2_sec(1) ;
UL2_sec_end = UL2_sec(end) ;
UL2_sec = (UL2_sec(Num_start:Num_end )) ;
UL3_sec_begin = UL3_sec(1) ;
UL3_sec_end = UL3_sec(end) ;
UL3_sec = (UL3_sec(Num_start:Num_end )) ;

%% Calculation of current data with constants from *.cfg file
IL1_sec = IL1_sec * IL1_cfg_aa + IL1_cfg_bb ;
IL2_sec = IL2_sec * IL2_cfg_aa + IL2_cfg_bb ;
IL3_sec = IL3_sec * IL3_cfg_aa + IL3_cfg_bb ;
UL1_sec = UL1_sec * UL1_cfg_aa + UL1_cfg_bb ;
UL2_sec = UL2_sec * UL2_cfg_aa + UL2_cfg_bb ;
UL3_sec = UL3_sec * UL3_cfg_aa + UL3_cfg_bb ;

tb1 = table([IL1_sec; IL2_sec; IL3_sec; UL1_sec; UL2_sec; UL3_sec]) ;
var_tb1 = size(tb1,1) ;
n = 0 ;
kn = 0 ;
T_end = length(IL1_sec)*dt ;
t_bas = timedata(Num_start+N)/1000 ;
t_son = timedata(Num_end)/1000 ;
t_ariza=t_bas:dt:t_son ;
```

```
for t=0:dt:(T_end-dt)
n = n+1;
x(n,:) = [IL1_sec(n); IL2_sec(n); IL3_sec(n); UL1_sec(n); UL2_sec(n); UL3_sec(n)]'
end

%---------------- DFT calculation ----------------------------
NN = length(x) - N + 1 ;
nn = 1 ;
k = 0;
X_hat2 = zeros(1,k+1) ;
  while nn<NN
for m = 0:1 % m is harmoic number 0=dc , 1 = fundamental
X1(:,m+1)= 0 ; %X(m+1,var_tb1)= 0
X2(:,m+1)= 0 ;
X3(:,m+1)= 0 ;
X4(:,m+1)= 0 ;
X5(:,m+1)= 0 ;
X6(:,m+1)= 0 ;
end

%----- Plotting of samples of signal-------------------------
subplot(3,2,1)
stem(x)
grid on
xlabel('Sample Number -->')
ylabel('Sample value')
title('Composite Signal ( discontinuity at sample no ..)')
```

```
%------------ Actual Caluculation of DFT ------------------
m = 1 ; % m=1 for Only fundamental, m=0 for DC
zz = 0;
for n=0:N-1
X1(m+1) = X1(m+1) + (x(n+k+1,1)*exp(-j*2*pi*m*n/N)) ;
X2(m+1) = X2(m+1) + (x(n+k+1,2)*exp(-j*2*pi*m*n/N)) ;
X3(m+1) = X3(m+1) + (x(n+k+1,3)*exp(-j*2*pi*m*n/N)) ;
X4(m+1) = X4(m+1) + (x(n+k+1,4)*exp(-j*2*pi*m*n/N)) ;
X5(m+1) = X5(m+1) + (x(n+k+1,5)*exp(-j*2*pi*m*n/N)) ;
X6(m+1) = X6(m+1) + (x(n+k+1,6)*exp(-j*2*pi*m*n/N)) ;
end
IL1_hat(k+1,:) = X1(2) ;
IL2_hat(k+1,:) = X2(2) ;
IL3_hat(k+1,:) = X3(2) ;
UL1_hat(k+1,:) = X4(2) ;
UL2_hat(k+1,:) = X5(2) ;
UL3_hat(k+1,:) = X6(2) ;

