KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

İLETİM SİSTEMLERİNİN MESAFE KORUMASINDA GÜÇ SALINIMLI SİMETRİK ARIZALARIN TESPİTİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

ALKIM ÇAPAR

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

İLETİM SİSTEMLERİNİN MESAFE KORUMASINDA GÜÇ SALINIMLI SİMETRİK ARIZALARIN TESPİTİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

ALKIM ÇAPAR

Prof.Dr. Ayşen BASA ARSOY **Danışman, Kocaeli Üniv.**	**.....**
Prof.Dr. Nuran YÖRÜKEREN **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	**.....**
Doç.Dr. Mehlika ŞENGÜL KARAARSLAN **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	**.....**
Prof.Dr. Mehmet BAYRAK **Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.**	**.....**
Dr.Öğr.Üyesi İbrahim Gürsu TEKDEMİR **Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniv.**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.02.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Alkım ÇAPAR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.
Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

■ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☐ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Alkım ÇAPAR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, iletim hatlarında güç salınımları durumunda arıza olaylarını incelemek ve kompanze edilmiş ve edilmemiş hatlar için güç salınımları altında mesafe rölelerinin doğru çalışmasına yardımcı bir yöntem geliştirmek amacıyla hazırlanmıştır.

Eğitim hayatım boyunca desteğini esirgemeyen hem yüksek lisans hem de doktora süresince çalışmalarıma yön veren danışmanım Prof.Dr. Ayşen BASA ARSOY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince gösterdikleri anlayış ve destek için sayın Prof. Dr. Nuran YÖRÜKEREN ve sayın Doç. Dr. Mehlika ŞENGÜL KARAARSLAN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve öğrenimim boyunca görüşleri, bilgi ve destekleriyle katkıda bulunan hocam Dr.Öğr.Üyesi İbrahim Gürsu TEKDEMİR'e teşekkür ediyorum.

Doktora süresince özellikle ortak çalışmalarımızda harcadığı emek ve öğrenimim boyunca sağladığı desteklerden dolayı hocam Ezgi ÜNVERDİ'ye teşekkür ediyorum.

Çalışma hayatım boyunca, birçok aşamada beni destekleyen Elektrik Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca her aşamada bana destek veren sevgili babam Alattin ÇAPAR ve annem Emine ÇAPAR ile kardeşim Tuğba ELMAS ve eşi Uğur ELMAS'a doktora eğitimim süresince gösterdikleri ilgi ve anlayıştan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ocak – 2024 Alkım ÇAPAR

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
1. GİRİŞ 1
2. İLETİM HATLARININ KORUNMASI VE KOMPANZE EDİLMESİ 4
2.1. İletim Hatlarının Korunmasında Mesafe Koruma Röleleri 4
2.1.1. Koruma Bölgeleri 4
2.1.2. Röle Çalışma Karakteristiği 5
2.2. İletim Hatlarının Kompanze Edilmesi 9
2.2.1. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) 9
2.2.2. Kompanze Edilmiş Hatlarda Mesafe Koruma Rölesinin Etkisi 11
2.2.3. Tristör Kontrollü Seri Kapasite (TCSC) ve Statik VAR Kompansatörün (SVC) PSCAD'de Modellenmesi 12
3. GÜÇ SALINIMLARI 15
3.1. Güç Salınımları Tanımı 15
3.2. Geleneksel Güç Salınımları Durumunda Bloke Ediciler 19
4. GÜÇ SALINIMLARI ALTINDA ARIZA TESPİTİ 24
4.1. Yöntem Parametrelerinin Eldesinde Kullanılan Uygulamalar 24
4.1.1. Ayrık Fourier Dönüşümü Tabanlı Kayan Pencere 24
4.1.2. Zarf Uygulaması 26
4.2. Önerilen Yöntem için Parametre Tayini 29
4.3. Kompanze Edilmemiş Sistemler için Önerilen Yöntem 33
4.4. Kompanzasyonlu Sistemler için Önerilen Yöntem 35
5. ÖNERİLEN YÖNTEMLERİN FARKLI TEST SİSTEMLERİNDE UYGULANMASI 42
5.1. Test Sistemlerinin Tanıtımı 42
5.1.1. Birinci Test Sisteminin Tanıtımı 42
5.1.2. İkinci Test Sisteminin Tanıtımı 44
5.2. Akım ve Gerilimlerin Salınım Altında Davranışı 45
5.2.1. Birinci Test Sistemindeki Gözlemler 45
5.2.1.1. Kompanzasyonsuz Durum 45
5.2.1.2. Kompanzasyonlu Durum 47
5.2.2. İkinci Test Sistemindeki Gözlemler 51
5.2.2.1. Kompanzasyonsuz Durum 51
5.2.2.2. Kompanzasyonlu Durum 52
5.3. Önerilen Yöntemlerin Uygulanması 54
5.3.1. Birinci Test Sisteminde Uygulanması 55
5.3.1.1. Uygulama Senaryoları 55
5.3.1.2. Her Bir Senaryo için Elde Edilen Sonuçlar 57
5.3.2. İkinci Test Sisteminde Uygulanması 62

5.3.2.1. Uygulama Senaryoları 62
5.3.2.2. Her Bir Senaryo için Elde Edilen Sonuçlar 64
5.4. Alınan Sonuçların Değerlendirilmesi 66
6. KARŞILAŞTIRMA ANALİZİ 69
6.1. Kompanze Edilmemiş Sistemlerde Karşılaştırma 69
6.1.1. Arıza Direncinin Etkisi 69
6.1.2. Arıza Başlangıç Açısının Etkisi 70
6.1.3. Salınım Frekansı Değişiminin Etkisi 71
6.1.4. Literatür ile Karşılaştırma 72
6.2. Kompanze Edilmiş Sistemlerde Karşılaştırma 73
6.2.1. Farklı Arıza Direncinin Etkisi 74
6.2.2. Farklı Salınım Frekansının Etkisi 75
6.2.3. Farklı Arıza Başlangıç Açısının Etkisi 77
6.2.4. Gürültülü Durumun Etkisi 79
6.2.5. Literatür ile Karşılaştırma 80
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 82
KAYNAKLAR 85
EKLER 91
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 94
ÖZGEÇMİŞ 95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mesafe koruma rölesi çalışma bölgeleri 5
Şekil 2.2. Mesafe rölesinin a) çalışma karakteristiği b) karakteristiğinin empedans diyagramı 5
Şekil 2.3. a) Örnek röle sistemi, b) Yönlü röle karakteristiği 6
Şekil 2.4. Mho tipi mesafe rölesinin çalışmasını baz alan rölenin çalışma karakteristiği (Blackburn ve Domin, 2006) 7
Şekil 2.5. Üç bölgeli koruma 8
Şekil 2.6. a) Tristör ile Kontrol Edilen Seri Kapasitör (TCSC) b) Statik VAr Kompanzasyonu (SVC) 12
Şekil 2.7. TCSC için gerçekleştirilen akım kontrolü a) kontrol diyagramı b) PSCAD uygulaması 13
Şekil 2.8. SVC için gerçekleştirilen gerilim kontrolü a) kontrol diyagramı b) PSCAD uygulaması 14
Şekil 3.1. Salınım olmayan durum için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması 15
Şekil 3.2. 1,5Hz salınım durumu için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması 16
Şekil 3.3. 5,5Hz salınım durumu için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması 16
Şekil 3.4. 10Hz salınım durumu için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması 17
Şekil 3.5. Güç salınımı ve örnek R-X mesafe rölesi karakteristiği (Tekdemir, 2017) 18
Şekil 3.6. Empedans değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım 20
Şekil 3.7. Vcosφ değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım 20
Şekil 3.8. Direnç değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım 21
Şekil 3.9. Akım farkı değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım 21
Şekil 3.10. Farklı kompanzasyon ve salınım durumlarına göre akım ve gerilim grafikleri 22
Şekil 4.1. M başlangıç örneğine sahip bir sinyalin her periyot bir pencere olacak şekilde gösterimi 25
Şekil 4.2. Bir sinyalin alt ve üst zarfı 27
Şekil 4.3. Tepe noktası tabanlı bir zarf uygulaması için a) örnek sinyal, b) örnek sinyalin tepe noktaları, c) tepe noktalarına göre oluşturulan üst zarf, d) üst ve alt zarf 27
Şekil 4.4. Farklı veri grupları durumunda gerilimin pozitif bileşeni üst zarfları (maksimum değerleri) 28
Şekil 4.5. Gerilimin pozitif bileşeninin üst zarfının maksimum, ortalama ve minimum grafikleri (10 periyot örnekleme aralıkları için) 29
Şekil 4.6. a) Kompanze edilmemiş, b) SVC ile kompanze edilmiş, c) SC ile kompanze edilmiş ve d) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda I_a, I_b ve I_c faz akımları, I_{dc} ve V_{h5} değerleri 30
Şekil 4.7. a) SC ile kompanze edilmiş ve b) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda I_a, I_b ve I_c faz akımları, V_{dc} ve Q değerleri 31
Şekil 4.8. I_{dc} değerinin ölçüm noktasına a) yakın arıza, b) uzak arıza durumlarında değişimi 34

Şekil 4.9. a) SC senaryosunda yedek koruma durumunda I_{dc} değeri, b) TCSC senaryosunda yedek koruma durumunda I_{dc} değeri, c) SC senaryosunda yedek koruma durumunda kaydırılmış I_{dc} değeri, d) TCSC senaryosunda yedek koruma durumunda kaydırılmış I_{dc} değeri 36
Şekil 4.10. Kompanze edilmemiş durum odaklı yöntem akış şeması 38
Şekil 4.11. Mesafe koruma rölesi ve sunulan yöntemin arıza ve kararsız salınım durumundaki davranışı 39
Şekil 4.12. Kompanzasyon odaklı yöntem akış şeması 40
Şekil 5.1. Üç baralı test sistemi....43
Şekil 5.2. WSCC 9 baralı sistemi (Manitoba Hydro International Ltd., 2018) 44
Şekil 5.3. Birinci test sistemi; korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza 46
Şekil 5.4. Birinci test sistemi; korunan hattın sonunda a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza 46
Şekil 5.5. Birinci test sistemi; SC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza 47
Şekil 5.6. Birinci test sistemi; SVC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza 48
Şekil 5.7. Birinci test sistemi; TCSC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza 49
Şekil 5.8. İkinci test sistemi, 1. koruma bölgesi, a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza 51
Şekil 5.9. İkinci test sistemi yedek koruma; 2. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza....51
Şekil 5.10. İkinci test sistemi; SC durumunda 1. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, 2. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza 52
Şekil 5.11. İkinci test sistemi; TCSC durumunda 1. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, 2. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza 53
Şekil 5.12. İkinci test sistemi; a) kompanze edilmemiş, b) SVC ile kompanze edilmiş, c) SC ile kompanze edilmiş ve d) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda V_a, V_b ve V_c faz gerilimleri, I_{dc} ve V_{h5} değerleri....57
Şekil 5.13. Birinci test sistemi; a) Z_{L1} 15.km salınım yok durumu, b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumu 59

Şekil 5.14. Birinci test sistemi; SC kompanzasyonunda a) Z_{L1} 15.km kararlı salınım durumunda arıza, b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumunda arıza 60
Şekil 5.15. Birinci test sistemi; TCSC kompanzasyonunda a) Z_{L1} 15.km kararlı salınım durumunda arıza, b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumunda arıza 61
Şekil 5.16. Birinci test sistemi; SVC kompanzasyonunda a) Z_{L1} 15.km kararlı salınım durumunda arıza b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumunda arıza 61
Şekil 5.17. İkinci test sistemi; a) kompanze edilmemiş, b) SC ile kompanze edilmiş ve c) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda V_a, V_b ve V_c faz gerilimleri, I_{dc} ve V_{h5} değerleri 63
Şekil 5.18. İkinci test sistemi; kompanze edilmemiş senaryoda a) korunan hattın %50si kararlı salınım durumunda arıza, b) uzak hattın %50si kararsız salınım durumunda arıza 65
Şekil 5.19. İkinci test sistemi; SC kompanzasyonunda a) korunan hattın %50si kararlı salınım durumunda arıza, b) uzak hattın %50si kararsız salınım durumunda arıza 65
Şekil 5.20. İkinci test sistemi; kompanze edilmemiş senaryoda a) korunan hattın %50si kararlı salınım durumunda arıza, b) uzak hattın %50si kararsız salınım durumunda arıza 66
Şekil 5.21. Birinci test sistemi; TCSC kompanzasyonunda kararsız salınım durumunda arızaya mesafe koruma rölesi ve geliştirilen yöntemin cevapları.....67
Şekil 6.1. İkinci test sistemi; kompanze edilmemiş senaryoda a) 1Ω kararlı salınım durumunda arıza b) 200Ω kararsız salınım durumunda arıza.....69
Şekil 6.2. İkinci test sistemi; kompanze edilmemiş senaryoda a) 0° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, b) 0° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu, c) 90° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, d) 90° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu.....70
Şekil 6.3. İkinci test sistemi; a) 1,35Hz'lik güç salınımı, b) 5,6Hz'lik güç salınımı ve c) 9,1Hz'lik güç salınımı örneklerinde arıza durumu 71
Şekil 6.4. İkinci test sistemi; SC kompanzasyonu a) 1Ω arıza direnci kararlı salınım durumu, b) 200Ω arıza direnci kararsız salınım durumu ve TCSC kompanzasyonu c) 1Ω arıza direnci kararlı salınım durumu, d) 200Ω arıza direnci kararsız salınım durumu 75
Şekil 6.5. İkinci test sistemi; SC kompanzasyonu a) 1,37Hz salınım durumu, b) 7Hz salınım durumu ve TCSC kompanzasyonu c) 1,35Hz salınım durumu, d) 7,5Hz salınım durumu.....76
Şekil 6.6. İkinci test sistemi; SC kompanze edilmiş senaryoda a) 0° arıza başlangıç açısı ve b) 90° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, c) 0° arıza başlangıç açısı ve d) 90° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu 77
Şekil 6.7. İkinci test sistemi; TCSC kompanze edilmiş senaryoda a) 0° arıza başlangıç açısı ve b) 90° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, c) 0° arıza başlangıç açısı ve d) 90° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu 78

Şekil 6.8. Birinci test sisteminde gürültüsüz a fazı akım sinyali ve 20dB SNR'a sahip a fazı akım sinyali 79

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Tristör tabanlı ve dönüştürücü tabanlı FACTS cihazlarının bağlantı şekillerine göre sınıflandırılması 10
Tablo 4.1. Parametreler ve parametrelerin temel alındığı değerler/bileşenler....33
Tablo 5.1. Test sistemi 1'in özellikler....43
Tablo 5.2. Test sistemi 1'de kullanılan senaryolar....55
Tablo 5.3. Test sistemi 1 için kompanze edilmemiş durum odaklı yöntemin sonuçları....58
Tablo 5.4. Test sistemi 1 için kompanzasyon odaklı yöntemin sonuçları....60
Tablo 5.5. Test sistemi 2'de kullanılan senaryolar....62
Tablo 5.6. Test sistemi 2 için kompanze edilmemiş durum odaklı yöntemin sonuçları....64
Tablo 5.7. Test sistemi 2 için kompanzasyon odaklı yöntemin sonuçları....64
Tablo 6.1. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanze edilmemiş durum odaklı yöntemin literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılması....72
Tablo 6.2. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin farklı arıza dirençlerindeki sonuçları....74
Tablo 6.3. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin farklı salınım frekanslarındaki sonuçları....76
Tablo 6.4. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin farklı arıza başlangıç açısındaki sonuçları....77
Tablo 6.5. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin genel karşılaştırma sonuçları....80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

I_a : a fazı akımı, (kA)
I_b : b fazı akımı, (kA)
I_c : c fazı akımı, (kA)
I_{dc} : DC bileşen akımı, (pu)
I_{k1dc} : DC bileşen akımının üç periyotluk alt zarfının ortalaması, (pu)
I_{k2dc} : DC bileşen akımının on periyotluk üst zarfının ortalaması, (pu)
I_{k3dc} : DC bileşen akımının yirmi periyotluk üst zarfının ortalaması, (pu)
I_{k4dc} : DC bileşen akımının bir periyottaki maksimum değeri, (pu)
I_{k5dc} : DC bileşen akımının yirmi periyotluk üst zarfının maksimumu, (pu)
T_m : Mekanik tork (pu)
V_a : a fazı gerilimi, (kV)
V_b : b fazı gerilimi, (kV)
V_c : c fazı gerilimi, (kV)
V_{dc} : DC bileşen gerilimi, (pu)
V_{h5} : Gerilimin beşinci harmoniği, (pu)
V_{k1dc} : DC bileşen geriliminin üç periyotluk alt zarfı, (pu)
V_{k1h5} : Gerilimin beşinci harmoniğinin on periyotluk üst zarfının ortalaması, (pu)
V_{k2dc} : DC bileşen geriliminin üç periyotluk üst zarfı, (pu)
V_{k2h5} : Gerilimin beşinci harmoniğinin bir periyottaki maksimum değeri, (pu)
V_{k3dc} : DC bileşen geriliminin üç periyotluk üst ve alt zarfının farkının maksimumu, (pu)
V_{k3h5} : Gerilimin beşinci harmoniğinin arızasız durumda alınmış örneği, (pu)
V_{k3dc} : DC bileşen geriliminin üç periyotluk üst ve alt zarfının farkının maksimumlarının ortalamaları, (pu)
Z_{7-8} : Test sistemi 2 örneğinde 7. ve 8. bara arası hat empedansı, (Ω)
Z_{8-9} : Test sistemi 2 örneğinde 8. ve 9. bara arası hat empedansı, (Ω)
Z_{L1} : Test sistemi 1 örneğinde rölenin olduğu hattın empedansı, (Ω)
Z_{L2} : Test sistemi 1 örneğinde paralel hattın empedansı, (Ω)
Z_{L3} : Test sistemi 1 örneğinde uzak hattın empedansı, (Ω)

Kısaltmalar

DC : Direct Current (Doğru Akım)
FACTS : Flexible Alternative Current Transmission System (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi)
IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IPC : Interphase Power Controller (Faz Arası Güç Kontrolörü)
MOV : Metal Oxide Varistor (Metal Oksit Varistör)
RMS : Root Mean Square (Karekök Ortalama)
SC : Series Capacitor (Seri Kapasitör)
SNR : Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SSG : Static Synchronous Generator (Statik Senkron Generatör)
SSSC : Static Synchronous Series Capacitor (Statik Senkron Seri Kapasitör)
STATCOM : Static Synchronous Compensator (Statik Senkron Kompanzatör)
SVC : Static VAr Compensation (Statik VAr Kompanzasyon)

SVG	:	Static VAr Generator or Absorber (Statik VAr Generatörü veya Emicisi)
TCBR	:	Thyristor Controlled Braking Resistor (Tristör ile Kontrol Edilen Frenleme Direnci)
TCPST	:	Thyristor Controlled Phase Changing Transformer (Tristör Kontrollü Faz Değiştiren Transformatör)
TCR	:	Thyristor Controlled Reactor (Tristör ile Kontrol Edilen Reaktör)
TCSC	:	Thyristor Controlled Series Capacitor (Tristör ile Kontrol Edilen Seri Kapasitör)
TCSR	:	Thyristor Controlled Series Reactor (Tristör ile Kontrol Edilen Seri Reaktör)
TSC	:	Thyristor Switched Capacitor (Tristör Anahtarlamalı Kapasitör)
TSR	:	Thyristor Switched Reactor (Tristör Anahtarlamalı Edilen Reaktör)
TSSC	:	Thyristor Switched Series Capacitor (Tristör Anahtarlamalı Seri Kapasitör)
TSSR	:	Thyristor Switched Series Reactor (Tristör Anahtarlamalı Seri Reaktör)
UPFC	:	Unified Power Flow Controller (Birleşik Güç Akışı Kontrolörü)
WSCC	:	Western System Coordinating Council (Batı Sistemi Koordinasyon Konseyi)

İLETİM SİSTEMLERİNİN MESAFE KORUMASINDA GÜÇ SALINIMLI SİMETRİK ARIZALARIN TESPİTİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

ÖZET

İletim hatlarını koruyan mesafe rölelerinin doğru çalışması, güç sistemlerinin kararlılığı, sürekliliği ve güvenilirliği açısından çok önemlidir. İletim hatlarında çeşitli nedenlerden dolayı oluşabilecek 1-10Hz frekanslı güç salınımları ve hat performansını arttırmak için kullanılan kompanzasyon sistemleri, mesafe rölelerinde açma yapması gerekirken açmama, açma yapmaması gerekirken açma yapmasına yani güvenilir olmayan bir çalışmaya neden olabilmektedir. Bu çalışmanın amacı, hem yalın hem de kompanze edilmiş hatlarda farklı güç salınımları karşısında tepki vermeyen, güç salınımları altında oluşabilecek dengeli arızaların başlangıç ve bitiş anlarını tespit edip rölenin hem ana hem de yedek korumasının güvenli bir şekilde olmasını sağlayacak bir yöntemi geliştirmektir.

Kompanze edilmemiş ve kompanze edilmiş iletim hatlarında mesafe rölesine güç salınımları altında yardımcı yöntemlerin yetersiz olduğu ve yeni bir yöntem ihtiyacı var olan yöntemlerle yapılan karşılaştırmalar ile gösterilmiştir. Bu sonuçlar kapsamında, güç sistemi parametrelerinden mümkün olduğunca bağımsız, geniş bir kullanım alanı olan, güç salınımı olduğu ve olmadığı durumlarda arıza anını yakalayan bir yöntem bu tez kapsamında geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde, rölenin bulunduğu baradan alınan ölçümler kullanılarak elde edilen akımın DC bileşeni, gerilimin DC bileşeni beşinci harmonik gerilimi ve reaktif güç yönü değişimi ve bu parametrelerin zarflarından belirlenen dinamik eşik değerler güç salınımı altında arıza başlangıcı ve bitişini tespit etmede kullanılmıştır.

İki farklı test sistemi PSCAD üzerinde modellenmiş ve güç salınımı altında simetrik arıza analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen üç faz gerilim ve akım değerleri MATLAB ortamında geliştirilen yöntem için giriş verilerini oluşturmuştur. Örnek test sistemleri üzerinde farklı frekanslarda kararlı-karasız güç salınımları ve salınım olmama durumu gibi güç salınımı parametreleri ile arıza konumu, direnci, arıza akım açısı gibi arızaya ilişkin parametreler değiştirilerek çok sayıda senaryolar oluşturulmuştur. Geliştirilen yöntemin etkinliği bu senaryolar karşısında değerlendirilmiştir.