IL1_hat_mag = (2/N)*abs(IL1_hat) / sqrt(2) ;  %for DC calculation (1/N) %
IL1_hat_ang = angle((2/N) * IL1_hat) ;%* (180/pi) ; %
IL2_hat_mag = (2/N)*abs(IL2_hat) / sqrt(2) ;
IL2_hat_ang = angle((2/N) * IL2_hat) ;
IL3_hat_mag = (2/N)*abs(IL3_hat) / sqrt(2) ;
IL3_hat_ang = angle((2/N) * IL3_hat) ;
UL1_hat_mag = (2/N)*abs(UL1_hat) / sqrt(2) ;
UL1_hat_ang = angle((2/N) * UL1_hat) ;
```

```
UL2_hat_mag = (2/N)*abs(UL2_hat) / sqrt(2) ;

UL2_hat_ang = angle((2/N) * UL2_hat) ;

UL3_hat_mag = (2/N)*abs(UL3_hat) / sqrt(2) ;

UL3_hat_ang = angle((2/N) * UL3_hat) ;


k = k+1 ;

nn = nn+1 ;

X_hat(1)=X(1);

for k=1:20

Newest = x(N+k);

Oldest = x(k) ;

X_hat(k+1)= X_hat(k) + ( (Newest - Oldest)*(exp(-j*2*pi*k/N)));

end


% ----- Plotting of Sliding DFT -----

subplot(3,2,2)

stem(IL1_hat_mag)

grid on

xlabel('zaman (ms)')

ylabel('IA_mag')

title('A faz akimi')

subplot(3,2,3)

stem(IL1_hat_ang)

grid on

end

if (N == 1 )

X = x ;
```

```
else
xeven = x(1:2:N-1);
xodd = x(2:2:N);
WNm=exp( (-j * 2 * pi / N)*(0:(N/2)-1 ) );
Am = myFFTDIT(xeven);
Bm = myFFTDIT(xodd);
X1 = Am + Bm .* WNm;
X2 = Am - Bm .* WNm;
X = [X1 X2]
end

%% Distance relay settings
Z0 = 4.023 + 13.230i ;%4.023 + 13.230i  %
ZL = 0.899 + 4.449i ;%0.899 + 4.449i %
Z0_sek = Z0
ZL_sek = ZL

%% Relay internal calculation
V = UL1_hat_mag
I = IL1_hat_mag
Ea = ((UL1_hat_mag).*exp(j*UL1_hat_ang*pi/180)) ; %/ VT ;
Eb = ((UL2_hat_mag).*exp(j*UL2_hat_ang*pi/180)) ; %/ VT ;
Ec = ((UL3_hat_mag).*exp(j*UL3_hat_ang*pi/180)) ; %/ VT ;
Ia = ((IL1_hat_mag).*exp(j*IL1_hat_ang*pi/180)) ; %/ CT ;
Ib = ((IL2_hat_mag).*exp(j*IL2_hat_ang*pi/180)) ; %/ CT ;
Ic = ((IL3_hat_mag).*exp(j*IL3_hat_ang*pi/180)) ; %/ CT ;
Ie = -(3/3) * (Ia + Ib + Ic) ;
```

```
ke = (1/3) * ((Z0_sek/ZL_sek)-1) ; % For Siemens relays k0 = ZE/ZL = (1/3)*(Z0/ZL - 1)


disp('1 phase-ground fault')
%{
Za_1ph = (Ea) / (Ia-ke*Ie) ;
Zb_1ph = (Eb) / (Ib-ke*Ie) ;
Zc_1ph = (Ec) / (Ic-ke*Ie) ;
Ra_1ph = real(Za_1ph) ;
Rb_1ph = real(Zb_1ph) ;
Rc_1ph = real(Zc_1ph) ;
Xa_1ph = imag(Za_1ph) ;
Xb_1ph = imag(Zb_1ph) ;
Xc_1ph = imag(Zc_1ph) ;
%}


%% 2 phase fault
disp('2 phase fault')
%Calculation method 1
%{
Zab_2ph = (Ea-Eb) / (Ia-Ib) ;
Zbc_2ph = (Eb-Ec) / (Ib-Ic) ;
Zac_2ph = (Ea-Ec) / (Ia-Ic) ;
Rab_2ph = real(Zab_2ph) ;
Rbc_2ph = real(Zbc_2ph) ;
Rac_2ph = real(Zac_2ph) ;
Xab_2ph = imag(Zab_2ph) ;
Xbc_2ph = imag(Zbc_2ph) ;
```