Önerilen yöntem hem kompanze edilmemiş hem de kompanze edilmiş durumlar için literatürde geliştirilen yöntemlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Karşılaştırmalar yöntemin farklılıklarını, güçlü yanlarını ve gerekliliğini ortaya koymuştur, ayrıca gürültü ve doyma durumları da dikkate alınmış ve yöntemin bu dış etkenlerden etkilenmesinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Arıza Anı Tespiti, Güç Salınımı, İletim Hatları, Kompanze Edilmiş İletim Hatları, Mesafe Koruma Röleleri.

A NEW METHOD IN DETECTING SYMMETRICAL FAULTS DURING POWER SWINGS IN DISTANCE PROTECTION OF TRANSMISSION SYSTEMS

ABSTRACT

The transmission line protection is ensured by the distance relays, which is an important factor for the stability, continuity, and reliability of the power system. The power swings with a frequency of 1-10 Hz that may occur in transmission lines due to various reasons and compensation systems used to increase line performance may cause distance relays not to open when they should, or to open when they should not, in other words, it may cause unreliable operation. The aim of this study is to develop a method that does not react to different power swings on both plain and compensated lines, detects the inception and clearance instants of the balanced faults that may occur under power swings, and ensures that the relay has both main and backup protection safely.

It has been shown through comparisons that the methods that auxiliary to the distance relay under power swings in compensated and uncompensated transmission lines are insufficient and a new method is needed. Within the scope of these results, a method that is as independent as possible from the power system parameters, has a wide usage area, and captures the instance of fault in cases where there is or is not a power swing, has been developed within the context of this thesis. In the developed method, the DC component of the current, the DC component of the voltage, the fifth harmonic voltage and the reactive power flow change obtained using the measurements taken from the busbar where the relay is located, and the dynamic threshold values determined from the envelopes of these parameters were used to detect the inception and clearance of the fault under power swing.

Two different test systems were modelled on PSCAD, and symmetrical fault analysis under power swings were performed. The three-phase voltage and current values obtained from this analysis constituted the input data for the method developed in the MATLAB program. Numerous scenarios have been created on example test systems by changing power swing parameters such as stable-unstable power swing at different frequencies, no swing, and fault-related parameters such as fault location, resistance, fault current angle. The effectiveness of the developed method was evaluated against these scenarios.

The proposed method was compared with the methods developed in the literature for both uncompensated and compensated scenarios and the results were shared. Comparisons revealed the differences, strengths, and necessity of the method, moreover noise and saturation were also taken into account, and it was seen that the method's influence from these external factors was negligible.

Key words: Fault Instance Detection, Power Swing, Transmission Lines, Compensated Transmission Lines, Distance Protection Relays.

1. GİRİŞ

Güç sistemlerinin çalışmasında güvenilirlik ve sürdürülebilirliğin sağlanması için hızlı ve doğru şekilde arızanın tespit edilerek koruma işlevinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu sistemlerde iletim hatları kısmında bu görevi mesafe koruma röleleri sağlamaktadır. Mesafe koruma röleleri, koruma bölgesinde arıza anında daha önceden röleye girilen koşullara göre kesici hareketini tetikler ve arızayı güç sisteminden izole eder (Mason, 1998).

Mesafe rölelerinin hatalı kesici hareketine yol açması ender ama önemli bir durumdur. Bu nedenle rölenin her koşul altında hatasız çalışmasının sağlanması için çalışmalar yapılmaktadır. Bu koşullardan biri de güç salınımları diye belirtilen bozuculardır. Güç salınımlarına yol açan temel etkenler iletim hattının anahtarlanması, yük/üretim kısmındaki ani değişimler ve arızalar olarak düşünülebilinir. Bu etkilerden dolayı oluşan güç salınımları kararlı ve kararsız salınımlar olarak adlandırılmaktadır (McGuinness ve diğ., 2018). Kararlı salınımlar düşük frekansta ve kendi kendine sönebilecek salınımlardır, kararsız salınımlar ise daha yüksek frekanslarda salınan sistemi kararsızlığa sürükleyebilecek salınımlardır. Bu salınımların oluşması durumunda ilgili güç sisteminde kararlılığı sağlayacak adımlar bulunmaktadır ancak mesafe rölesinin 10Hz'e kadar olan salınımlarda kesiciye açma verdirmemesi gerekmektedir.

Mesafe rölesinin güç salınımları altında kesici açması verdirmemesi yapılan çalışmaların bir parçası olsa da çalışmalar bunlar ile sınırlı değildir. Daha önce belirtildiği üzere mesafe rölesi arızayı güç sisteminden izole etmelidir, bu arıza sistemde güç salınımları varken de oluşabilir (Andanapalli ve Biswal, 2020; Alsyoufi ve Hajjar, 2019). Asimetrik arızalar akım ve gerilimin negatif ve sıfır bileşenleri ile salınımlardan ayırt edilebilse de (Kumar ve Jena, 2019; Prabhu ve diğ. 2018) simetrik arızaların güç salınımlarından ayırt edilmesi daha zordur (M.S. ve diğ., 2018; Andanapalli ve Biswal, 2021). Bu duruma ek olarak iletim hatlarında kompanzasyon uygulaması yapılmaktadır, bu uygulamalar mesafe rölesinin çalışmasını etkilediği gibi güç salınımları ile arızaların ayırt edilmesini de etkiler ve ayrı bir çalışma konusu olarak düşünülür (Asle Mohammad Alizadeh ve diğ., 2021; Sai Kumar ve diğ., 2020; Khederzadeh ve Sidhu, 2006).

Kısaca özetlemek gerekirse, mesafe rölesinin arıza olmadığında açma sinyali vermemesi, arıza olduğunda ise yedek koruma dışında anlık açma verdirmesi, yedek korumada ise belirlenen süre sonunda arızanın devam etmesi halinde açma verdirmesi gerekmektedir (Esmaeilian ve Kezunovic, 2016; Lazaro ve diğ., 2018). Bu amaçla yapılan çalışmaları üç ana başlık altında toplamamız gerekirse geleneksel yöntemler, dijital sinyal işlemeye bağlı yöntemler ve makina öğrenme temelli yöntemler olarak düşünebiliriz (Pazoki ve diğ., 2023; Mahamedi ve Zhu, 2012; Lin ve diğ., 2008; Lin ve diğ., 2010).

Geleneksel yöntemler eşmerkezli bindirilmiş akım yöntemi, salınım merkezi gerilimi yöntemi ve üç fazlı güç değişimi yöntemi sayılabilir (Tekdemir, 2017; IEEE Power System Relaying Committee, 2005; Khorashadi-Zadeh, 2005; Apostolov ve diğ., 2004; Rao ve Pradhan, 2012). Geleneksel yöntemlerin hala geniş bir kullanım alanı vardır ancak bu yöntemlerin eksik kaldığı kısımlar da tespit edilmiştir, bunlardan sıklıkla karşılaşılanları belli açılardaki arıza akımlarının tespit edilebilmesi ve arıza tespitinde yaşanan gecikmeler gibi sıralanabilir (Nayak ve diğ. 2010; Ambekar ve Dambhare, 2012; Gunasegaran ve diğ., 2015).

Dijital sinyal işleme tabanlı yöntemler popüler bir araştırma alanıdır, güç salınımı ve arıza konularında Fourier dönüşümü ve dalgacık dönüşümü yaygın olarak kullanılmaktadır (Pang ve Kezunovic, 2010; Dubey ve Samantaray, 2013; Rao ve Pradhan 2015). Fourier dönüşümü kapsamında hem hızlı Fourier dönüşümünü hem de ayrık Fourier dönüşümünü temel alan çalışmalar vardır. Bu yöntemlerin uygulanmasında karşılaşılan zorluklar yöntem için kullanılacak veri yığını, basitliği ve güç sistemi değerlerine bağımlılığı gibi sıralanabilir (Karegar ve Mohamedi, 2009; Mahamedi, 2011).

Makina öğrenme temelli yöntemler yine geniş bir çalışma alanı sunmaktadır (Zadeh ve Li, 2008; Swetapadma ve Yadav, 2016; Daryalal ve Sarlak, 2017; Abidin ve diğ., 2011). Bu çalışmalarda yüksek doğrulukla arıza tespiti ve güç salınımı tespitleri yapılabilmektedir. Bu yöntemlerde ise bir eğitme süreci vardır. Makina öğrenme temelli yöntemlerin kullanılabilirliği hem verdikleri sonuca hem de bu öğrenme sürecine göre yorumlanmaktadır.

Tez kapsamında, salınım olması veya olmaması fark etmeksizin arızayı tespit eden bir yöntemin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Diğer çoğu çalışmadan farklı olarak mesafe

koruma rölelerinin yedek koruma bölgeleri de dikkate alınmış ve bu amaçla sadece arıza başlangıcı tespiti değil, arıza sonlarının da doğru belirlenmesi ikinci bir hedef olarak ortaya çıkmıştır. Yöntemin mümkün olduğunca sistemden bağımsız olması için sabit bir eşik değer yerine dinamik bir eşik değer kullanılmıştır. Bu eşik değerin yerel maksimum değerleri kullanan bir zarf uygulaması (Biswas ve Si, 2011; Shukla ve diğ., 2017) üzerinden belirlenmesi önerilmiştir. Uygulama kapsamında ele alınan değerler akım ve gerilim ölçümleri ile elde edilen akımın DC bileşeni, gerilimin DC bileşeni, gerilimin 5. harmonik bileşeni ve reaktif güç akış yönünün takibi şeklindedir.

Bölüm 2'de mesafe koruma röleleri ve kompanzasyonun bu rölelere etkisi detaylandırılmıştır. Bölüm 3 kısmında ise güç salınımları ve güç salınımları tespit yöntemleri tanıtılmıştır. Bölüm 4 kısmında kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Bölüm 5 ve 6 ise sırasıyla yöntemlerin uygulanması ve literatürdeki diğer yöntemler ile karşılaştırılması kısımları gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise sonuç ve öneriler paylaşılmıştır.

2. İLETİM HATLARININ KORUNMASI VE KOMPANZE EDİLMESİ

Güç sistemlerinde enerji iletimi, iletim hatları ile sağlanmaktadır. Bu nedenle iletim hatlarının enerji iletim kapasitesi ve korunması önem arz etmektedir. İletim hatlarının korunmasında koruma röleleri kullanılmaktadır. Bu koruma rölelerinden başlıcaları aşırı akım koruma rölesi, diferansiyel koruma rölesi ve mesafe koruma rölesidir. Özellikle mesafe koruma rölesi yönlü koruma ve röle koordinasyonu açısından ön plana çıkmaktadır. İletim hatlarında enerji iletim kapasitesinin arttırılması ise sabit seri kompanzasyon ve FACTS cihazları ile yapılmaktadır.

2.1. İletim Hatlarının Korunmasında Mesafe Koruma Röleleri

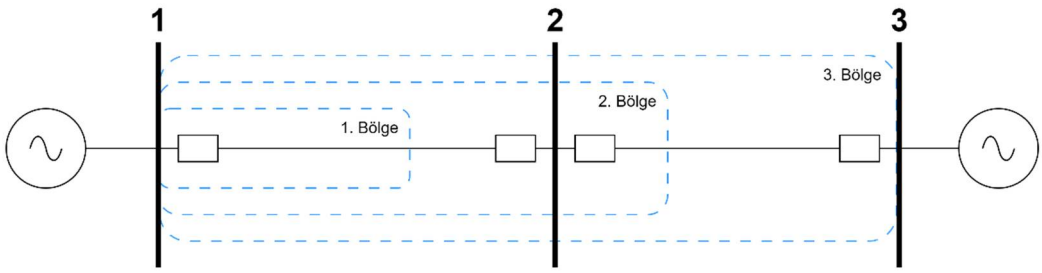
Güç sistemlerinde, özellikle iletim hatlarında arızalar yaşanmaktadır. Sistemin sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için bu arızaların güç sisteminden izole edilmesi gerekmektedir. Mesafe koruma röleleri bu kısımda kullanılmaktadır. Amaç arıza olduğunda bu rölenin kesiciye açma verdirmesi şeklinde açıklanabilir. Ancak bu açma güç sistemi açısından o kadar önemlidir ki bir arıza noktasının izolasyonunu birden fazla mesafe koruma rölesi röle koordinasyonu ile sağlamaktadır.

Mesafe koruma röleleri, iletim hatlarında koruma sağlayan rölelerdir. Röle noktasında ölçülen akım ve gerilim değerlerine bağlı olarak empedans belirlenebilir (Clarke, 1945) (Ghorbani, 2011). Arıza anında bu belirlenen empedansın hattın empedansından küçük olması beklenir, eğer karşılaştırma sonucunda bulunan empedans ayar edilen empedanstan küçük ise arıza olduğunu varsayarak kesiciye açma sinyali gönderir (Mason, 1998). Bu şekilde arızalı alan ile arıza olmayan kısımların ayrılması amaçlanır.

2.1.1. Koruma Bölgeleri

Arızalı bölgenin izolasyonu için verilen tanım sadece ideal ölçüm durumunda mümkündür, akım ve gerilim transformatörlerinde oluşan hatalar nedeniyle hattın tamamına koruma yapılamamaktadır. Hattın %80 ile %100 arasında oluşan arızalarda empedans hesabında yüksek hata oranları oluşmaktadır. Bu nedenle koruma bölgeleri tanımlanır, mesafe rölelerinde genelde korunan hattın %80'i 1. bölge, hattın %120'si 2. bölge ve 3. bölge ise 1. ve 2. bölge dışında kalan yedek koruma sağlanacak hattın tamamı olarak alınır, 2. ve 3. bölge yedek koruma olarak seçilmektedir (Albehadili ve Abdul-

Qader, 2015; Paula ve diğ, 2022). Bölge 1 koruma alanında oluşan arızalarda röle gecikmesiz kesici açtırma sinyali vermelidir, bölge 2 ve 3 koruma alanlarında ise gecikmeli olarak açma sinyali vermelidir (Phadke ve Thorb, 2009). Mesafe koruma bölgeleri Şekil 2.1 üzerinde gösterilmiştir.

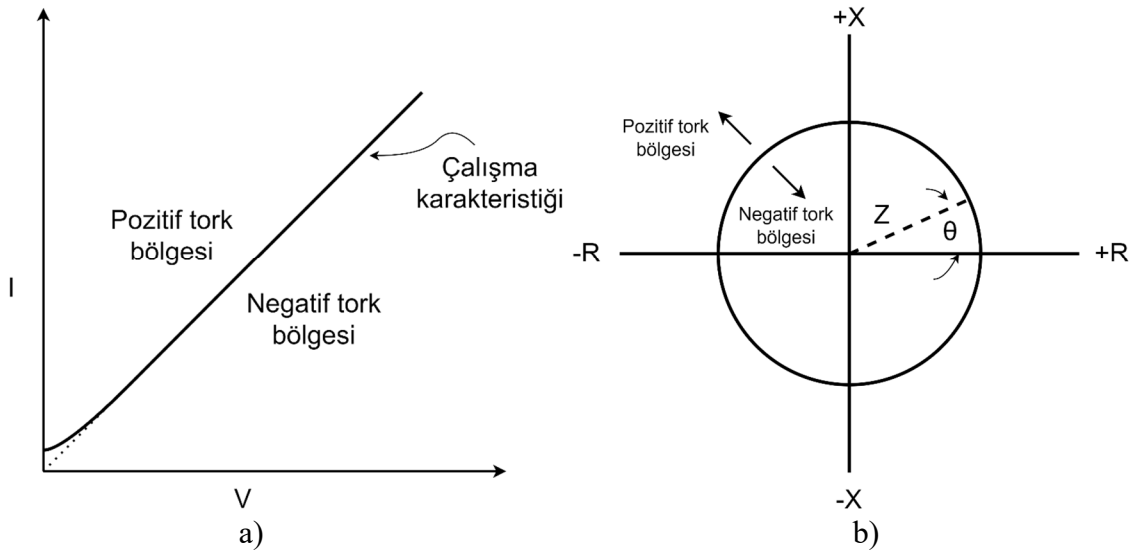


Şekil 2.1. Mesafe koruma rölesi çalışma bölgeleri

Koruma bölgeleri uygulamasında röle koordinasyonu önemlidir, bu koordinasyon yedek çalışmada kullanılan gecikme süreleri ile sağlanır. Rölenin çalışmasını daha iyi anlamak için röle çalışma karakteristiğini incelemek gerekir.

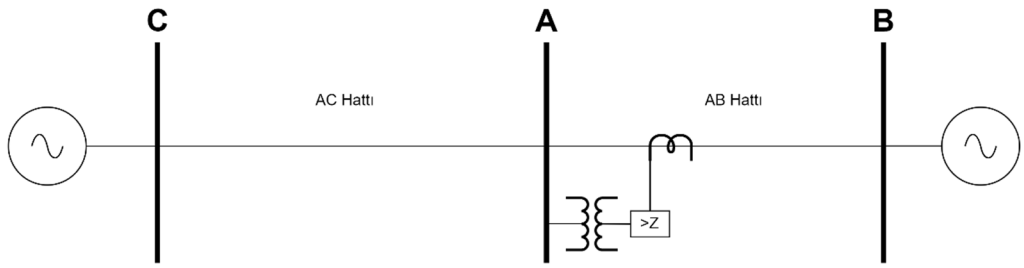
2.1.2. Röle Çalışma Karakteristiği

Rölenin çalışması, alınan akım ve gerilim ölçümlerine dayanmaktadır. Rölenin bulunduğu kısımdan ölçülen akım ve gerilim ile hesaplanan empedansı (Z) çalışma karakteristiği olarak düşünürsek, aşağıda verilen Şekil 2.2'yi elde ederiz.

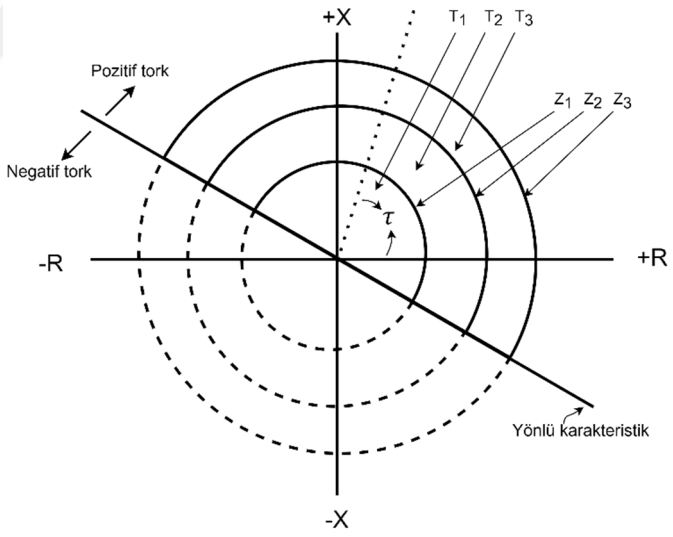


Şekil 2.2. Mesafe rölesinin a) çalışma karakteristiği b) karakteristiğinin empedans diyagramı

Ayarlanan empedans değerinden küçük bir değer pozitif tork bölgesine düşecek ve röle açma işlemini gerçekleştirecektir, ancak negatif tork bölgesinde kalan değerlerde röle açma işlemi yapmayacaktır. Bu duruma empedans diyagramı (R/X diyagramı) ile bakarsak b şıkkı elde edilir. Z yani V/I oranı yarıçap vektörünün uzunluğunu, θ ise gerilim ve akım arasındaki açıyı temsil eder (Mason, 1998). Ancak rölenin çalışması açıdan bağımsızdır, bu nedenle röle çalışma karakteristiği daire şeklinde gösterilir. Bu çalışma karakteristiğine göre rölenin gerisinde bulunan hatta arıza oluştuğunda da rölenin çalışma bölgesi içine girdiği görülür. Örnek bir röle sistemi Şekil 2.3'de verilmiştir.



a)

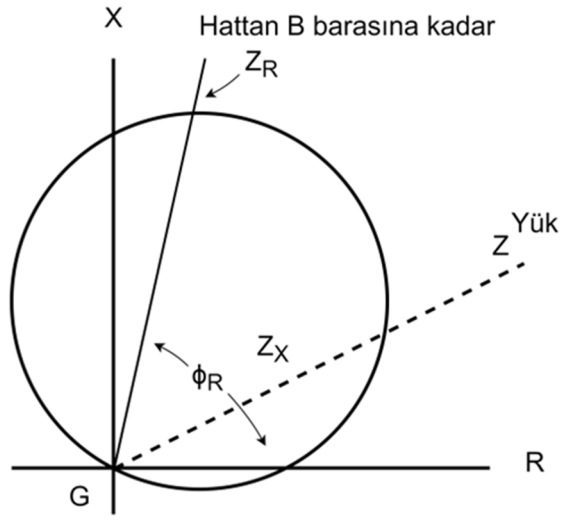


b)

Şekil 2.3. a) Örnek röle sistemi, b) Yönlü röle karakteristiği

Yukarıdaki şekli örnek olarak ele alırsak rölenin A-B arasında olan arızalarda açma sinyali vermesi istenir ancak A-C arasında da röle arıza anında açma sinyali verecektir (Alstom, 2011). Bu durumun önüne geçmek için yine şeklin b şıkkında verilen diyagramının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu grafikte röle karakteristiğinin empedans diyagramında farklı Z empedansları ve farklı T açma süreleri belirlenmiş olarak verilmiştir. Yönlü

karakteristik çizgisinin negatif tork bölgesi rölenin çalışması istenmeyen bölgedir, bu bölge θ-τ=90° şeklinde belirlenmiştir. Belirlenen bu karakteristik yüklenme durumları da eklenerek geliştirilmiştir, geliştirilen karakteristik Mho karakteristiği olarak adlandırılır. Şekil 2.4'de örnek bir sistem ve bu sistemin Mho karakteristiği verilmiştir.