```
Xac_2ph = imag(Zac_2ph) ;
%}


%% Impedance table
Za_1ph_angle = atan(Xa_1ph/Ra_1ph)*180/pi ;
Zb_1ph_angle = atan(Xb_1ph/Rb_1ph)*180/pi ;
Zc_1ph_angle = atan(Xc_1ph/Rc_1ph)*180/pi ;
Zab_2ph_angle = atan(Xab_2ph/Rab_2ph)*180/pi ;
Zbc_2ph_angle = atan(Xbc_2ph/Rbc_2ph)*180/pi ;
Zac_2ph_angle = atan(Xac_2ph/Rac_2ph)*180/pi ;
Za_3ph_angle = atan(Xa_3ph/Ra_3ph)*180/pi ;
Zb_3ph_angle = atan(Xb_3ph/Rb_3ph)*180/pi ;
Zc_3ph_angle = atan(Xc_3ph/Rc_3ph)*180/pi ;


col = {'Z' , 'R' , 'X'} ;
row = {'' , '' , ''} ;
dat = [Za_1ph_abs Zb_1ph_abs Zc_1ph_abs ; Ra_1ph Rb_1ph Rc_1ph ; Xa_1ph Xb_1ph
Xc_1ph] ;
figure(2)
uitable('ColumnName',col,'ColumnWidth',{70 70 70
70},'RowName',row,'RowStriping','off','BackgroundColor',[1 1 1],'Position',[10 10 274
400],'Data', dat) ;
col = {'IA_dat' , 'IB_dat' , 'IC_dat' , 'VA_dat' , 'VB_dat' , 'VC_dat'} ;
row = {'' , '' , ''} ;
dat2 = [IL1_sec' IL2_sec' IL3_sec' UL1_sec' UL2_sec' UL3_sec'] ;   %; Ra_1ph Rb_1ph
Rc_1ph ; Xa_1ph Xb_1ph Xc_1ph] ;
figure(3)
```

```
uitable('ColumnName',col,'ColumnWidth',{70 70 70
70},'RowName',row,'RowStriping','off','BackgroundColor',[1 1 1],'Position',[10 10 468
400],'Data', dat2) ;
ZRX_table = { 'Z' ; 'R' ; 'X' ; 'Angle' } ;


function [trainedModel, validationRMSE] = svmquad(trainingData)
% [trainedModel, validationRMSE] = trainRegressionModel(trainingData)
% returns a trained regression model and its RMSE. This code recreates the
% model trained in Regression Learner app. Use the generated code to
% automate training the same model with new data, or to learn how to
% programmatically train models.
%
%  Input:
%      trainingData: a table containing the same predictor and response
%       columns as imported into the app.
%
%  Output:
%      trainedModel: a struct containing the trained regression model. The
%       struct contains various fields with information about the trained
%       model.
%
%      trainedModel.predictFcn: a function to make predictions on new data.
%
%      validationRMSE: a double containing the RMSE. In the app, the
%       History list displays the RMSE for each model.
%
% Use the code to train the model with new data. To retrain your model,
% call the function from the command line with your original data or new
```

```
% data as the input argument trainingData.
%
% For example, to retrain a regression model trained with the original data
% set T, enter:
%   [trainedModel, validationRMSE] = trainRegressionModel(T)
%
% To make predictions with the returned 'trainedModel' on new data T2, use
%   yfit = trainedModel.predictFcn(T2)
%
% T2 must be a table containing at least the same predictor columns as used
% during training. For details, enter:
%   trainedModel.HowToPredict


% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'VarName1', 'VarName2', 'VarName3', 'VarName4', 'VarName5',
'VarName6', 'VarName7'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.VarName8;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false, false, false, false];