Şekil 2.4. Mho tipi mesafe rölesinin çalışmasını baz alan rölenin çalışma karakteristiği (Blackburn ve Domin, 2006)

Yukarıda verilen şekil Mho birimi olarak adlandırılır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Mho birimi yönlü koruma sağlar, 60°- 85° arası endüktif arıza akımlarına, 0° - 30° arası endüktif yük akımlarından daha hassastır. Grafiğe ilişkin yük altındaki empedansın eşitliği Eşitlik (2.1)'de verilmiştir.

$$Z_{yük}=\frac{V_{hat}}{I_{yük}} \tag{2.1}$$

Eşitliğe bakarak yüksek yük akımının düşük empedansa yol açacağı söylenebilir. Çalışma karakteristiği yük akımına göre yorumlanacak olursa, büyük yüklerde fazörel empedansın orjine yaklaşacağı, düşük yüklerde ise uzaklaşacağı görülmektedir. Bu durumda bu karakteristiğe sahip bir mesafe rölesi yük akımlarından daha çok arıza akımlarında çalışacaktır, yüksek yük akımlarının koruma bölgesine girmesi sorununda daha iyi sonuç verir diyebiliriz (Blackburn ve Domin, 2006).

Orjine göre Mho dairesi;

$$Z=\frac{Z_R}{2}-\frac{Z_R}{2\angle\phi} \quad (2.2)$$

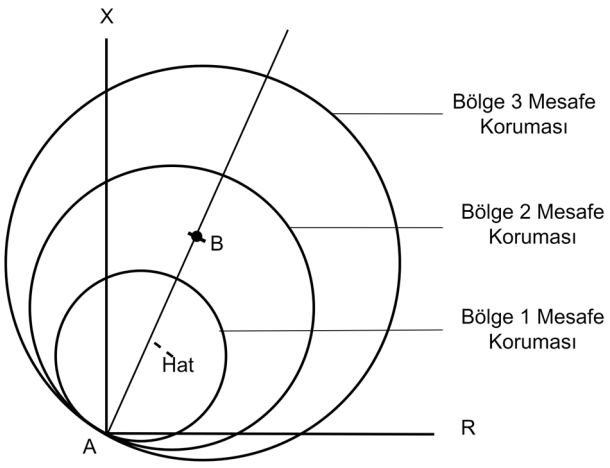
Formül (2.2) ile ifade edilir. Bu formülde $Z_R/2$ orjinden kaymayı, $Z_R/(2\angle\phi)$ ise kayma noktasından yarıçapı vermektedir. ϕ açısı 180° olduğu durumda Z sıfıra eşit olacaktır, açı 0° olduğunda ise Z değeri Z_R değerine eşittir. ϕ açısı ϕ_R açısının kayma açısıdır.

Mho karakteristiği dairesi üstündeki röle çalışma noktaları aşağıda verilen Denklem (2.3) ile belirtilir.

$$Z_X=Z_R\cos(\phi_R-\phi_X) \quad (2.3)$$

Z_X orjinden daireye herhangi bir noktadaki ϕ_X açısındaki empedansı belirtmektedir, Z_R ise ϕ_R açısıyla rölenin çalışma alanını temsil etmektedir.

Mho birimi için verilen sistemde yedek koruma için B barasından sonra bir hat daha olduğunu düşünürsek, bu hattı yedek koruma için ele alabiliriz. Daha önce belirtildiği gibi Mho birimi kullanan mesafe rölesinde de yine aynı şekilde Bölge 1'de gecikmesiz açma, Bölge 2 ve Bölge 3'te ise gecikmeli açma yapılan bölge olarak düzenlenmelidir. İlgili sistemde Bölge 1 için nZ_{AB}'ta n değeri 1'den küçük olacak şekilde set edilir, Bölge 2 de ise 1'den büyük olacak şekilde set edilmelidir, n değerinin 1 olması elde edilecek sonucun hattın toplam empedansına yani Z_{AB} (A ve B noktası arasındaki hat empedansı) değerine eşit olduğunu belirtir. Bölge 3 için ise bu yedek korunan hattın tamamı alınmaktadır. Bu tanımlara bağlı olarak Şekil 2.3'teki güç sistemi örneği için üç korumalı bölge grafiği Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Üç bölgeli koruma

Mesafe koruma rölelerinin doğru çalışması görüldüğü üzere empedansın doğru hesaplanması ile ilişkilidir. Empedans hesabında yaşanan hatalar yanlış bölge seçimi ve arızasız durumda rölenin arıza tespit etmesi gibi sorunlara yol açabilir. Özellikle arızasız durumda açmaya neden olma güç sistemlerinde elektrik enerjisi iletimini olumsuz yönde etkileyecek önemli sorunlardan biridir. Güç salınımlarının mesafe koruma rölelerinde bu tip istenmeyen durumlara yol açan etkenlerden olduğu bilinmektedir (Hemmingsson, 2003).

2.2. İletim Hatlarının Kompanze Edilmesi

Kompanzasyon iletim hatlarında kararlılığı, elektrik enerjisi transferi kapasitesini ve gerilim kararlılığının sağlanmasında kullanılır. Kompanzasyon konusunda son yıllarda esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) cihazları öne çıkmaktadır.

2.2.1. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)

Günümüzde elektrik enerjisine olan talep artışı ile iletim hatlarının güç transferi kapasitesi zorlanmaktadır (Hingoran, 1988; Tripathy ve diğ., 2014). Bu durum paralel iletim hatları veya kompanzasyon cihazlarının kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Sabit kompanzasyona kıyasla sistem kararlılığı üzerindeki etkileri nedeniyle FACTS cihazları ön plana çıkmaktadır (Hammons ve Lim, 1997). FACTS cihazları iletim hatlarında aktif ve reaktif gücü kontrol yetenekleriyle gerilim profilinde iyileşme sağlayabilmektedirler. (Ewart ve diğ., 1990; Jahdi ve Loi Lei Lai, 2011).

FACTS cihazları tristör tabanlı ve dönüştürücü tabanlı olmak üzere iki başlık altında verilir, bunun dışında güç sistemine bağlantı şekillerine göre seri, şönt, birleştirilmiş seri-seri ve birleştirilmiş seri-şönt olarak dört alt başlık altında da sınıflandırılması mümkündür. Aşağıdaki Tablo 2.1'de FACTS cihazlarının tristör ve dönüştürücü tabanlı sınıflandırılması, bağlantı şekilleri de dikkate alınarak verilmiştir.

Tablo 2.1. Tristör tabanlı ve dönüştürücü tabanlı FACTS cihazlarının bağlantı şekillerine göre sınıflandırılması

Bağlantı şekilleri	Tristör tabanlı FACTS cihazları	Dönüştürücü tabanlı FACTS cihazları
Seri	• Tristör ile Kontrol Edilen Seri Kapasitör (TCSC) • Tristör Anahtarlamalı Seri Kapasitör (TSSC) • Tristör ile Kontrol Edilen Seri Reaktör (TCSR) • Tristör Anahtarlamalı Seri Reaktör (TSSR)	• Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) • Ara hat Güç Akışı Kontrolör (IPF)
Şönt	• Tristör ile Kontrol Edilen Reaktör (TCR) • Tristör Anahtarlamalı Edilen Reaktör (TSR) • Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (TSC) • Tristör ile Kontrol Edilen Frenleme Direnci (TCBR)	• Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) • Statik Senkron Generatör (SSG) • Statik VAr Kompanzasyonu (SVC) • Statik VAr Generatörü veya Emicisi (SVG)
Birleştirilmiş Seri - Seri	Seri bağlantılı FACTS cihazlarının kombinasyonundan oluşur	
Birleştirilmiş Seri - Şönt	• Tristör Kontrollü Faz Değiştiren Transformatör (TCPST)	• Birleşik Güç Akışı Kontrolörü (UPFC) • Faz Arası Güç Kontrolörü (IPC)

Seri FACTS cihazları arasında en sık kullanılanı Tristör ile Kontrol Edilen Seri Kapasitör (TCSC)'dir, sabit kapasitör ve tristörle kontrol edilen bir reaktörün kombinasyonunu içerir. Birleştirilmiş Seri-Seri FACTS cihazları aktif ve reaktif gücü dengelediğinden hat arası güç akışı kontrolör de denir.

Şönt FACTS cihazlarının sık kullanılanları SVC ve STATCOM olarak belirtilir. SVC cihazı yüksek gerilimli sistemlerde sistem kararlılığını arttırması, kayıpları azaltması, gerilim artışını hiç yük olmadığı veya az yük olduğu durumda sınırlaması için kullanılmaktadır. Birleştirilmiş Seri-Şönt FACTS cihazlar ise seri ve şönt cihazların kombinasyonundan oluşur. Güç sistemlerine gerilim (seri kısım) ve akım (paralel kısım) enjekte eder.

FACTS cihazlarının sisteme etkisini anlamak için kayıpsız iletim hatları için güç akışı formülü Formül (2.4)'ü incelemek gerekmektedir.

$$P_{ij}=\frac{V_i V_j}{x_{ij}}\sin\delta_{ij} \quad (2.4)$$

i ve j baraları, V_i i nolu bara gerilimini ve V_j j nolu bara gerilimini, δ ilgili baralar arasındaki açıyı ve son olarak x hat reaktansını belirtmektedir. Verilen eşitlikteki parametrelerin herhangi birini kontrol ederek aktif ve reaktif güç kontrolü sağlanır (Narain ve Srivastava, 2015). FACTS cihazlarından SSSC, SVC, UPFC, STATCOM bara gerilimleri, faz açıları ve iletim hattı empedansını düzenleyebilmektedir, bu nedenle güç transfer kapasitesini arttırma, güç sisteminin kararlılığını ve güvenilirliğini iyileştirme için yararlanılan gerilim kaynağı dönüştürücüleri olarak kullanılmaktadırlar.

2.2.2. Kompanze Edilmiş Hatlarda Mesafe Koruma Rölesinin Etkisi

FACTS cihazlarının güç sistemine birçok olumlu etkisi olmasına karşın özellikle mesafe rölelerinin çalışmasını olumsuz etkileyebilmektedirler (Abdollahzadeh ve diğ., 2015; Khodaparast ve diğ., 2017c). Bu olumsuz etkileri seri FACTS cihazların mesafe rölesine etkisi, şönt FACTS cihazların mesafe rölesine etkisi adı altında iki başlıkta toplayabiliriz.

Seri FACTS cihazlar röle tarafından ölçülen değerlere göre hesaplanan empedansı değiştirir. Özellikle arıza direncinin de olduğu durumlarda röleye gelen empedans bilgisi gerçek empedanstan çok farklı olacaktır (Kmec ve diğ., 2015).

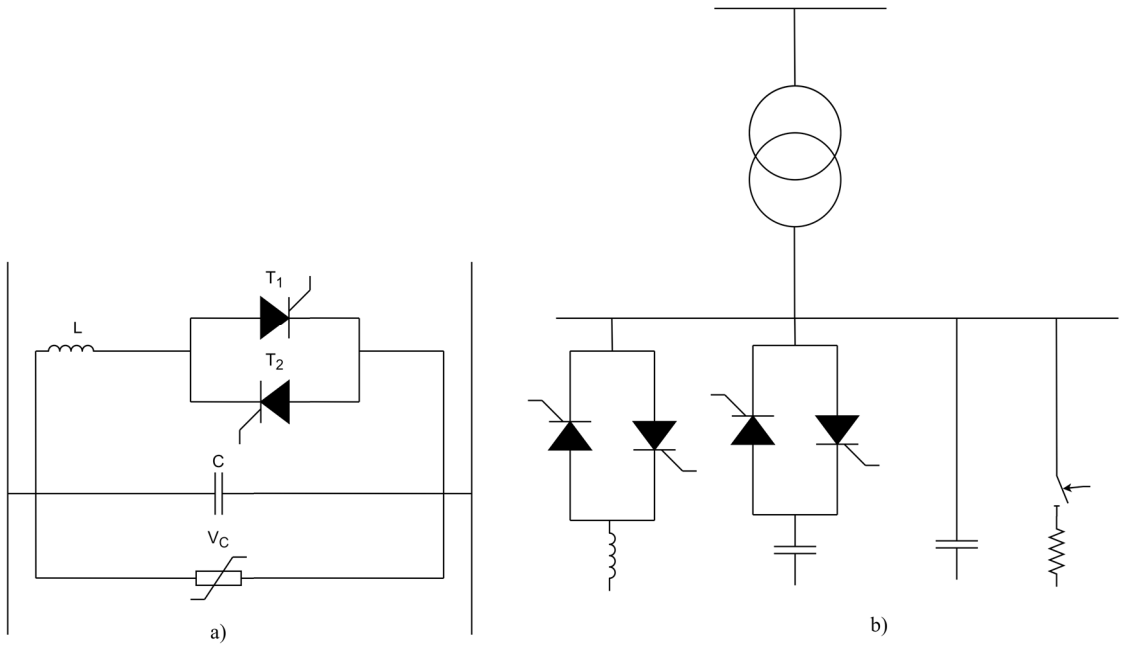
Şönt FACTS cihazlarında ise röleye etkisi birçok koşula bağlıdır. Cihazın çalışma modu, cihazın konumu ve arıza direnci gibi durumlar mesafe rölesine etkisini belirler (Niaki ve Amiri, 2015; Albehadili ve Abdul-Qader, 2015). Cihaz konum olarak röle ile arıza arasında ise görünen empedansı etkiler. Arıza direncinin değeri bu etkiyi arttırır, arıza direnci fazla oldukça gerçek değerden sapmada o kadar fazla olacaktır. Çalışma modu etkisi ise cihazın sisteme reaktif güç vermesi veya çekmesine bağlıdır, reaktif güç verme durumda röle çalışma bölgesinin altında ve çekme durumunda ise üstünde çalışır.

Bu etkiler üzerine birçok araştırma yapılmış ve mesafe rölelerinin FACTS cihazları altında doğru çalışabilmesi için iyileştirmeler verilmiştir (Mehrjerdi ve Ghorbani, 2017; Ghorbani ve diğ., 2012). Ancak güç salınımı durumunda FACTS cihazlarının etkisi ve

güç salınımı durumunda bloke edicilerin çalışmasına olan etkisi konusunda yapılan çalışmalar temel düzeyde ve yetersizdir (Esmaeilian ve diğ., 2011; Khodaparast ve diğ., 2017a; Khodaparast ve diğ., 2017b; Moravej ve diğ., 2014).

2.2.3. Tristör Kontrollü Seri Kapasite (TCSC) ve Statik VAR Kompansatörün (SVC) PSCAD'de Modellenmesi

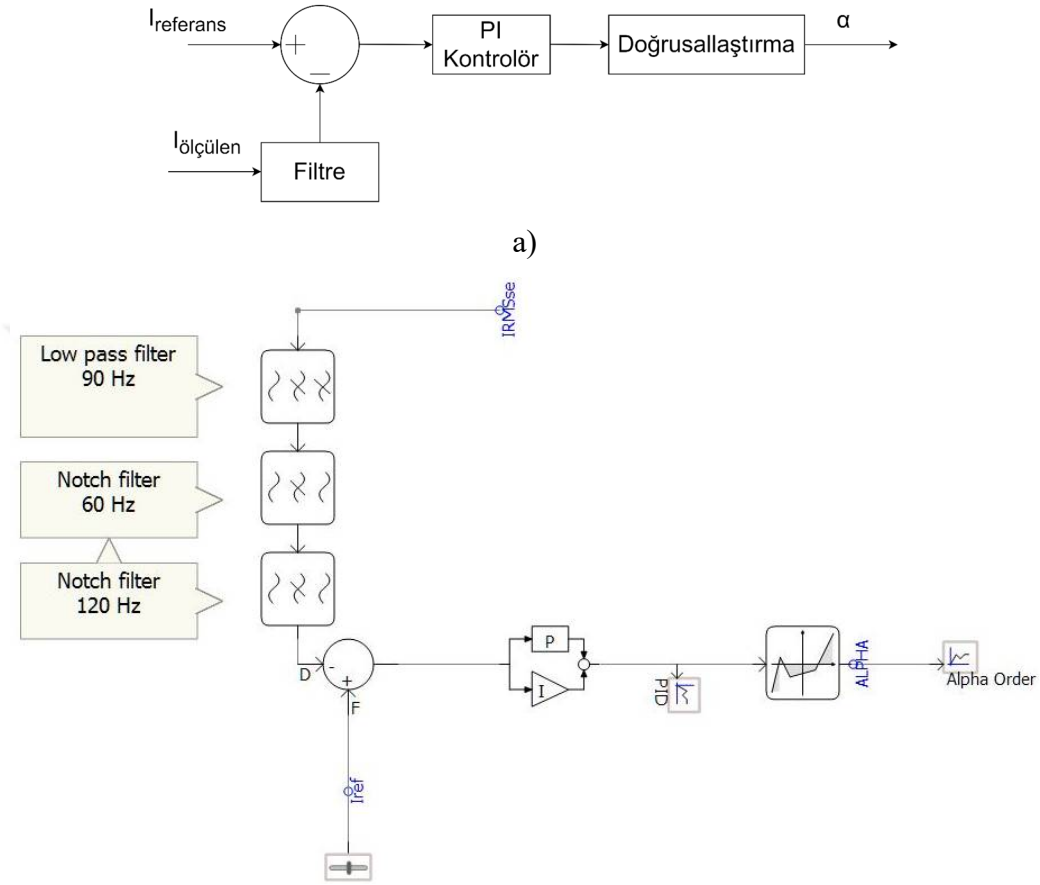
Tez çalışmasında FACTS cihazlarının arıza anında güç sistemine etkileri ve bu etkiler altında arıza anının tespiti amacıyla sık kullanılan TCSC ve SVC PSCAD ortamında modellenmiştir. TCSC ve SVC cihazlarının genel gösterimleri aşağıdaki Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. a) Tristör ile Kontrol Edilen Seri Kapasitör (TCSC) b) Statik VAr Kompanzasyonu (SVC)

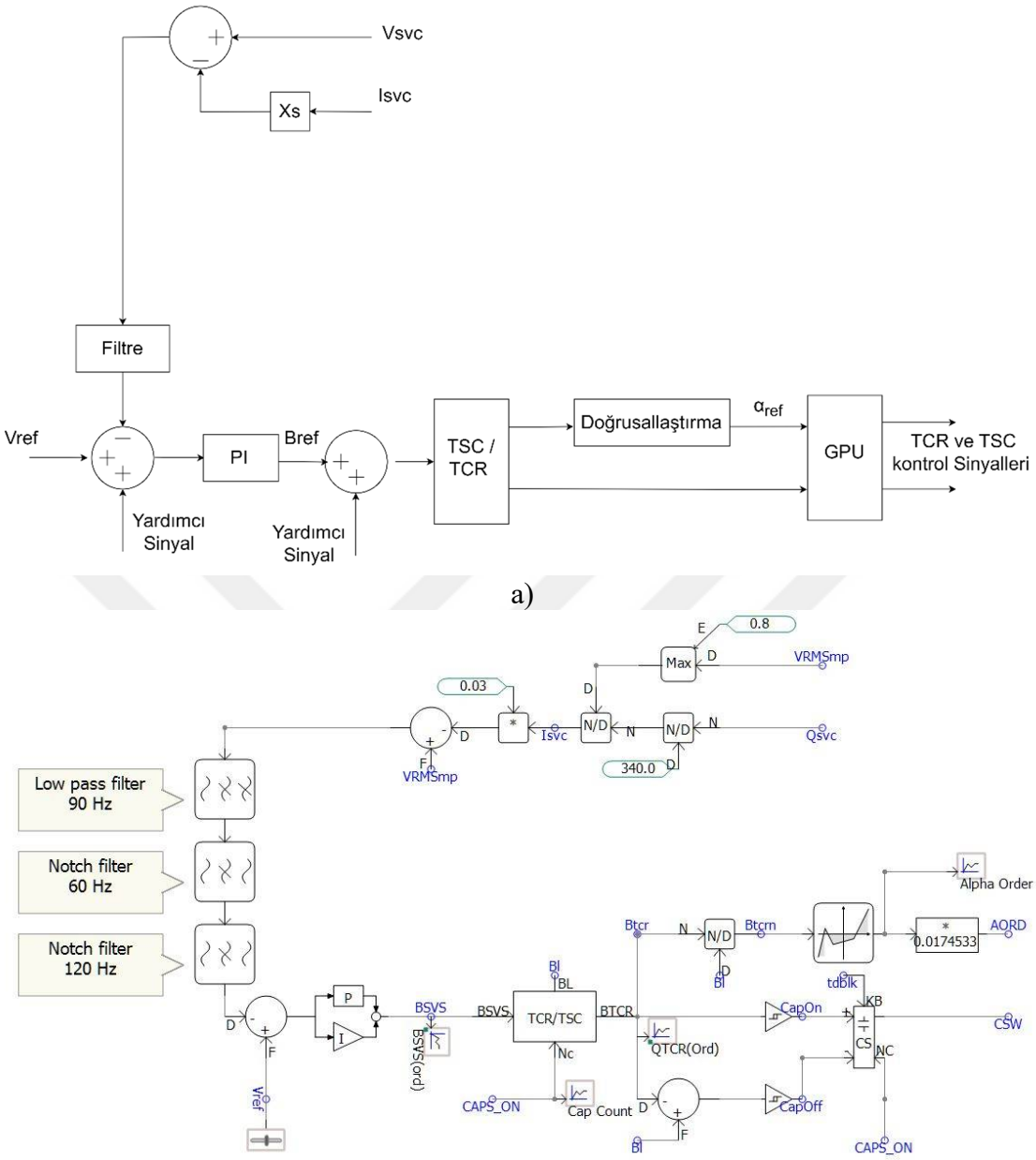
TCSC, güç sisteminde güç transfer kapasitesini arttırmak için kullanılan SC'nin yol açabildiği senkronaltı rezonans nedeniyle geliştirilmiştir (Padiyar, 2007; Emami ve diğ., 2017). TCSC tasarımında X_L değeri önem taşır, eğer X_C değerine göre çok küçük seçilirse akım harmoniğini arttırmaktadır. X_L ve X_C arasındaki bu oran sisteme göre değişse de birçok uygulamada 0,1 ile 0,3 arasında bir değer alınır, 0,133 veya 0,16 değerlerinin seçilmesi önerilmektedir (Padiyar, 2007; Hingorani ve Gyugyi, 2000).

Tez kapsamında TCSC kontrolü olarak akım kontrolü seçilmiştir. Bu kontrolde ölçüm noktasından alınan akım değerleri filtreye sokulduktan sonra PI sistemi kullanılarak kontrol edilmiştir. Kontrol diyagramı ve PSCAD'de oluşturulan kontrol blokları aşağıdaki Şekil 2.7'da verilmiştir.