% Train a regression model
% This code specifies all the model options and trains the model.
responseScale = iqr(response);
if ~isfinite(responseScale) || responseScale == 0.0
```

```
    responseScale = 1.0;
end
boxConstraint = responseScale/1.349;
epsilon = responseScale/13.49;
regressionSVM = fitrsvm(...
    predictors, ...
    response, ...
    'KernelFunction', 'polynomial', ...
    'PolynomialOrder', 2, ...
    'KernelScale', 'auto', ...
    'BoxConstraint', boxConstraint, ...
    'Epsilon', epsilon, ...
    'Standardize', true);


% Create the result struct with predict function
predictorExtractionFcn = @(t) t(:, predictorNames);
svmPredictFcn = @(x) predict(regressionSVM, x);
trainedModel.predictFcn = @(x) svmPredictFcn(predictorExtractionFcn(x));


% Add additional fields to the result struct
trainedModel.RequiredVariables = {'VarName1', 'VarName2', 'VarName3', 'VarName4',
'VarName5', 'VarName6', 'VarName7'};
trainedModel.RegressionSVM = regressionSVM;
trainedModel.About = 'This struct is a trained model exported from Regression Learner
R2018b.';
trainedModel.HowToPredict = sprintf('To make predictions on a new table, T, use: \n  yfit =
c.predictFcn(T) \nreplacing "c" with the name of the variable that is this struct, e.g.
"trainedModel". \n \nThe table, T, must contain the variables returned by: \n
```

```
c.RequiredVariables \nVariable formats (e.g. matrix/vector, datatype) must match the original training data. \nAdditional variables are ignored. \n \nFor more information, see <a href="matlab:helpview(fullfile(docroot, "stats", "stats.map"), "appregression_exportmodeltoworkspace")">How to predict using an exported model</a>.');


% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'VarName1', 'VarName2', 'VarName3', 'VarName4', 'VarName5', 'VarName6', 'VarName7'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.VarName8;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false, false, false, false];

% Perform cross-validation
KFolds = 5;
cvp = cvpartition(size(response, 1), 'KFold', KFolds);
% Initialize the predictions to the proper sizes
validationPredictions = response;
for fold = 1:KFolds
    trainingPredictors = predictors(cvp.training(fold), :);
    trainingResponse = response(cvp.training(fold), :);
    foldIsCategoricalPredictor = isCategoricalPredictor;

    % Train a regression model
    % This code specifies all the model options and trains the model.
```

```
responseScale = iqr(trainingResponse);
if ~isfinite(responseScale) || responseScale == 0.0
    responseScale = 1.0;
end
boxConstraint = responseScale/1.349;
epsilon = responseScale/13.49;
regressionSVM = fitrsvm(...
    trainingPredictors, ...
    trainingResponse, ...
    'KernelFunction', 'polynomial', ...
    'PolynomialOrder', 2, ...
    'KernelScale', 'auto', ...
    'BoxConstraint', boxConstraint, ...
    'Epsilon', epsilon, ...
    'Standardize', true);

% Create the result struct with predict function
svmPredictFcn = @(x) predict(regressionSVM, x);
validationPredictFcn = @(x) svmPredictFcn(x);

% Add additional fields to the result struct

% Compute validation predictions
validationPredictors = predictors(cvp.test(fold), :);
foldPredictions = validationPredictFcn(validationPredictors);

% Store predictions in the original order
```

```
    validationPredictions(cvp.test(fold), :) = foldPredictions;
end


% Compute validation RMSE
isNotMissing = ~isnan(validationPredictions) & ~isnan(response);
validationRMSE = sqrt(nansum(( validationPredictions - response ).^2) /
numel(response(isNotMissing) ));
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. Yoldaş, Yaşar Beyazıt, and Yumurtacı, Recep. 2023. "Improvement of Distance Protection with SVM on PV-Fed Transmission Lines in Infeed Conditions" *Energies* 16, no. 6: 2587. https://doi.org/10.3390/en16062587