Şekil 2.7. TCSC için gerçekleştirilen akım kontrolü a) kontrol diyagramı b) PSCAD uygulaması

SVC bağlandığı noktanın gerilimini referans değer gerilimine yaklaştırmaya çalışır. Hızlı bir gerilim kontrolü vardır ve bu sayede kararlılığı arttırır. SVC uygulamasına ilişkin kontrol diyagramı ve PSCAD'de oluşturulan kontrol blokları aşağıdaki Şekil 2.8'de verilmiştir.



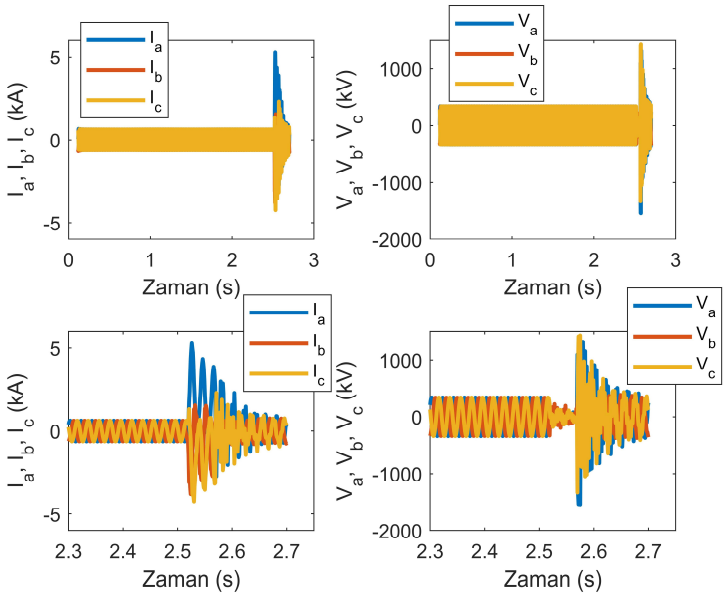
Şekil 2.8. SVC için gerçekleştirilen gerilim kontrolü a) kontrol diyagramı b) PSCAD uygulaması

SVC ve TCSC cihazlarının kontrolünün PSCAD modellenmesinde kullanılan parametreleri sırasıyla Ek-A ve Ek-B başlıkları altında ekler bölümünde verilmiştir.

3. GÜÇ SALINIMLARI

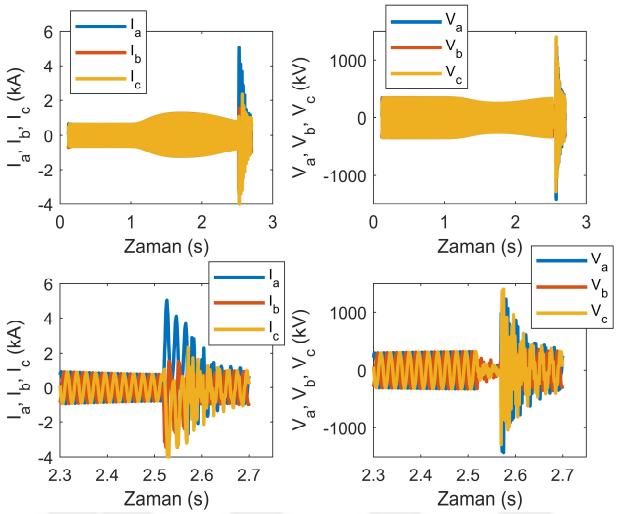
3.1. Güç Salınımları Tanımı

Güç sistemlerinde, üretim ve tüketim dengesinin arıza, hat kopması veya benzeri bir etkiyle bozulması nedeniyle güç salınımları oluşabilmektedir. Bu salınımlar mesafe rölelerinin çalışmasını etkileyen durumlardan biridir. Güç salınımı durumunda röle tarafından hesaplanan empedans, arıza durumunda olduğu gibi çok küçük değerlere düşerek açmaya sebep verebilir. Mesafe rölesinin çalışmasını etkileyen salınımları iki başlık altında verebiliriz. Bunlar kararlı güç salınımları ve kararsız güç salınımlarıdır. Kararlı salınımlar, bir müdahaleye gerek kalmadan kendi kendine sönebilen güç salınımlarına denir. Kararsız salınımlar ise bir müdahale olmadığı durumda güç sistemini kararsızlığa sürükleyebilen salınımlardır. Salınımlar ve güç sistemine etkisinin anlaşılabilmesi için bir örnek oluşturulmuştur, korunan hattın ortasında 2,5s'de bir 50 ms süren bir arıza gerçekleştirilmiştir, bu arıza farklı salınım ve salınım olmayan durumlarda denenmiştir, salınım 1s süresinde başlamakta ve uygulamanın kalanında devam etmektedir. Bu örneğe ilişkin korunan röle tarafından ölçülen gerilim, akım değerleri ve arızaya odaklanmış gösterimleri, salınım olmayan durum için Şekil 3.1 grafikleri, 1,5Hz salınım durumu için Şekil 3.2 grafikleri, 5,5Hz salınım durumu için Şekil 3.3 grafikleri ve 10Hz salınım senaryosu Şekil 3.4 grafikleri ile gösterilmiştir.



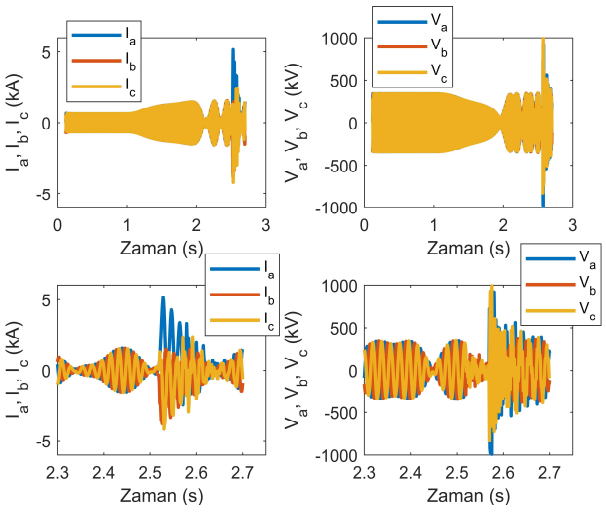
Şekil 3.1. Salınım olmayan durum için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması

Şekil 3.1'de verilen salınım olmayan durumda arıza anında akımın yükselmesi ve gerilim değerinin düşmesi gözlenmektedir. Arıza durumu sona erdiğinde ise bozucu etkiler bir süre devam etmiş daha sonra arıza öncesi duruma dönülmeye başlandığı görülmektedir.



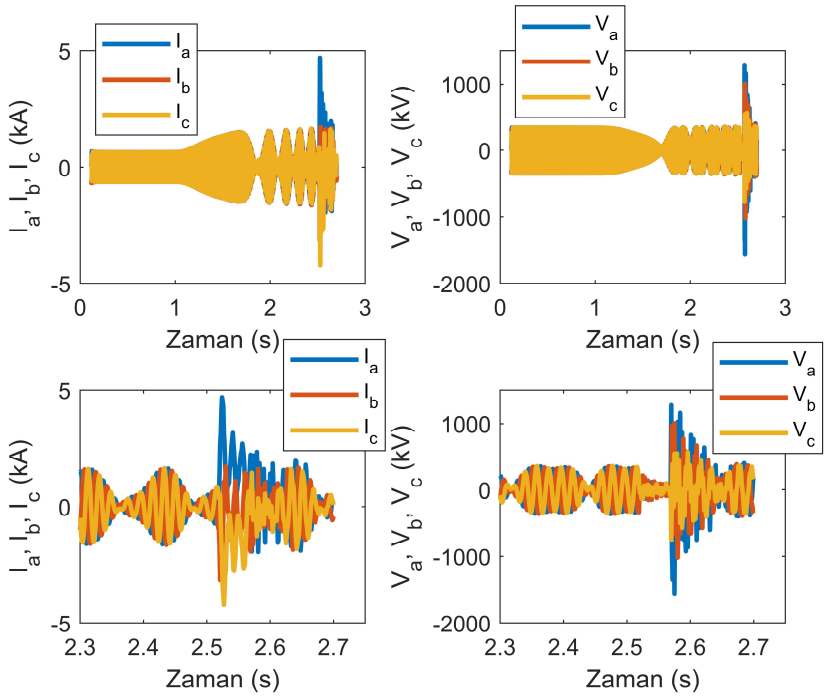
Şekil 3.2. 1,5Hz salınım durumu için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması

Şekil 3.2'de verilen 1,5Hz salınım görülmektedir, kararlı bir salınım olduğu düşük frekanslı olduğundan ve kararlı duruma yaklaştığından belli olmaktadır. Yakınlaşmış durumda salınım olmayan durum ile grafiklerin farkının az olduğu gözlenebilir. Salınım anında akımın yükselmesi ve gerilimin düşmesi durumları gözlenmiştir, arıza durumu kadar hızlı ve güçlü bir değişim olmasa da mesafe rölesinin koruma bölgesine girebileceği görülebilir.



Şekil 3.3. 5,5Hz salınım durumu için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması

Şekil 3.3'te kararsız salınım görülmektedir, frekansı 5,5Hz'dir. Salınım durumunda gözlenen akım ve gerilim şekillerinin arıza anına yakın bir davranış sergilediği görülmektedir, özellikle arıza direncinin yüksek olduğu durumlarda daha da yakın olması durumu yaşanabilir. Bu akım ve gerilim değişimleri mesafe röleleri tarafından arıza olarak algılanmaktadır.



Şekil 3.4. 10Hz salınım durumu için akım ve gerilim grafikleri ve arıza durumu için yakınlaştırılması

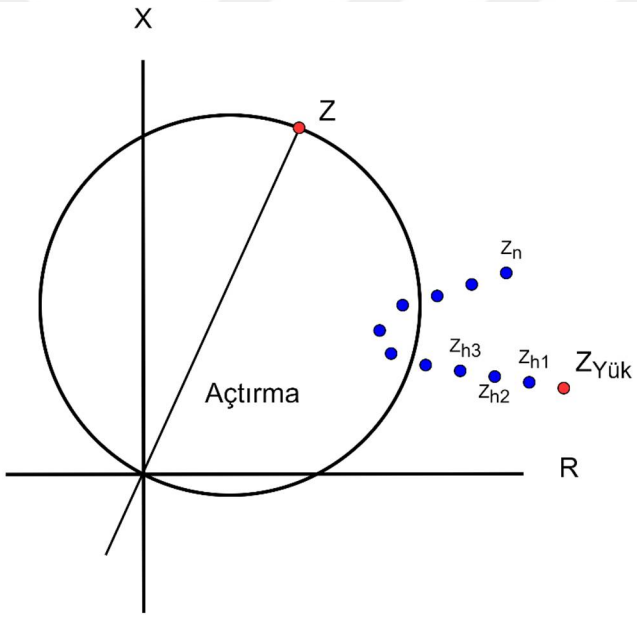
Şekil 3.4'te mesafe rölesinin algılaması gereken sınır frekansta, 10Hz'lik bir salınım görülmektedir. Arıza direnci ihmal edilebilecek seviyede olan bu test sisteminde görülen akım ve gerilim arızaya çok yakın seyretmektedir.

Yukarıda verilen şekillerde görüldüğü üzere salınımlarda da arıza durumuna benzer bir gerilim düşmesi ve akımın yükselmesi durumu vardır. Mesafe koruma rölelerinin bu durumları arıza olarak görmesi olasıdır, ek olarak arızanın daha uzakta ve arıza direncinin yüksek olması gibi arıza anında değişen gerilim ve akımı etkileyen faktörler, güç salınımı ve arızayı değer olarak birbirine yaklaştıracaktır.

Güç sistemlerinde güç salınımları gibi bozucuların etkisi generatörün elektromanyetik güç çıkışı ve ivmelenme gücü ile gözlenir. Sürekli durumda generatörün elektromanyetik

güç çıkışı (P_e) ile generatörün mekanik türbin gücü (P_m) eşitliği vardır, ivmelenme yoktur (P_a). Bozucular (sistemin thevenin gerilimi ve reaktansı gibi eşitlikteki güç bileşenlerini etkileyen) bu güç eşitliğini bozar. Ortaya çıkan bu etki rotor açısal hızında bir düşmeye yol açtığı durumda bu açıda salınımlar oluşur ve güç salınımlarına yol açabilir.

Güç salınımları, görülen empedansı etkileyerek mesafe rölesinin çalışmasını olumsuz etkileyebilir (Clarke, 1945; Warrington ve Van 1949). Mesafe rölesinin arıza olmadığı durumda 10Hz'e kadar olan salınımlarda istenmeyen açma yapmaması gereklidir (Warrington ve Van 1943; IEEE Power System Relaying Committee, 2005). Bir güç salınımı altında empedans değişimi ve mesafe rölesinin koruma bölgesine göre durumu aşağıda Şekil 3.5'de verilen R-X diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Güç salınımı ve örnek R-X mesafe rölesi karakteristiği (Tekdemir, 2017)

Röle kısmında kullanılan hesaplanan empedanslar Z_h değerleri ile belirtilmiştir. Başlangıçta yüklenme durumu olduğu gözükmektedir ve açtırma bölgesi dışındadır. Ancak bir güç salınımı etkisi ile açtırma bölgesine girilmiştir. Bu durumda açtırma yapılmaması için ek bir metot gerekliliği vardır. Güç salınımı durumunda bloke ediciler bu amaçla geliştirilmiştir. Temel güç salınımı durumunda bloke ediciler empedans değişim hızına bakarak, arıza ile salınımı ayırt etmeyi amaçlar. Arıza durumunda bu değişim daha hızlı olduğundan bir referans ile arıza ve salınımın ayırt edilmesi mantığı ile çalışmaktadır. Bu metot, değişim hızı referanstan büyük ise arıza olarak etiketler ve

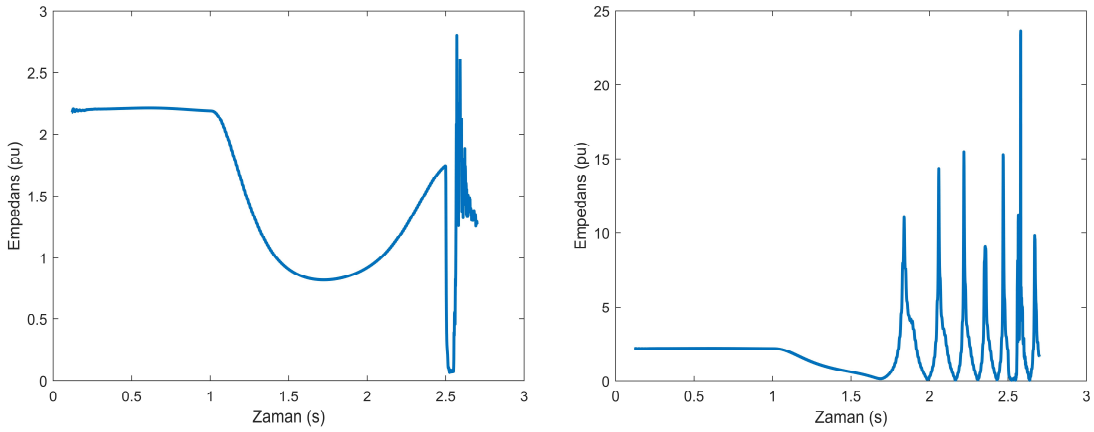
mesafe koruma rölesinin çalışmasına izin verir, değişim hızı referanstan küçük ise salınım olarak etiketler ve mesafe koruma rölesinin çalışmasını engeller (Kezunovic ve diğ., 2016).

Güç salınımları durumunda mesafe rölesini destekleyen bu bloke ediciler, modern mesafe rölelerine eklenen bir fonksiyondur. Temel görevleri 10Hz altında bulunan güç salınımlarında mesafe rölesinin çalışmasını engellemektir, ancak salınım anında da arıza oluşabilmektedir, bu durumda bloke edicilerin arıza durumunu tespit ederek mesafe rölesinin çalışmasına izin vermesi beklenir.

3.2. Geleneksel Güç Salınımları Durumunda Bloke Ediciler

Mesafe rölelerinin doğru çalışması güç sisteminin sürekliliği için önemlidir, bu nedenle güç salınımları gibi bozucuların rölenin çalışmasına etkisinin dikkate alınması gerekir. Güç salınımlarında mesafe rölesinin kesiciye açma vermesini bloke eden ve arıza anında bu bloke etme işlemini kaldıran yöntemler rölenin doğru çalışmasını sağlamak için geliştirilmiştir. Çoğu yöntemin temelini oluşturan ve hala kullanılan geleneksel güç salınımı durumunda bloke ediciler, bu yöntemlerin çalışmasını anlamak için önemlidir. Geleneksel güç salınımı durumunda bloke ediciler olarak azalan empedans yöntemi, Vcosφ yöntemi, direnç değişimi yöntemi ve bindirilmiş akım yöntemi geleneksel yöntemler olarak verilmektedir (Esmaeilian ve diğ., 2011; Tekdemir ve Alboyacı 2014; Moravej ve diğ., 2015).

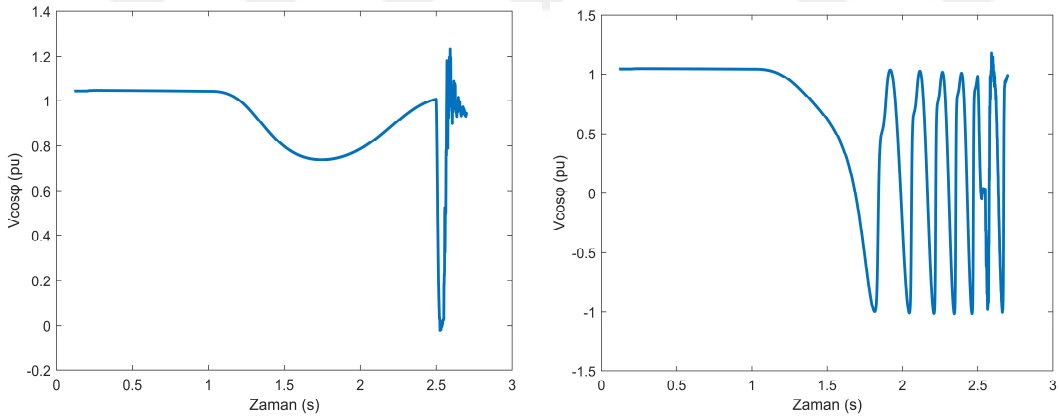
Azalan empedans yöntemi, salınım anında empedans değerinin düşme hızını temel alan bir uygulamadır. Bir eşik değeri belirlenerek arıza veya salınım olduğu konusunda yorum yapılabilmektedir. Bu yöntemde doğru ve uygun eşik değerin belirlenmesi çok önemlidir. Empedans değişiminin kararlı ve kararsız salınımlar altındaki değişimi Şekil 3.6'te verilmiştir. Salınım 1. saniyede oluşmuş ve 2,5. saniyede 50mslik bir arıza gerçekleşmiştir.



a) b)

Şekil 3.6. Empedans değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım

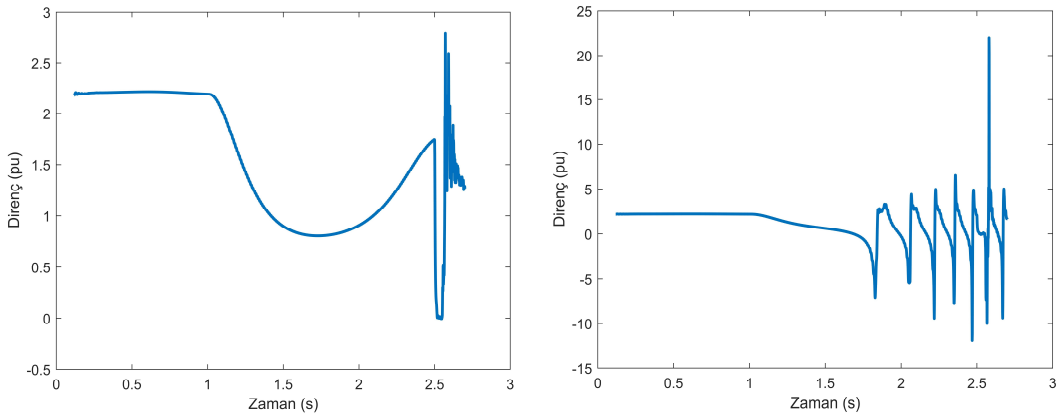
Vcosφ yöntemi, salınım anında sistemdeki birçok elektriksel bileşen değişmektedir, Vcosφ'de bu bileşenlerden biridir. V hat başı gerilimini, φ ise gerilim ile akım arasındaki faz farkını ifade etmektedir. Bu değerin türevi yine bir eşik değer ile karşılaştırılarak salınım olup olmadığı belirlenmektedir. Vcosφ değişiminin kararlı ve kararsız salınımlar altındaki değişimi Şekil 3.7'te verilmiştir. Salınım 1. saniyede oluşmuş ve 2,5. saniyede 50mslik bir arıza gerçekleşmiştir. Bu grafikte alınan gerilim, pozitif bileşen gerilimidir.



a) b)

Şekil 3.7. Vcosφ değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım

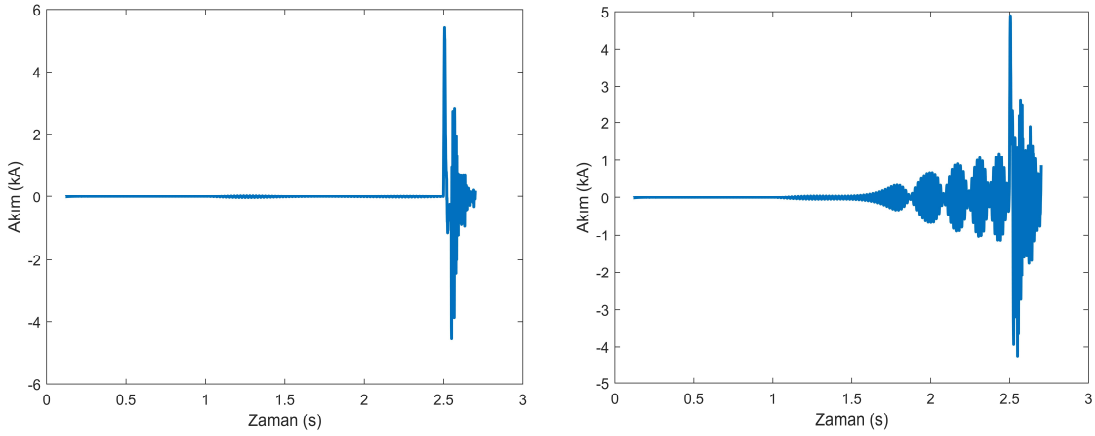
Direnç değişimi yöntemi, azalan empedans yöntemine benzer çalışmaktadır, bir referans ile hız karşılaştırılır. Ancak empedansın imajiner kısmı bu yöntemde dikkate alınmamış, sadece direnç değişim hızı yorumlanmıştır. Direnç değişiminin kararlı ve kararsız salınımlar altındaki değişimi Şekil 3.8'te verilmiştir. Salınım 1. saniyede oluşmuş ve 2,5. saniyede 50mslik bir arıza gerçekleşmiştir.



a) b)

Şekil 3.8. Direnç değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım

Bindirilmiş akım yöntemi, ölçülen akımın bir önceki periyottaki akım değeri ile farkına dayalı bir uygulamadır. Bu fark yani bindirilmiş akım, güç salınımlarında daha düşük seviyede ilerlerken, arıza anında daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Yine bir eşik değeri ile yorumlanır. Akımın bir önceki periyottaki akım değeri ile farkının değişiminin kararlı ve kararsız salınımlar altındaki değişimi Şekil 3.9'te verilmiştir. Salınım 1. saniyede oluşmuş ve 2,5. saniyede 50mslik bir arıza gerçekleşmiştir. Sadece bir fazın akım farkı gösterilmiştir.

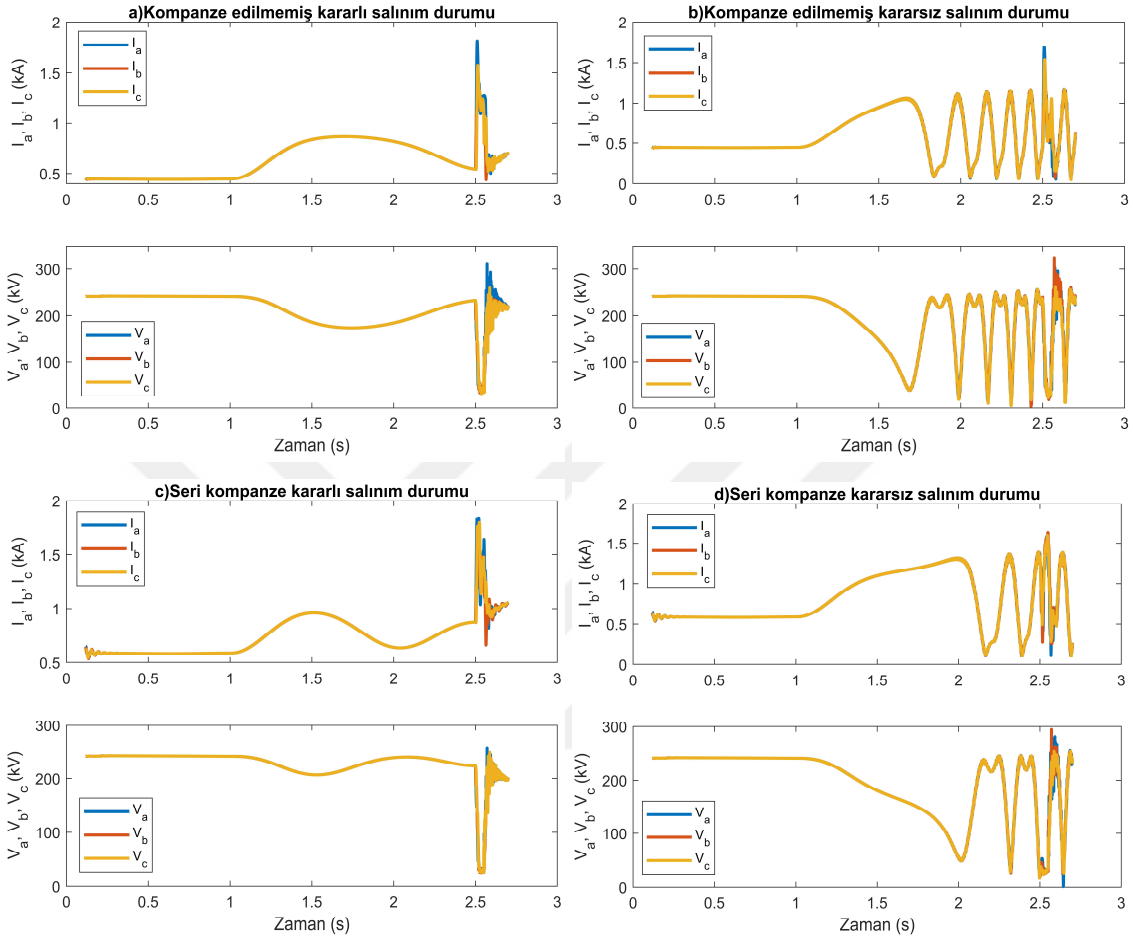


a) b)

Şekil 3.9. Akım farkı değişimi; a) kararlı salınım b) kararsız salınım

Geleneksel çalışmalarda eşik değer seçiminin sonucu etkileyeceği görülebilmektedir. Buna ek olarak kompanzasyon uygulamalarında da bu çalışmaların nasıl sonuçlar vereceğini gözlemlemek gerekir. İlgili uygulamalar sistemin mesafe rölesi noktasından alınan akım ve gerilim ölçümlerine dayanmaktadır, bu ölçümlerin kompanze edilmemiş

ve seri kompanzasyon durumları için değişimlerine bakacak olursak, oluşacak etki görülmektedir. Şekil 3.10'te akım ve gerilimin RMS değerleri kompanze edilmemiş ve seri kompanze edilmiş durum için kararlı ve kararsız salınım durumlarında verilmiştir.



Şekil 3.10. Farklı kompanzasyon ve salınım durumlarına göre akım ve gerilim grafikleri

Şekil 3.10'da kompanze edilmiş ve kompanze edilmemiş durumlar arasındaki farklar görülmektedir. Bozucu 1.s'de gerçekleştirilmiş, 2.5s'de ise 50ms'lik bir arıza oluşmuştur. Her senaryoda arıza noktası ve salınım frekansı aynıdır. Kompanze edilmiş durumda arıza anında akımda oluşan tepenin, salınım durumunda oluşan akım tepelerine daha yakın olduğu görülür. Ayrıca bozucu anından ilk çukur oluşmasına kadar geçen sürede değişmiştir. Bu farklılıkların yöntemleri etkileyeceği açıktır.

(Esmaeilian ve diğ., 2011) farklı senaryolar için Vcosφ ve azalan empedans yöntemini karşılaştırmıştır. Karşılaştırmada 7Hz'e kadar salınımlar dikkate alınmış ve detaylı analiz asimetrik arıza için yapılmıştır. Asimetrik arızalarda sıfır ve negatif bileşenler dolayısı ile arıza tespitinin daha kolay olduğu, simetrik arızada ise salınım ve arızayı ayırt etmenin

zor olduğu ve çalışmaların buna yoğunlaştığı bilinmektedir. Buna rağmen salınımı çok geç tespit ettikleri, salınım ve arızanın ardı ardına olduğu durumları dikkate almadıkları gözlenmiştir. Azalan empedans yöntemi hatalı olarak arıza anında röleyi bloke etmiş, salınım durumunda ise çalışmasına izin vermiştir. Vcosφ yöntemi ise özellikle kompanzasyonlu durumda 370mslere (kompanze edilmemiş durumda 250ms) kadar bir gecikme ile salınımı bulmaktadır, bu 20 periyottan uzun bir süreye denk gelmektedir ve özellikle 7Hz'lik bir salınımda rölenin bloke edilmeden salınımda açma verdirmesi mümkündür. (Tekdemir ve Alboyacı, 2014) geleneksel algoritmaları kompanze edilmemiş sistemde kararsız güç salınımı altında incelemiştir. Bu çalışmada ise azalan empedans yönteminin daha iyi sonuç verdiğini ama genel olarak geleneksel yöntemlerin yetersiz olduğu sonucu çıkarılmıştır. Çalışmada salınım ve arıza ayırımı yapmak için seçilen eşik değerlerin seçiminin zor olduğu bu nedenle yöntemlerin başarılarının düştüğü vurgulanmıştır. Bu örneklerle geleneksel yöntemlerin salınım ve arıza tespitinde zorlandıkları, özellikle kompanzasyondan olumsuz etkilendikleri ve test sistemi koşullarına göre doğruluk oranlarının değiştiği, güvenilir olmadıkları gözlenmiştir.

4. GÜÇ SALINIMLARI ALTINDA ARIZA TESPİTİ

Güç salınımları altında arızanın tespit edilmesi için belli ölçümlerin yapılması gereklidir. Bu alınan ölçümler, işlenmeden veya işlenerek kullanılıp analiz edilebilirler. Bu ham veya işlenmiş veriler, daha önce elde edilen veya hesaplanan değerler ile karşılaştırılıp yorumlanır.

Birden fazla test sistemi kullanarak, farklı senaryolar altında arıza başlangıç anında ve arıza sonu anında incelenen gerilim ve akım ölçümleri ve bu ölçümlerden elde edilen harmonik ve güç değerleri incelenmiştir. Bu değerlerden senaryolar boyunca tutarlı bir cevap verenleri analiz edilerek, zarf yöntemi yardımıyla arıza anlarında oluşacak değişimi minimum gecikme ile tespit etmek üzerine çalışılmıştır. Buna bağlı olarak hem karşılaştırılacak referans değerler belirlenmiş hem de arıza anını ve arıza sonu durumunu mümkün olduğunca az gecikme ile tespit edecek parametreler belirlenmiştir.

4.1. Yöntem Parametrelerinin Eldesinde Kullanılan Uygulamalar

Mesafe koruma röleleri noktasından, üç faz akım ve gerilim ölçümleri alınır. Bu ölçümler anlık gelen veriler ile işlenmeden kullanılabileceği gibi Dalgacık Teorisi veya Fourier Teorisi ile işlendikten sonra kullanılmaları da sık rastlanır. Uygulamamızda, Fourier Teorisine dayanan Ayrık Fourier Dönüşümü temel alınarak kayan pencere mantığı ile gerilim ve akım ölçümleri işlenmiştir. Alınan değerlerin karşılaştırılması ve yorumlanması için toplanan verilerden bir eğri oluşumunu sağlayan zarf yöntemi de bu çalışma için bir temel oluşturmuştur.

4.1.1. Ayrık Fourier Dönüşümü Tabanlı Kayan Pencere

İletim hatlarında, arıza ve güç salınımı gibi olayları inceleyen yöntemler akım ve gerilim ölçümlerine ihtiyaç duyarlar. Alınan bu ölçümler zaman domenindedir. Bu verilerin frekansa dayalı incelenebilmesi için frekans domenine dönüştürülmeleri gerekmektedir. Fazörel dönüşüm için bazı tanımların yapılması gerekmektedir, bunlardan başlıca olanı örneklemedir. Baradan ölçülen akım ve gerilim değerleri analog işaretlerdir. Bu analog işaretlerin süreksiz özellikte ayrık işaretlere dönüşmesi gerekmektedir, bu duruma örnekleme denilir. Zaman domenindeki sürekli bir sinüzoidal işaretin (y(t)) k. örnek için ifadesi (y(k)) aşağıda Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de gösterilmiştir.

$$y(t)=Y_m\sin(2\pi f_0 t+\varphi) \quad (4.1)$$

$$y(k)=Y_m\sin(2\pi f_0(k\Delta t+\varphi)) \quad (4.2)$$

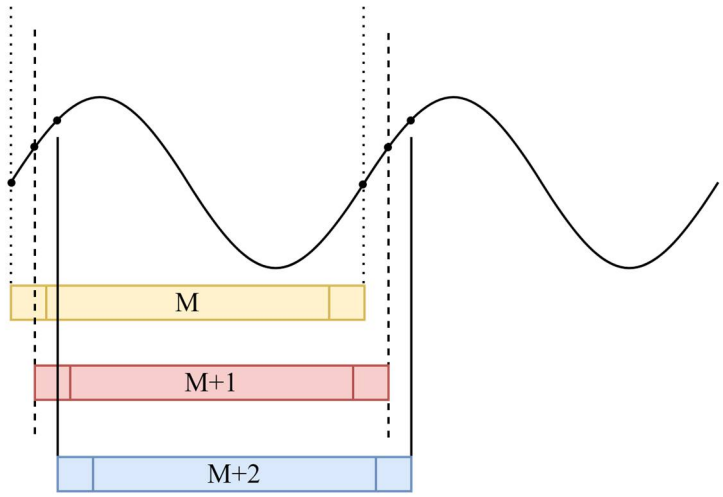
Δt örnekleme aralığı, f_0 ise işaretin frekansıdır. İlgili işaret için ayrık Fourier dönüşümü kullanımında aşağıdaki Denklem (4.3) ile elde edilir.

$$y(k\Delta t)=\sum_{k=0}^{N-1} Y(hw)e^{jkhw\Delta t} \quad (4.3)$$

Burada h harmonik derecesi, k asal sayı ve N işaretin bir periyottaki örnek sayısıdır. Çalışma kapsamında DC bileşen ve 5. harmonik değerleri kullanılmıştır, formülde sırasıyla 0 ve 5 değerleri h ifadesi yerine eklenerek ilgili bileşenler elde edilebilir. Ayrık örnekleme, tam periyot veya yarım periyot fazör gösterimi ile kullanılır. Bu tezde tam periyot fazör gösterim kullanıldığından, sadece bu fazör gösterimi tanıtılacaktır. Denklem (4.4)'de daha kolay anlaşılabilmesi için temel bileşenin fazör gösterimi verilmiştir, h çarpanı bu nedenle 1 alınmıştır. DC ve 5. harmonik bileşenlerin ifadesi için $e^{-jk2\pi/N}$ yerine sırasıyla e^0 ve $e^{-j5k2\pi/N}$ yazılması yeterlidir.

$$Ye^{-j\varphi}=\frac{2Y_1}{\sqrt{2}N}=\frac{2}{\sqrt{2}N}\sum_{k=0}^{N-1} y(k\Delta t)e^{-jk2\pi/N} \quad (4.4)$$

Bu dönüşümden kayan pencereye geçmek durumunu açıklamak için öncelikle M başlangıç örneğine sahip bir sinyalin her periyot bir pencere olacak şekilde gösterimi faydalı olacaktır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. M başlangıç örneğine sahip bir sinyalin her periyot bir pencere olacak şekilde gösterimi

Şekilde verilen kayan pencere tam periyot fazörel dönüşüm ile ifade edilmek istenirse aşağıda verilen Denklem (4.5) elde edilir.

$$Y^{(M,(M+N-1)} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=M}^{M+N-1} y_k e^{-jk\theta_s} \quad (4.5)$$

Burada $y(k\Delta t)=y_k$ ve $2\pi/N=\theta_s$ olarak alınmıştır. Yukarıda verilen denklem ayrık Fourier dönüşümü tabanlı kayan pencere ifadesi olarak kullanılmaktadır. İlgili denklem kullanılarak, akım ve gerilimin fazörel değerleri, ilk periyoda eklenen her bir örneğe bağlı olarak kayan pencere şeklinde yenilenerek toplam örnekleme sayısı için çıkartılabilir.

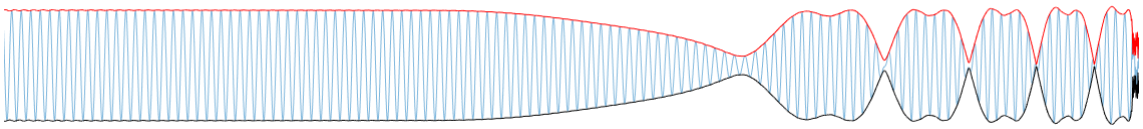
Çalışma kapsamında bir periyotluk pencereler şeklinde güç sistemi ölçümlerine ayrık Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Gözlenmek istenen salınımlar, mesafe rölesinin çalışmasında dikkate aldığımız için 10Hz ve altındadır. Pencere bir periyot olduğu için salınım durumlarında da DC bileşenler gözlenmiştir. Daha uzun periyotluk bir pencere ile bakılması durumunda bu DC bileşenler salınım durumunda gözlenmez.

4.1.2. Zarf Uygulaması

Zarf uygulaması sinyalleri veya verileri yorumlamak için kullanılan bir yöntemdir. Uygulama genel olarak ilgili sinyal veya verinin tümünün veya belli bir kısmının maksimum değer, minimum değer veya benzeri değerlerini belli aralıklar ile belirleyip buna bağlı bir analiz yapılmasını amaçlar.

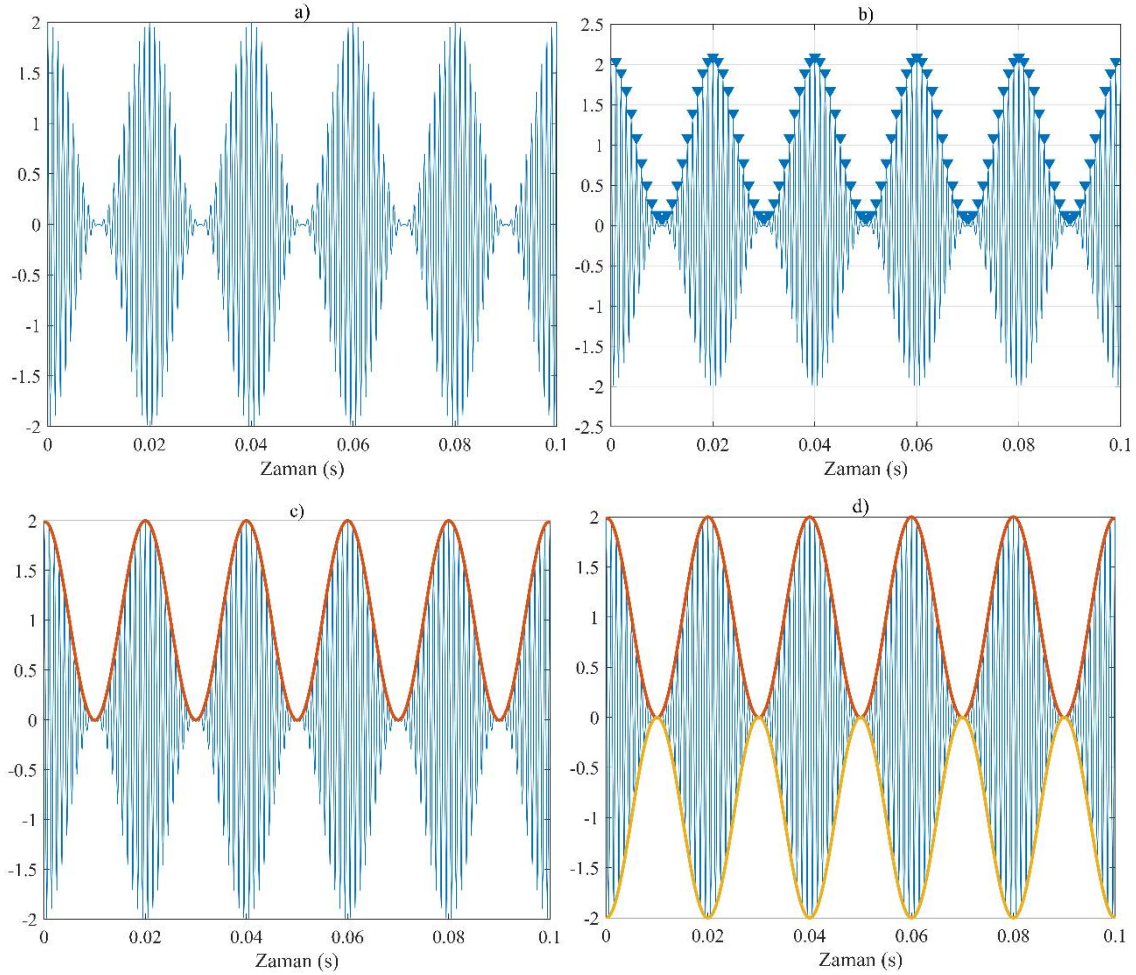
Zarf uygulaması farklı yöntemleri temel alarak geliştirilebilen bir uygulamadır. Zarfları elde etmek için kullanılan her yöntemin kendi avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Çalışmamızda MATLAB programını kullanarak analizler gerçekleştirildiğinden, çalışma kapsamında kullanılacak ve araştırılan zarf yöntemleri için Hilbert dönüşümünü tabanlı, RMS tabanlı ve tepe değeri tabanlı uygulamalara yönelinmesine yol açıldığı söylenebilir.

Zarf bir nevi eğri uydurma olarak düşünülebilinir. Bir sinüs sinyalini ele alırsak hem pozitif hem negatif alternanstan iki eğri uydurmak mümkündür. Zarf uygulamasında bu iki duruma sırasıyla üst zarf ve alt zarf denilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Bir sinyalin alt ve üst zarfı

Bu üst ve alt zarflar çizilirken, Hilbert dönüşümü, ilgili sinyalin tepe noktası veya RMS değeri kullanılmaktadır. Bu durum bize geniş bir analiz yelpazesi sunmaktadır. Tepe değeri tabanlı zarfın gerçekleştirilmesi Şekil 4.3'te bir örnekle verilmiştir.

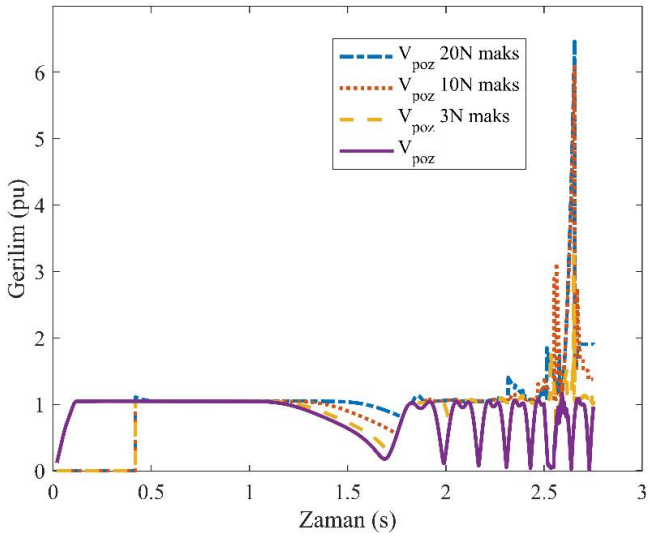


Şekil 4.3. Tepe noktası tabanlı bir zarf uygulaması için a) örnek sinyal, b) örnek sinyalin tepe noktaları, c) tepe noktalarına göre oluşturulan üst zarf, d) üst ve alt zarf

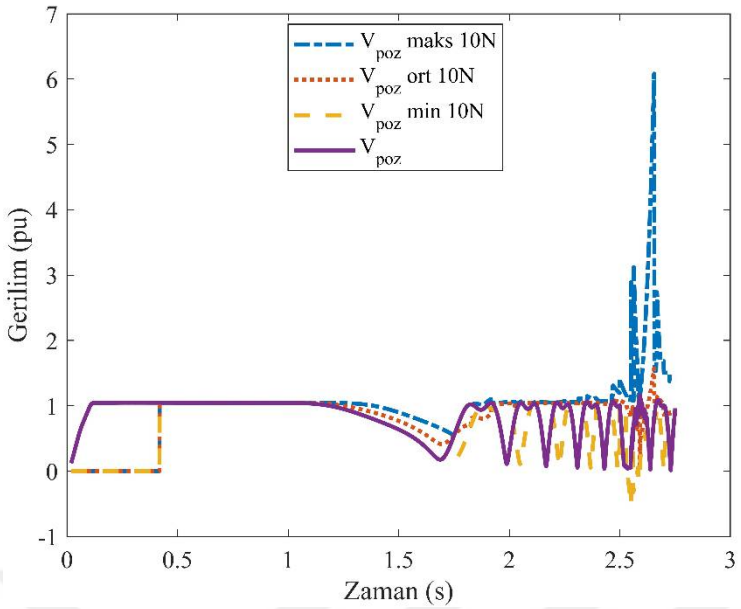
Şekilde a kısmında verilen sinyal üzerinde birinci dereceden bir fark denklemi kullanacak olursak, değerlerin yükselirken azalmaya veya azalırken yükselmeye başladıkları noktalar bulunabilmektedir. Bu çıkarım, sinyalin işareti incelenerek yapılabilir, pozitiften

negatife veya negatiften pozitife dönmesi durumları da tepe olarak işlenebilmektedir. Ayrıca, komşu verilerin değerlerinin karşılaştırılmasıyla tepe ve çukur noktalar belirlenebilir. İlgili sinyalin tepe değerlerini bulacak olursak b kısmında verilen şekli elde ederiz. Bundan sonra yapılması gereken alınan bu sonuçları taban alan bir eğri uydurulması durumudur. Doğrusal interpolasyon ile bu eğri uydurma işlemi tamamlanmaktadır. Bu durum şeklin c kısmında gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü üzere tepe noktaları doğrusal interpolasyondan geçirilerek eğri şeklini almıştır ve üst zarf eldesi yapılmıştır. Çukur/minimum değerler de aynı şekilde işlenerek alt zarf elde edilebilir, şeklin d şıkkında bu elde paylaşılmıştır. Bu zarf oluşumu kullanılırken, c ve d şıklarında çizilen eğrilerde birbirlerine yakın tepe noktaları gözlenmektedir, bunlar belli bir kısımda sıklaşarak genel sonucu etkileyebilir, bu nedenle ayırt edilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla tepeler belli aralıklarla bulunur.

Daha sonraki adım ise ne kadarlık bir veriye ihtiyaç olduğunun belirlenmesidir. Veri büyüklüğü eğrinin nasıl oluşacağını etkiler. Şekil 4.4'te pozitif alternans geriliminin sinyali 3, 10 ve 20 periyotluk veri grupları ile tepe noktaları (maksimum değerler) baz alınarak oluşturulan üst zarflar verilmiştir. Ancak bu zarf bir eğri olduğundan karşılaştırma için ya da bir yorum yapabilmek için araştırılan duruma ilişkin bir kısmının alınması veya incelenmesi gerekmektedir. Bu kısım Şekil 4.5'te 10 periyotluk veri grubundan oluşturulan eğrinin maksimum, minimum ve ortalama değerine bakılarak oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. Farklı veri grupları durumunda gerilimin pozitif bileşeni üst zarfları (maksimum değerleri)



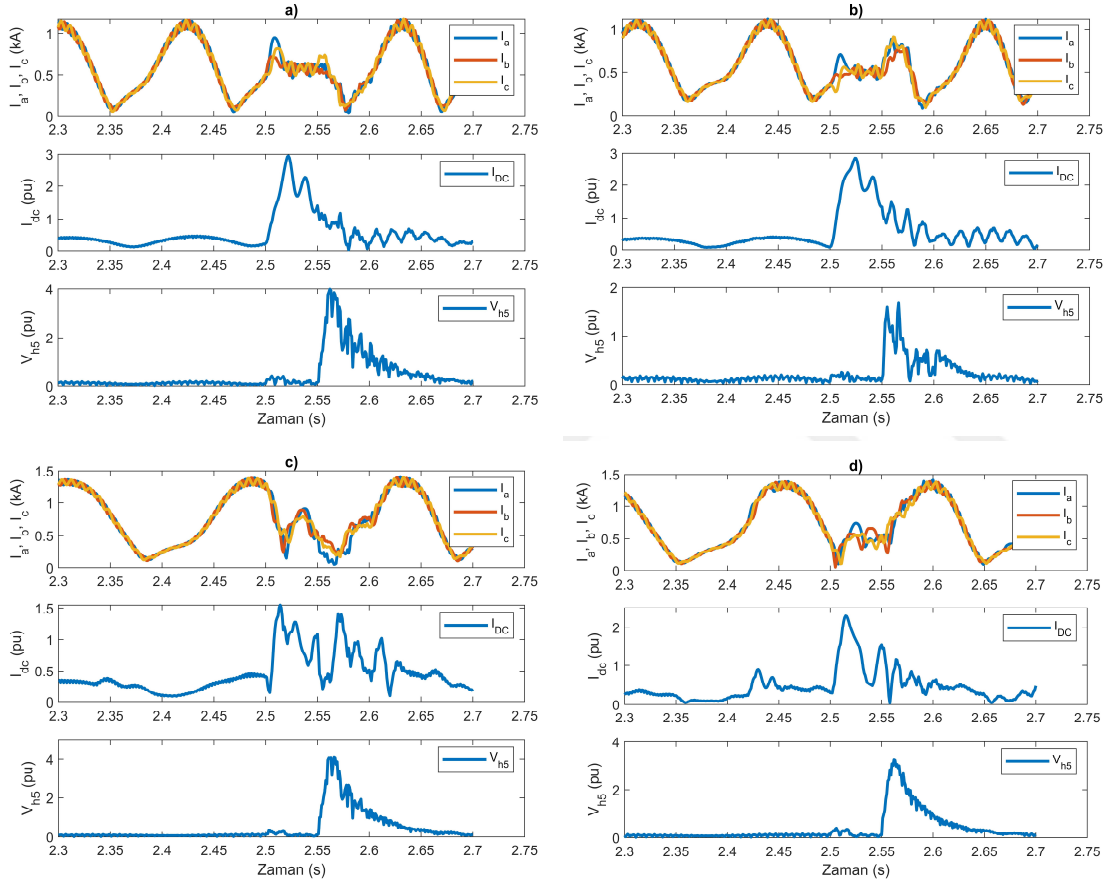
Şekil 4.5. Gerilimin pozitif bileşeninin üst zarfının maksimum, ortalama ve minimum grafikleri (10 periyot örnekleme aralıkları için)

Şekillerde görüldüğü üzere alınan veri topluluğu ve bakılan maksimum, minimum ve ortalama değerler, geniş bir analiz penceresi sunmuştur. Tez kapsamında incelenen güç salınımları ve arıza uygulamaları hem değer olarak hem de güç sistemine etkileri kapsamında test sistemine ve oluşturulan senaryoya göre değişmektedir. Kararlı ve kararsız salınımların akım ve gerilim sinyalleri üzerindeki etkileri uzun periyotlara dağılmış iken arızanın etkileri daha anlık gözlenmektedir. Hem test sistemine göre uyum sağlaması hem de uzun ve kısa etkileri gözlemek ve karşılaştırmak için ideal bir uygulama olması nedeniyle çalışmamızda zarf yöntemi ile oluşan eğrileri kullanılmıştır.

4.2. Önerilen Yöntem için Parametre Tayini

Güç sisteminde güç salınımları altında oluşan arızalar güç sistemlerinde yaşanan önemli sorunlardandır. Salınımların arıza olarak görülmemesi ve salınımın sönümlenmesi ile ilgili adımların atılması gerekmektedir, arıza durumunda ise mesafe rölesinin ilgili ayarı uyarınca çalışması gerekmektedir. Mesafe rölesinin yedek koruma çalışması da bu kısımda dikkate alınmalıdır. Çalışmamızda bu amaçla salınım altında veya salınım olmayan durumda arızayı algılayan ve salınımları arıza olarak algılamayan, aynı zamanda yedek korumayı desteklemek adına arıza sonunun da tespit edildiği bir yöntem geliştirilmiştir.

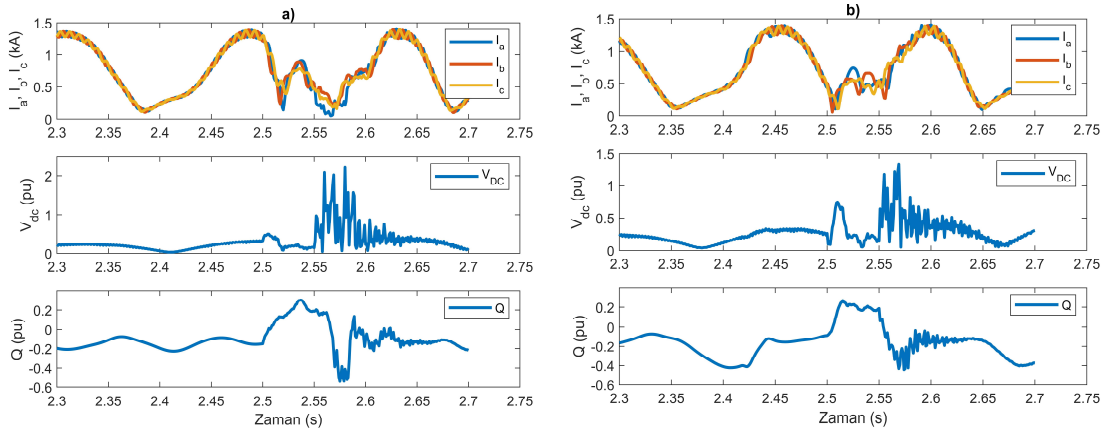
Yapılan çalışmada, röle noktasından alınan üç faz akım ve gerilim ölçümleri kullanılır. Örneklenmiş değerlere ayrık Fourier dönüşümü uygulanarak akım ve gerilimin dc bileşeni, temel bileşeni ve harmonik bileşenleri elde edilir. Geliştirilen yöntemde temel parametreler belirlenirken farklı sistem koşulları ve bu durumdaki zarf eğrilerinin cevapları gözlemlenmiştir. Arıza anında I_{dc} ve V_{h5} değerleri ve değişimleri bu kapsamda dikkat çekmiştir. Bu değerlerin arıza durumundaki davranışlarını gösterebilmek için röle noktasına en uzak korunan hatta, kararsız salınım durumunda, 2,5s'de 50ms süren bir arıza oluşturulmuş ve bu değerler, ölçülen RMS akım değerleri ile Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. a) Kompanze edilmemiş, b) SVC ile kompanze edilmiş, c) SC ile kompanze edilmiş ve d) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda I_a, I_b ve I_c faz akımları, I_{dc} ve V_{h5} değerleri

İncelenen sistemde oluşabilecek bir arızada, arıza başlangıç anını belirlemede dc bileşen akımın (I_{dc}) çok etkili olduğu görülürken, özellikle seri kompanze edilmiş sistemlerde dc akımın tek başına yeterli olmadığı ve gerilimin dc bileşeninin de (V_{dc}) diğer bir parametre olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu iki parametreye ilaveten kompanzasyon noktasına yakın

noktada oluşabilecek arızaların tespitinde yardımcı olacak reaktif gücün işareti (Qk_{sgn}) parametresi ile mesafe koruma rölesinin 1. bölge dışındaki arızaların belirlenmesinde de gerilimin 5. harmonik bileşeni (V_{h5}) parametresi kullanılmıştır. Eklenen V_{dc} bileşen ve reaktif gücün işaret değişimini anlamak için reaktif güç grafiklerinin arıza altındaki şekilleri Şekil 4.7'de yine RMS hat akımları ile verilmiştir.



Şekil 4.7. a) SC ile kompanze edilmiş ve b) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda I_a, I_b ve I_c faz akımları, V_{dc} ve Q değerleri

Şekilden görüldüğü üzere arıza anında V_{dc} ve Q işaretinde seri kompanzasyon durumunda değişimler olmaktadır, tek başına izlendiğinde arıza durumuna ilişkin çıkarım yapmak zorda olsa I_{dc} bileşenini ile birlikte yorumlandığında arıza anını yakalamak için kullanılabilirler. Seri kompanze sistemlerde oluşan I_{dc} tepe noktasının değer olarak düşük olması nedeniyle, V_{dc} ve reaktif güç işareti izleyicisinin kullanımı önem kazanmaktadır.

Takip edilen değerlerin her fazdaki etkisinin daha iyi gözlemesi için bu parametreler ilk adımda Denklem (4.6), (4.7), (4.8) ve (4.9) şekilde oluşturulmuştur.

$$I_{dc}(n)= \left| Ia_{dc}(n) \right| + \left| Ib_{dc}(n) \right| + \left| Ic_{dc}(n) \right| \quad (4.6)$$

$$V_{dc}(n)= \left| Va_{dc}(n) \right| + \left| Vb_{dc}(n) \right| + \left| Vc_{dc}(n) \right| \quad (4.7)$$

$$V_{h5}(n)= \left| Va_{h5}(n) \right| + \left| Vb_{h5}(n) \right| + \left| Vc_{h5}(n) \right| \quad (4.8)$$

$$Qk_{sgn}(n)=sbtQ_{sgn} \times Q_{sgn}(n) \quad (4.9)$$

Burada n alınan ayrık dönüştürülen pencerenin sayısıdır, $sbtQ_{sgn}$ ise reaktif güç işaretinin arızasız durumdaki değeridir. Reaktif güç işareti dışında elde edilen değerler pu

cinsindendir. Değinilmesi gereken önemli bir konu da I_{dc}'nin sisteme bağımlı olması durumudur, özellikle kompanzasyon durumu bu akımın minimum ve maksimum noktalarını etkilemektedir. Ayrıca, I_{dc} değerinin sıfır veya sıfıra çok yakın bir değerde de çıkması yöntemi kararsızlığa sürüklemektedir. Hesaplanan I_{dc} değeri karşılaştırmada kullanılıp buna bağlı olarak bir yorum yapılacağından ve kararsızlığı önlemek için elde edilen minimum ve maksimum değerlerin y ekseninde kaydırılması gerekmektedir. Bu kaydırma işlemi iki durum için sınırlandırılmaktadır, bu durumlar kompanze edilmemiş ve kompanzasyonlu durumlardır. Sinyal kaydırma kısaca sinyali y ekseninde iteleme işlemidir, bu sayede sıfır ve sıfıra yakınsayan sonuçlar bir değerine yaklaşacak ve kararsızlık ortadan kalkacaktır, ek olarak dış etkenlerden dolayı düşük değerler alan tepe değerleri düzeltme işlevi de bu kısımda görülecektir. Ayrıca, V_{dc} ve Qk_{sgn} değerleri ve buna bağlı parametrelerinde sadece kompanzasyon durumunda etkili olduğu göz önüne alınırsa, elde edeceğimiz parametrelerden hem kompanze edilmemiş durum hem de kompanzasyonlu durum için iki farklı yaklaşım ile sonuca ulaşacağımız açıktır.

Kompanze edilmemiş iletim hatları için olan durumda I_{dc} ve V_{h5}'e bağlı parametreler yeterli olmaktadır, kompanzasyon durumunda ise Q_{sgn} ve V_{dc} parametreleri de yönteme eklenmektedir. Bu kısımda maksimum ve zarf durumları devreye girmektedir. Hem DC akımın hem de beşinci harmonik gerilimin bir periyottaki maksimum değerleri karşılaştırmalar için uygundur. Bunun nedeni maksimum noktalarının birkaç örnek geç görülebilmesidir. Alt ve üst zarflar ise arıza durumunun belirlenmesi için karşılaştırma, referans değeri görmektedir. Kararlı salınımların etkilerinden arınmış bir referans için 20 periyotluk bir zarf oluşturulmuştur, kararsız salınımın etkilerinden arınmış bir referans için ise 10 periyotluk bir zarf oluşturulmuştur. Bu zarflar genel olarak arıza tespiti için yeterli olmaktadır. Yedek koruma için arıza sonunun tespitinde ise yine 10 periyotluk bir zarf yeterlidir. Ancak arıza başlangıcında da bazen 5. harmonik gerilim değeri görülebilmektedir, bu arıza sonunun tespitini geciktirmektedir, yine bu durumlarda arıza sonunda 5. harmonik gerilim çok yüksek değerlere çıkmaktadır, bu durumda arıza öncesi alınan bir örnek ile karşılaştırma yeterli olacaktır. Son olarak arıza sonunda, arıza başlangıcında 5. harmonik gerilim görülebildiği gibi, arıza sonunda da I_{dc} akım tepesi görülebilir ve bu tepe uzun süreli olarak inmeyebilir. Bu durumun ayırt edilmesi için 3 periyotluk bir alt zarf oluşturulmuştur. Parametrelere ilişkin detaylı açıklama Tablo 4.1'de verilmiştir.

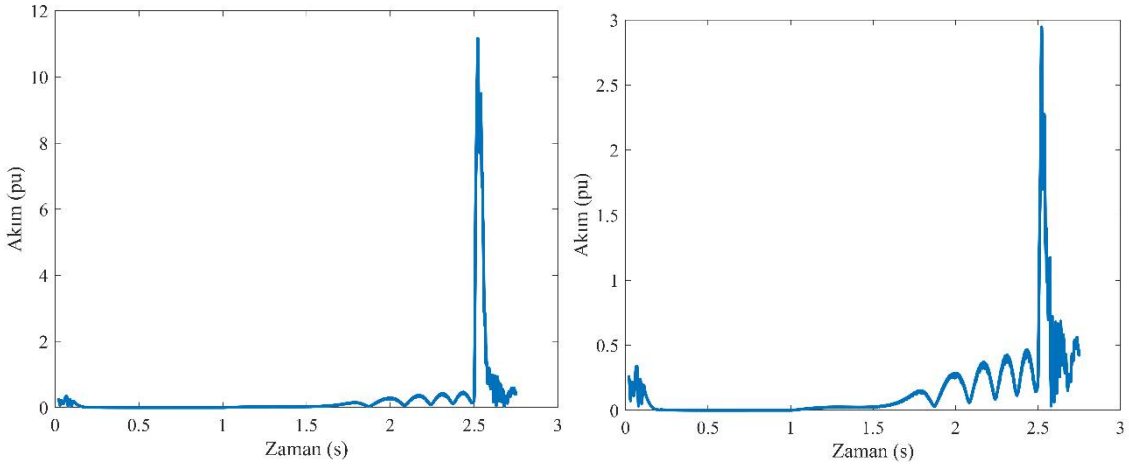
Tablo 4.1. Parametreler ve parametrelerin temel alındığı değerler/bileşenler

Parametrenin temel alındığı bileşen/değer	Parametre
I_{dc}	$Ik1_{dc}$= ortalama{ $Zarf_a${$I_{dc}(x):x=n-3N..n$}}
	$Ik2_{dc}$= ortalama { $Zarf_ü${$I_{dc}(x):x=n-10N..n$}}
	$Ik3_{dc}$= ortalama { $Zarf_ü${$I_{dc}(x):x=n-20N..n$}}
	$Ik4_{dc}$= maksimum{$I_{dc}(x):x=n-N..n$}
	$Ik5_{dc}$= maksimum { $Zarf_ü${$I_{dc}(x):x=n-20N..n$}}
V_{h5}	$Vk1_{h5}$= ortalama { $Zarf_ü${$V_{h5}(x):x=n-10N..n$}}
	$Vk2_{h5}$= maksimum {$V_{h5}(x):x=n-N..n$}
	$Vk3_{h5}$= $Vsmaks_{h5}$
V_{dc}	$Vk1_{dc}$= $Zarf_a$ {$V_{dc}(x):x=n-3N..n$}
	$Vk2_{dc}$= $Zarf_ü$ {$V_{dc}(x):x=n-3N..n$}
	$Vk3_{dc}$= maksimum {$Vk1_{dc}(n)-Vk2_{dc}(n)$}
	$Vk4_{dc}$= ortalama {$Vk3_{dc}$}
Q_{sgn}	$Qk_{sgn}(n)$

Burada $Vsmaks_{h5}$ arıza ve salınım olmayan durumda alınan bir periyottaki en yüksek 5. harmonik gerilim değeridir, $Zarf_a$ ifadesi alt zarfı, $Zarf_ü$ ifadesi ise üst zarfı temsil etmektedir. Kompanzasyonlu durumda ek parametreler gerekmektedir. I_{dc} yeterli olmadığından V_{dc} ve reaktif güç değişimine bağlı parametreler kullanılmıştır. V_{dc} ve Q_{sgn} parametreleri ise pozitif DC gerilimin tepe yaptığı nokta ve arızanın kompanzasyon cihazına yakın olduğu durumlardaki reaktif güç işaretinin takibini temel almaktadır.

4.3. Kompanze Edilmemiş Sistemler için Önerilen Yöntem

Arıza tespitinde, arıza başlangıcında bakılan temel değer I_{dc}, arıza sonunda ise V_{h5} şeklindedir. Kompanze edilmemiş sistemlerde arıza durumunda I_{dc} değeri bir tepe noktası şeklinde olmaktadır, ancak rölenin yedek koruması dikkate alındığında bu tepe noktası değeri ile salınımın yol açtığı I_{dc} tepeleri karışabilmektedir. Bu nedenle belli bir referans değer ile karşılaştırılmasındansa değişimi temel alan bir gözlem ele alınmıştır. Aşağıda verilen Şekil 4.8'de ölçüm alınan noktaya yakın ve yedek koruma bölgesinde kararsız salınım altında oluşan arıza örnekleri gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 4.8. I_{dc} değerinin ölçüm noktasına a) yakın arıza, b) uzak arıza durumlarında değişimi

Değişim oranına bağlı arıza başlangıcı tespitinde temel sorun arıza ve salınım öncesi değerleri sıfıra çok yakın ve hesaplamada sıfır olarak gelebilecek değerler olması durumudur. Bu nedenle sinyali kaydırmak gerekmektedir. 0,1pu değerinde y ekseninde bir kaydırma ile hem kararsızlık durumu önlenir hem de elde edilen değişim oranları daha yorumlanabilir olmaktadır. I_{dc} parametresi kompanze edilmemiş durum için aşağıdaki Denklem (4.10) ile yeniden tanımlanmıştır.

$$I_{dc}(n)= I_{dc}(n) + 0{,}1 \tag{4.10}$$

Bu yeni I_{dc} tanımı ile kompanzasyon olmayan durumlar için arıza başlangıcı tespiti şartı aşağıda verilen Denklem (4.11) ile tanımlanabilir.

$$\text{Şart 1} : (Ik4_{dc}>2\times Ik2_{dc}+Ɛ) \Lambda (Ik4_{dc}>2\times Ik3_{dc}+Ɛ) \tag{4.11}$$

Buradaki Ɛ hata oranıdır ve bu çalışma kapsamında 10^{-3} alınır. Şart 1 kısmında 20 ve 10 periyotlarda dinamik bir referans oluşur, bu sayede kararlı ve kararsız salınımının etkilerinden bağımsız bir gözlem hedeflenir. Şart 1 sağlandığında yöntem bunu arıza başlangıcı kabul eder ve rölenin çalışmasına izin verir. Röle ana koruma bölgesi için hemen açar ancak yedek koruma için izin verilen süreye kadar beklemesi gerekmektedir. Bu bekleme süresinde eğer arıza giderilirse, rölenin açmaması gerekmektedir, o nedenle yöntemin arızanın sona erdiğini tespit etmesi gerekmektedir. Bu tespit olmadan arıza giderimi sonrası oluşan güç salınımlarından dolayı açma verebilir ve arıza sonu tekrar yöntemin röleyi bloke kısmı atlanmış olur. Bu amaçla arıza sonunu tespit eden bir şart

eklenmiştir. Ancak bu şart aranmadan önce iki periyotluk bir arıza kilit süresi konulmalıdır. Arıza başlangıcının etkileri arıza sonunun etkilerine yakın olduğundan arıza başlangıcına yakın arama yapıldığında arıza sonu yakalanabilmektedir. O nedenle iki periyotluk bir kilidin ardından Denklem (4.11) verildiği gibi arıza sonunun aranması gerekmektedir.

$$\text{Şart 2} : [Vk2_{h5} > 2 \times Vk1_{h5} + \varepsilon \ \Lambda \ Ik4_{dc} < 2 \times Ik1_{dc} + \varepsilon] \ V \ [Vk2_{h5} > 10 \times Vk3_{h5} + \varepsilon] \quad (4.11)$$

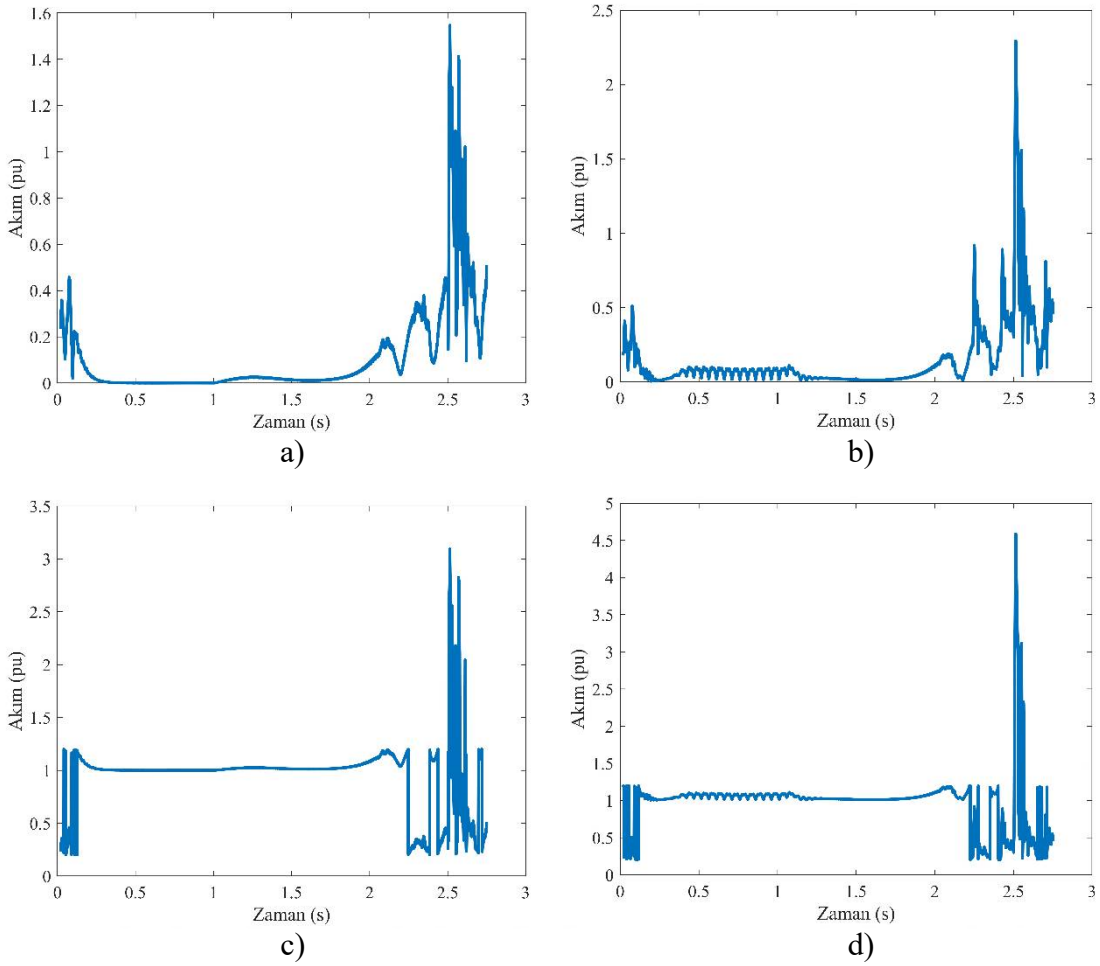
Şart 2 sağlandığında arıza sonu ilan edilir ve rölenin çalışması engellenir. Bu şarttan sonra tekrar arıza aramak gerekmektedir ancak arıza sonunun harmonik değerler ve DC akımdaki etkileri bazı durumlarda devam edebilir. Arıza başlangıcını tekrar aranmasının başlaması için bu etkilerin sönümlenmesini beklemek gerekmektedir. Şart 3 bu sönümlenme koşulunun şartıdır, bu şart Denklem (4.12)'de verilmiştir.

$$\text{Şart 3} : Ik5_{dc} < 2 \times Ik3_{dc} + \varepsilon \quad (4.12)$$

Şart 3 sağlanması durumu gerçek arıza sonu olarak ilan edilir ve yeni arıza aranmaya başlanır. Şart 3 sadece arıza sonundan kaynaklı geçici değer yükselmelerine bakmaktadır. Sistemde kararlı veya kararsız salınım olsa dahi geçici yükselmeler söndükten sonra arıza aramaya devam edilir.

4.4. Kompanzasyonlu Sistemler için Önerilen Yöntem

Kompanzasyon durumu özellikle arıza başlangıcı tespitini etkilemektedir. Sabit seri kompanzasyon durumunda arıza anında akımın DC bileşen değerleri genel olarak düşmekte ve özellikle yedek koruma alanlarında çok düşük değerlere ulaşmaktadır. TCSC'li durumda ise kontrol nedeniyle devreye girme ve çıkma durumları tepeler oluşturmaktadır, bunlar kararsız salınım durumunda oluştuğunda arıza ile karıştırılma durumu ortaya çıkmaktadır. Sabit seri kompanzasyon durumunda ve TCSC'li durumda alınan akımın DC bileşenleri Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. a) SC senaryosunda yedek koruma durumunda I_{dc} değeri, b) TCSC senaryosunda yedek koruma durumunda I_{dc} değeri, c) SC senaryosunda yedek koruma durumunda kaydırılmış I_{dc} değeri, d) TCSC senaryosunda yedek koruma durumunda kaydırılmış I_{dc} değeri

Şekilde a ve b şıklarında verilen iki durumu geliştirilen yöntem ile ayırt etmek için akımın DC bileşeninin belli bir değere ulaşmasını beklemek gerekir ki bu da arıza tespitini geciktirir. Ek olarak arıza ya da salınım olmadığı durumda akımın DC bileşenleri arasında fark olmaktadır. TCSC belli bir değere ulaşmışken, sabit seri kompanzasyonda sıfıra yakın bir değerdedir. Arıza tespitinde akımın DC bileşeni temel alınacağından sıfırdan uzakta bir başlangıçları olmalıdır. Bu nedenle sinyalin kaydırılması gerekmektedir, bu duruma ek olarak tepe noktalarının daha iyi seçilebilmesi için bir çarpan ile belirgin hale getirilmeleri de bu kısımda uygulanmalıdır. Şekilde c ve d kısımlarında kaydırılmış sinyaller verilmiştir. Yapılan kaydırma ile arıza ve salınım öncesi değerleri birbirine yaklaştırmış, TCSC kontrol hareketinin etkisini azaltmış ve oluşan tepe noktaları daha

belirgin hale getirmiştir. Bu sinyal kayması Denklem (4.13) ve Denklem (4.14)'de verildiği gibi gerçekleştirilir.

$$\text{Eğer } I_{dc}(n)<0{,}2pu \rightarrow I_{dc}(n)=I_{dc}(n)+1 \quad (4.13)$$

$$\text{Eğer } I_{dc}(n)>1pu \rightarrow I_{dc}(n)=I_{dc}(n)\times 2 \quad (4.14)$$

Yeni I_{dc} değerinin belirlenmesi ile kompanzasyonlu durumlarda kullanılan yöntem tanımına Formül (4.15) arıza tespiti formülü ile giriş yapılır.

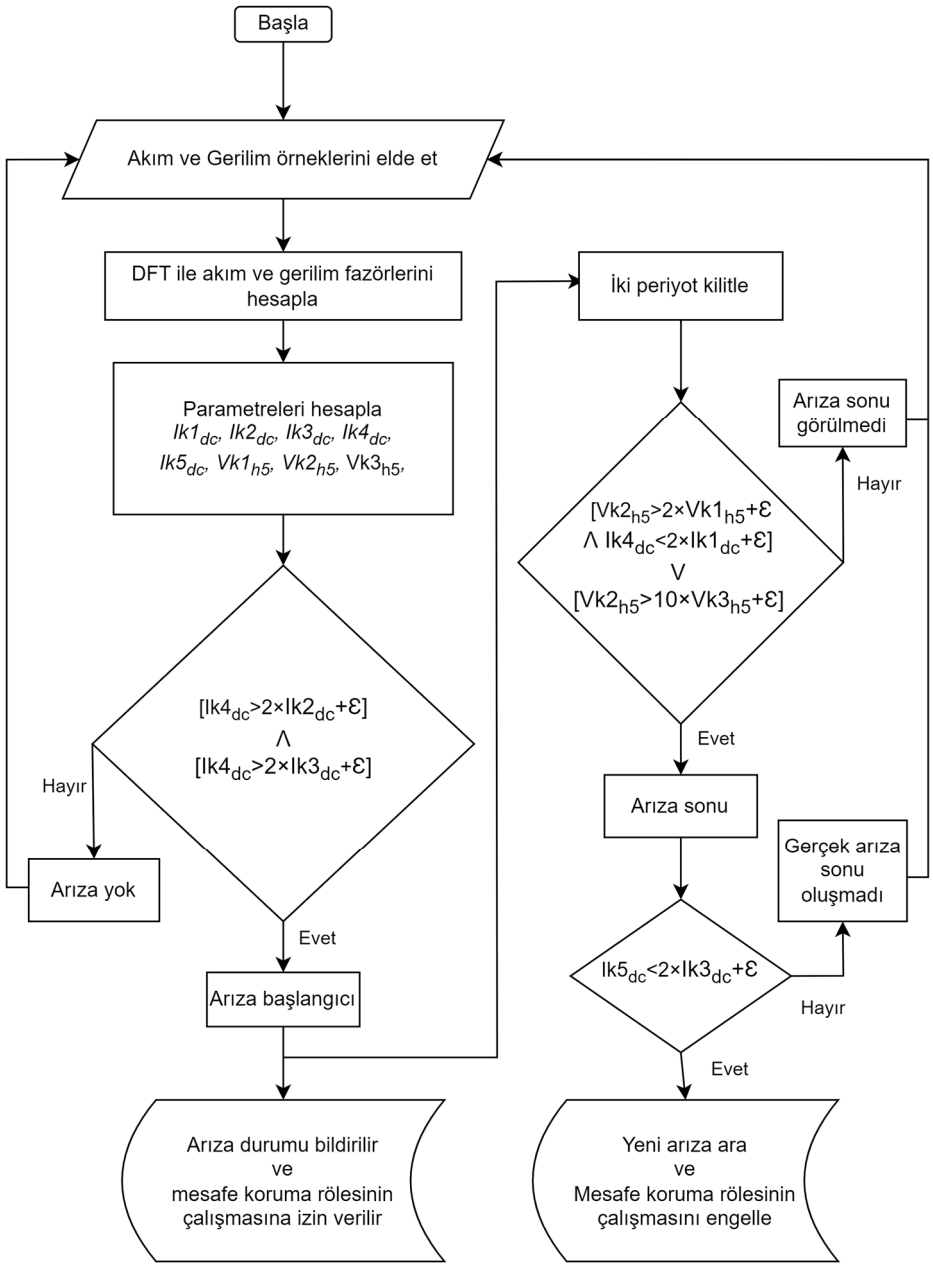
$$\text{Şart 1 : } [Ik4_{dc}>2\times Ik2_{dc}+\text{Ɛ}]\Lambda[Ik4_{dc}>2\times Ik3_{dc}+\text{Ɛ}]$$
$$\Lambda[Vk3_{dc}>2\times Vk4_{dc}+\text{Ɛ} \;\; V \;\; Qk_{sgn}==-1] \quad (4.15)$$

I_{dc} yine tepe noktaları için kontrol edilmektedir ve tepe noktası oluştuğunda arıza başlangıcı kabul edilmektedir ancak I_{dc} değerinin kompanzasyonlu durumlarda tepe noktası genlikleri düşük kalmaktadır. I_{dc} tepe noktalarının düşük olduğu durumlarda gerilimin DC bileşenlerinde tepe noktası denebilecek artışlar gözlenmiştir. Bu nedenle gerilimin DC bileşeni de yine tepe noktaları için kontrol edilmektedir. Ancak bu eklenen kontrol bileşeni özellikle sabit kompanzasyonlu durumda, kompanzasyon yerine çok yakın durumlarda geç görülebilmektedir, bu amaçla reaktif güç değişimi de izlenmektedir. Bu şart sağlandığında arıza başlangıcı ilan edilir ve kompanzasyonsuz durum için verilen yöntem de olduğu gibi iki periyotluk bir kilidin ardından Denklem (4.16) ve Denklem (4.17)'de verildiği gibi arıza sonu aranır.

$$\text{Şart 2 : } [Vk2_{h5}>2\times Vk1_{h5}+\text{Ɛ} \;\; \Lambda \;\; Ik4_{dc}<2\times Ik1_{dc}+\text{Ɛ}] \;\; V \;\; [Vk2_{h5}>10\times Vk3_{h5}+\text{Ɛ}] \quad (4.16)$$

$$\text{Şart 3 : } Ik5_{dc}<2\times Ik3_{dc}+\text{Ɛ} \quad (4.17)$$

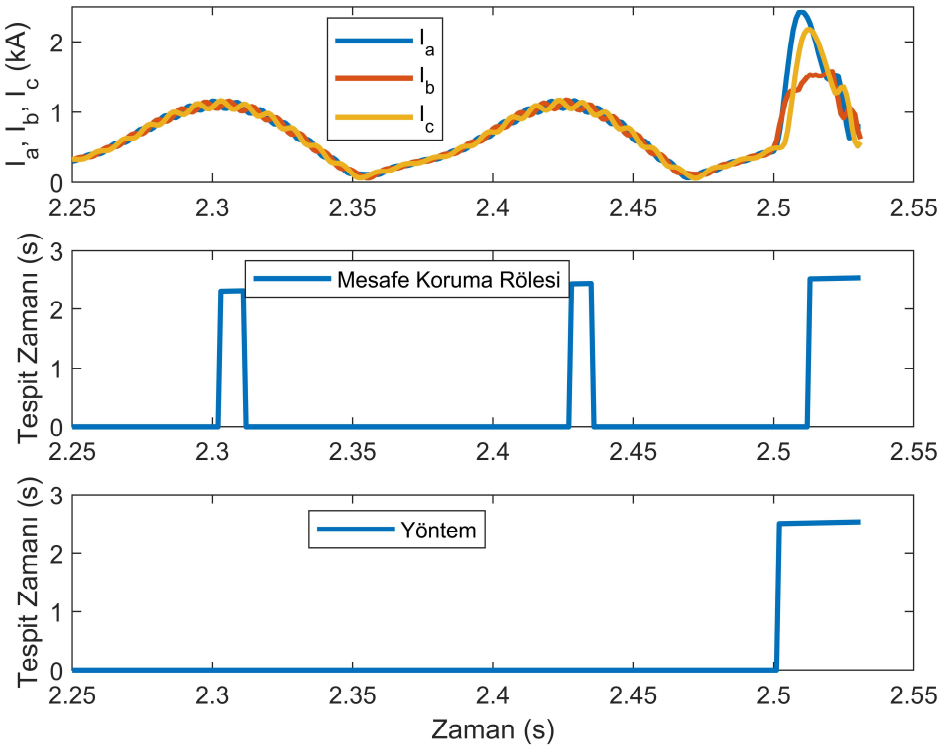
Şart 2 arıza sonunu tanımlar, Şart 3 ise arıza sonundan ötürü devam eden bozunumların sonunu yani gerçek arıza sonunu elde etmektedir. Şart 3 sağlandıktan sonra yeni arıza bakılmaya tekrar başlanır. Kompanze edilmemiş sistemler için sunulan yöntemlerin akış şeması Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Kompanze edilmemiş durum odaklı yöntem akış şeması

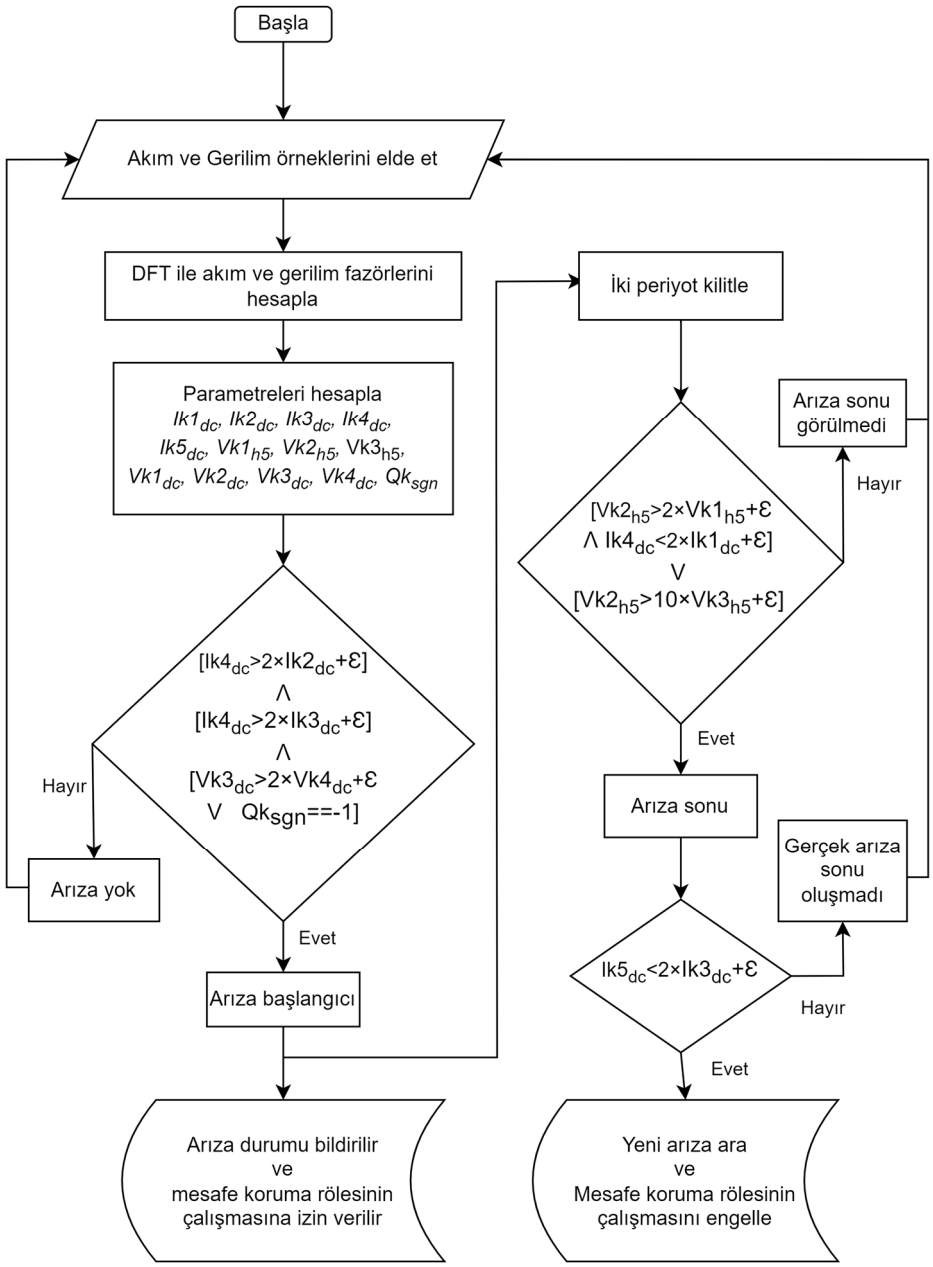
Yöntem mesafe rölesine yardımcı olarak geliştirilmiştir. Mesafe rölesi kendi görevini yerine getirirken ek olarak yöntemi de kullanarak bir arıza onayı almaktadır. Bu şekilde mesafe rölesinin eksik kaldığı salınım gibi bozucular ve bu bozucular içindeki arızalar konusunda yöntemi kullanırken, yöntem de baktığı alan kısmı dışındaki yükün devreye girmesi veya çalışma bölgesi içinde olup olmaması gibi durumlarda röleden destek almaktadır. Bu desteği açıklayan bir durum Şekil 4.11'de verilmiştir. Arıza 2,5s'de meydana gelmektedir ve sistemde kararsız salınım vardır, mesafe rölesinin cevabı ve

yöntemin cevabı ayrı ayrı bu durum altında incelenmiştir. Şekilde verilen akımlar RMS değerleridir.



Şekil 4.11. Mesafe koruma rölesi ve sunulan yöntemin arıza ve kararsız salınım durumundaki davranışı

Şekilde görüldüğü üzere mesafe koruma rölesi salınım durumunda açma yaptırmaktadır. Sunulan yöntem ise arıza anını yakalayabilmektedir. Mesafe koruma rölesi ile kullanıldığında yöntem arıza durumunda mesafe koruma rölesinin çalışması için izin verecek, mesafe koruma rölesi de arıza koruma bölgesine girdiğinde açma sinyalini verecektir. Yöntem, röle fonksiyonunun tamamlayıcı bir yapıya sahiptir. Sunulan yöntem, mesafe koruma rölesi ile bu haliyle beraber kullanılabilir veya salınımı algılayan ek bir yöntem ile kullanılarak sadece salınım durumlarında aktif hale gelmesi sağlanabilir. Kompanze edilmiş durum için sunulan yöntemin akış şeması Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Kompanzasyon odaklı yöntem akış şeması

Akış şemalarında arıza sonrası iki periyotluk bir kilitleme bulunmaktadır. Bu arıza başlangıcı durumunda 5. harmonik gerilimin de bazı durumlarda tepe yapmasından kaynaklanır. Bu tepe hatalı bir arıza başlangıcının etkilerinden dolayı arıza sonu bulmaya yol açmaktadır. Bu tepe arıza başlangıcında anlık olmakta ve genelde iki periyot içinde sönmektedir. Bu durumun basit bir zarfa dayalı eşik değer eklenerek çözümü mümkün olsa da bu kadar kısa bir sürede arıza izolasyonunu bir otomatik tekrar kapamalı kesici sağlar. İlgili kesicilerin tekrar kapama süreleri dört periyot civarı olduğundan değişikliğe

ihtiyaç duyulmamıştır (G&W Electric, 2019). Ancak tekrar kapama süresi iki periyot ve altında olan bir otomatik tekrar kapamalı kesici ile çalışılması durumunda bu fonksiyon eklenebilir.

5. ÖNERİLEN YÖNTEMLERİN FARKLI TEST SİSTEMLERİNDE UYGULANMASI

Önerilen yöntemlerin test edilmesi ve sonuçlarının yorumlanması için iki farklı test sistemine gereksinim duyulmuştur. İlk sistem, basit bir test sistemi olarak seçilmiş ve böylece geliştirilen yöntemin sınırlarını zorlayacak şekilde daha detaylı analizlerin yapılmasına olanak sağlanmıştır. İkinci test sistemi ise makalelerde sıkça kullanılan, diğer yöntemler ile karşılaştırmaya olanak sağlayacak daha karmaşık bir test sistemi olarak seçilmiştir.

İlk test sistemi detaylı analizler yapan makaleler baz alınarak oluşturulmuştur. Hat modeli olarak farklı modeller denenmiş ve pi hat modeli ile test sistemi çalışma için yeterli görülmüş ve uygulamalarda kullanılmıştır. Bu test sisteminde yöntemlerin limitlerini test etme odağı olduğundan özellikle kararsız güç salınımları 10Hz limitinde ele alınmıştır.

İkinci test sistemi olarak çoğu güç salınımı araştırmasında kullanılan WSCC 9 baralı test sistemi kullanılmaktadır. Bu test sisteminde yapılan birçok çalışma olduğundan karşılaştırma için ideal bir sistem olduğundan seçilmiştir.

Test sistemleri ve güç salınımı altındaki arıza analizleri PSCAD ortamında oluşturulmuştur. PSCAD ortamında oluşturulan bu analizlerin gerilim ve akım sonuçları veri olarak toplanmıştır. Bu toplanan veriler MATLAB ortamında oluşturulan yöntem ile işlenmiştir.

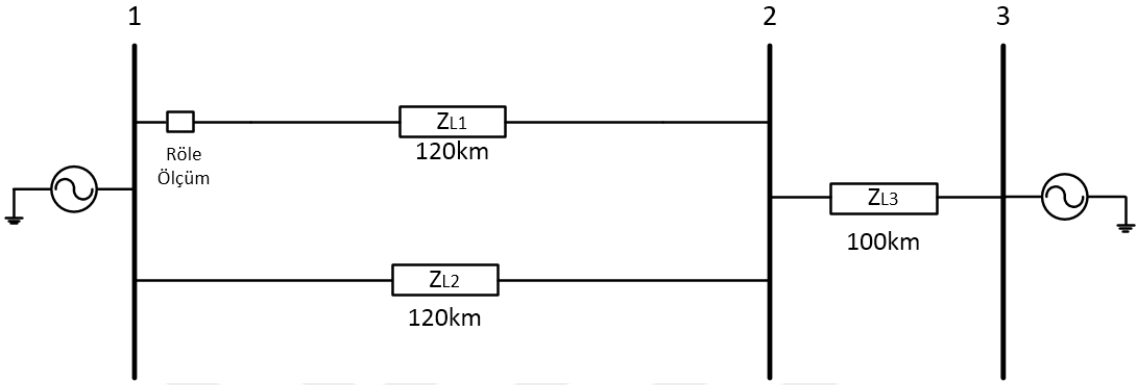
Bu başlık altında bu iki test sistemi açıklanıp, kararlı ve kararsız salınımlar altında oluşan arızalarda yöntemin sonuçları verilecektir. Farklı örnekleme frekansı içeren ve birbirinden farklı şekilde elde edilen salınımların altında yöntemin sonuçları yorumlanacaktır. Bu bölümde I_{dc} grafikleri yöntemlerin ve senaryoların birbirleri ile karşılaştırılabilmeleri için sinyal kaydırma işlemi yapılmamış olarak gösterilecektir.

5.1. Test Sistemlerinin Tanıtımı

5.1.1. Birinci Test Sisteminin Tanıtımı

İlk test sistemi olarak sistemin test edildiği koşul dışındaki diğer etkilerden mümkün olduğunca yalıtılmış durumda olması ve her koşulda limit test koşullarında senaryolara

olanak sağlayan bir sistem düşünülmüştür. Bu amaçla 2 veya 3 baralı test sistemlerinin sıklıkla kullanıldığı gözlenmiştir, bölge 3 korumasının da dikkate alınabilmesi için 3 baralı test sistemi kullanılmıştır. 3 baralı, 2 makinalı pi hat modeli tabanlı bir güç sistemi bu çalışma kapsamında test sistemi 1 olarak ele alınmaktadır. Test sistemi 1, Şekil 5.1'de, özellikleri ise Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Üç baralı test sistemi

Tablo 5.1. Test sistemi 1'in özellikler

Sistem Parametreleri		Hat Parametreleri	
Frekans	50Hz	Hat Modeli	π
Nominal Gerilim	400kV	R_1	$2,3x10^{-7}$ [pu/m]
Nominal Güç	650MVA	X_1	$1,8x10^{-6}$ [pu/m]
Arıza Başlangıcı ve Süresi	2,5s, 50ms	B_1	$6,5x10^{-7}$ [pu/m]
Arıza Yeri Değişimi	%12,5	Z_{L1} hat uzunluğu	120km
Arıza Gerçekleştirilen Hatlar	Z_{L1}, Z_{L3}	Z_{L3} hat uzunluğu	100km

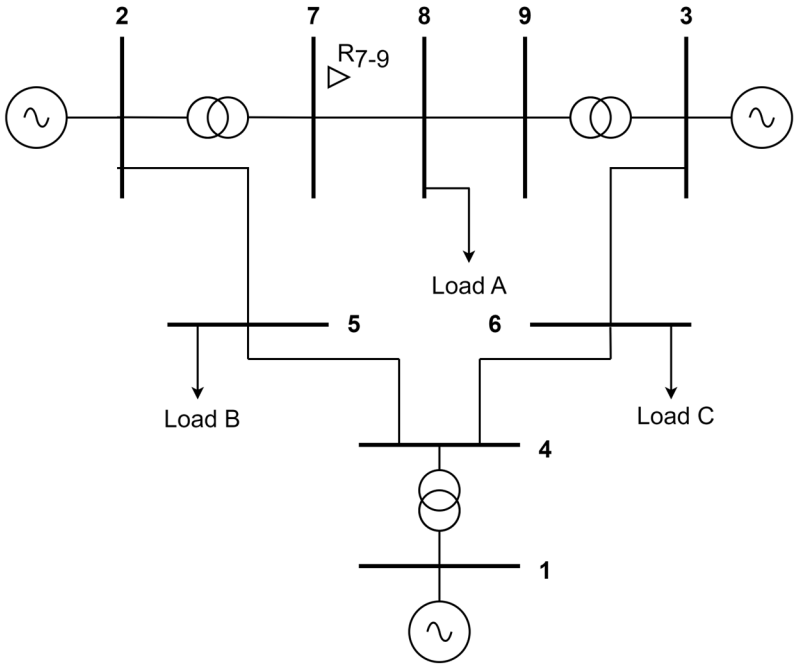
Hatlar eşdeğer ancak uzunlukları farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Arıza gerçekleştirme kısmında iki hattın alınması yedek çalışmanın da kullanılabilmesi amacıyladır, röle noktası sabittir. Farklı hat modelleri denenmiş ve güç salınımları altında cevapları incelenmiştir, elde edilen sonuçlar birbirine yakın olduğundan pi modelinin yeterli olduğu sonucuna ulaşılmış ve yapılan senaryolarda pi modeli baz alınmıştır. Her hat pi modeli ile 8 eş parçaya ayrılmış ve bu nedenle arızalar arasında %12,5'lik bir mesafe farkı bulunmaktadır. Her senaryoda alınan sistem hareketlerinin birbiri ile uyumlu olması için salınımlar ilk sistemde bir mekanik arıza oluşturarak yapılmıştır. Kararlı salınım için 1 numaralı baraya bağlı kaynakta T_m 1,35pu, kararsız salınım için ise 1,42pu değerine ayarlanmaktadır. Kararlı salınımlar ilgili rölede açma sağlayacak minimum frekans değerinde salınacak şekilde ayarlanmaktadır (1-1,5Hz), kararsız salınımlar için

ise izin verilen maksimum salınım frekansı değeri seçilmiştir (9-10Hz). Yöntemler için kullanılan örnekleme frekansı bu sistem için 1kHz şeklindedir.

Test sistemi 1'de kompanzasyon cihazları ile de uygulamalar yapılmıştır. Eklenen cihazlar SVC (Statik VAr kompanzasyon), SC (Sabit seri kompanzasyon) ve TCSC (Tristör kontrollü seri kompanzasyon) şeklindedir. SC ve TCSC, Z_{L1} hattının ortasına konulmuştur ve hattı %40 kompanze etmektedir, iki cihazda da MOV (Metal oksit varistör) kullanılmıştır. TCSC akım kontrollüdür ve bağlı olduğu hattın akım referansı 0,65pu seçilerek kontrol edilmektedir. SVC ise 2 numaralı barayı 1,1pu değerinde sabitleyecek şekilde kontrol edilmektedir.

5.1.2. İkinci Test Sisteminin Tanıtımı

Test sistemi 2 için literatürde sıklıkla kullanılan WSCC 9 baralı sistem kullanılmıştır. Test sistemi 230kV, 60Hz ve Bergeron hat modeli ile tasarlanmıştır. Bu sistemde örnekleme frekansı 5kHz alınmıştır. Yöntemlerin test edildiği arıza 4,8s'de gerçekleştirilmektedir ve arıza 75ms boyunca devam etmiştir, arıza direnci 0,01 Ω olarak uygulama yapılmıştır. Bu verilen değerler standart test değerleridir, bu değerler ilgili senaryolarda değiştirilebilinir, değiştirilen değer verilen senaryo içeriğinde ayrıca belirtilmiştir. Test sistemi 2'inin genel yapısı Şekil 5.2'de verilmiş olup, rölenin konumu şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.2. WSCC 9 baralı sistemi (Manitoba Hydro International Ltd., 2018)

Korunan hat bara 7 ve 8 arasında bulunan hattır, yedek koruma yapılan hat ise bara 8 ve 9 arasında bulunan hattır. Salınım oluşturmak için bu sistemde mekanik arıza yerine testi yapılan arızadan önce koruma bölgesi dışında bir arıza oluşturulmuştur. 5 numaralı barada 4. saniyede kararlı salınım için 75ms ve kararsız salınım için 120ms'lik arızalar oluşturulur.

Bu test sisteminde SC ve TCSC kompanzasyonları ile ilgili uygulamalar da gerçekleştirilmiştir. Kullanılacak kompanzasyon cihazı 7. ve 8. baraların ortasına yani korunacak hattın %50'sine yerleştirilmiştir. Kompanzasyon oranı korunan hattın %50'si olarak verilmiştir. TCSC yine akım kontrollü olarak seçilmektedir ve referans olarak 0,83pu akım değeri belirlenmiştir.

Görüldüğü üzere iki sistemin frekansları, örnekleme frekansları ve salınıma yol açan etkenler farklıdır. Bu şekilde çalışmanın mümkün olduğunca farklı test sistemi ve senaryolardaki davranışını göstermek amaçlanmaktadır.

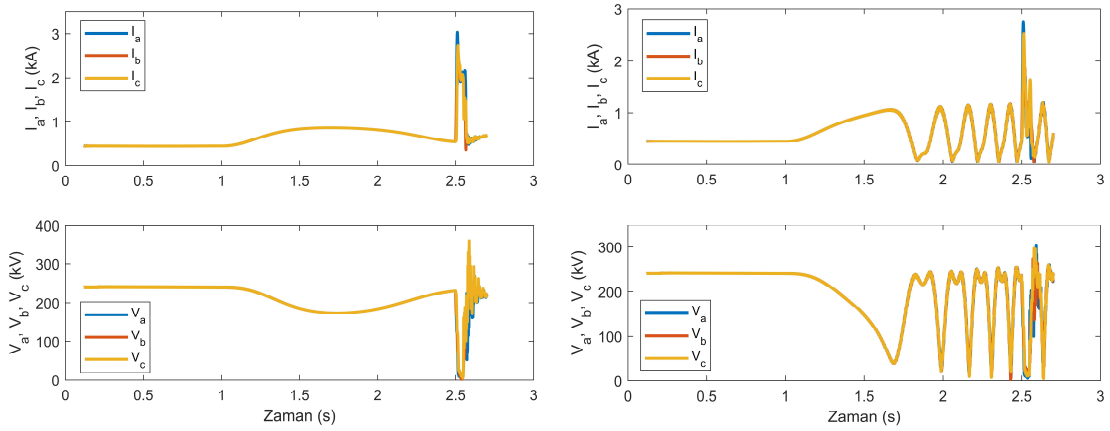
5.2. Akım ve Gerilimlerin Salınım Altında Davranışı

Bu başlık altında, kararlı ve kararsız salınım durumlarındaki farklı arıza noktaları için akım ve gerilim grafikleri paylaşılmıştır. İlerleyen kısımlarda senaryo odaklı grafikler verileceğinden herhangi bir özel koşul olmadan test sistemlerinin durumlarının da gözlenmesi ileriki karşılaştırmaların yorumlanması için gereklidir.

5.2.1. Birinci Test Sistemindeki Gözlemler

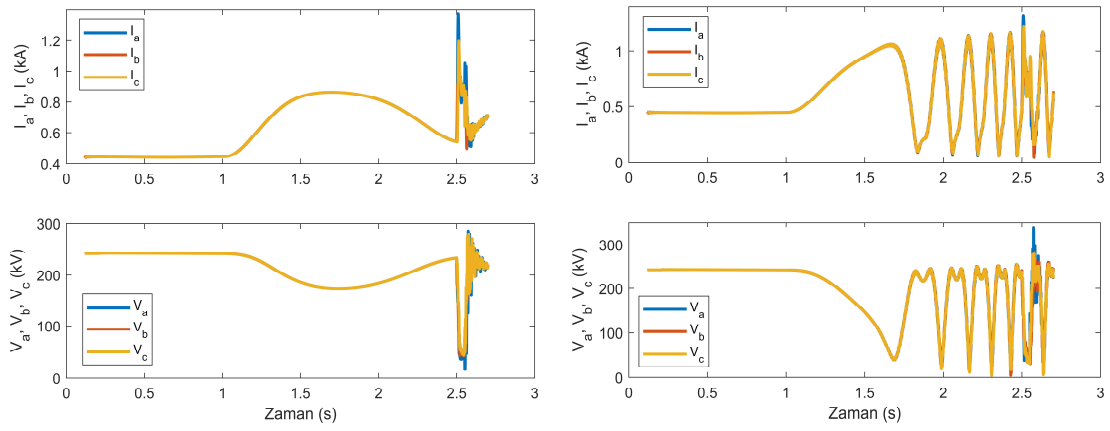
5.2.1.1. Kompanzasyonsuz Durum

Davranış gözlemleri bu bölümde senaryo odaklı grafikler ile yapılmıştır, bu grafiklerde akım ve gerilim RMS değerleri ile sistemin durumu belirtilmiştir. Bu senaryo uygulamasında verilen grafiklerin daha iyi analizi ve sistemin durumunu gözlemek için birinci test sisteminde akım ve gerilim RMS değerleri korunan hattın başında, sonunda ve yedek korunan hattın sonunda olacak şekilde, kararlı ve kararsız salınım durumları altında arıza olayları paylaşılmıştır. Korunan hattın başında uygulanan senaryo Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

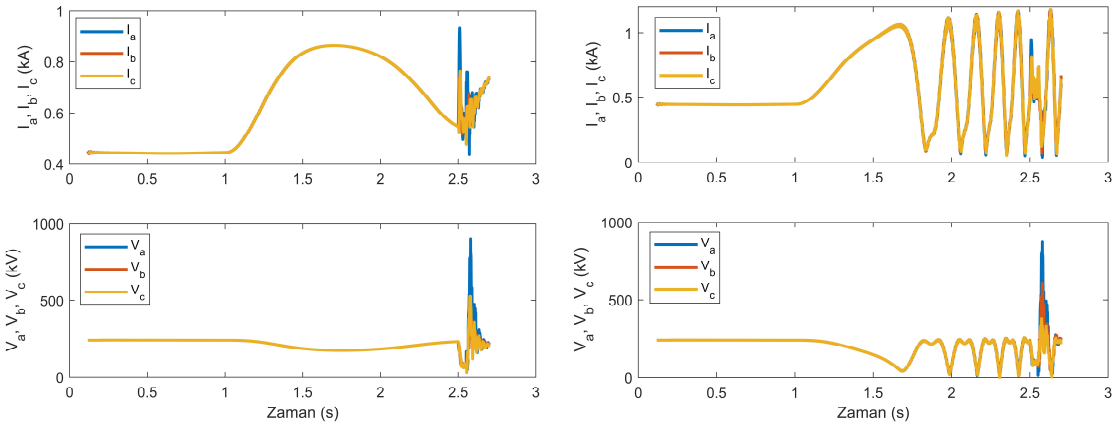


Şekil 5.3. Birinci test sistemi; korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza

Şekilde kararsız salınımda 1.s başlayan ve 1,5.s-2.s aralığında biten kubbe tarzı bir çökme görüyoruz, kararsız salınımlar bu çökme durumundan sonra başlamıştır. Test sistemi 1 için daha zor koşulları göstermek amacıyla ele alınan senaryoda korunan hattın sonunda ve yedek korunan hattın sonunda olacak şekilde kararlı ve kararsız salınım ve arıza durumları oluşturulmuş ve Şekil 5.4'te paylaşılmıştır.



Şekil 5.4. Birinci test sistemi; korunan hattın sonunda a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza

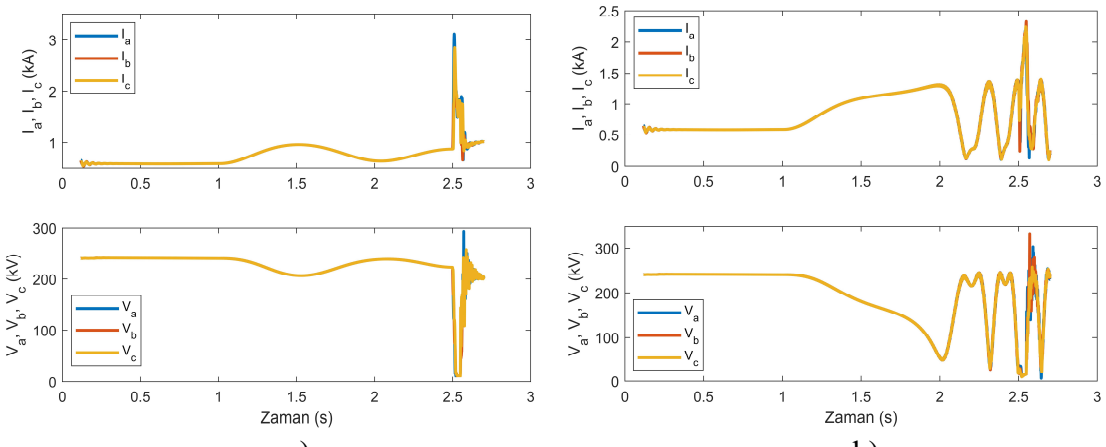


Şekil 5.4. (Devam) Birinci test sistemi; korunan hattın sonunda a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza

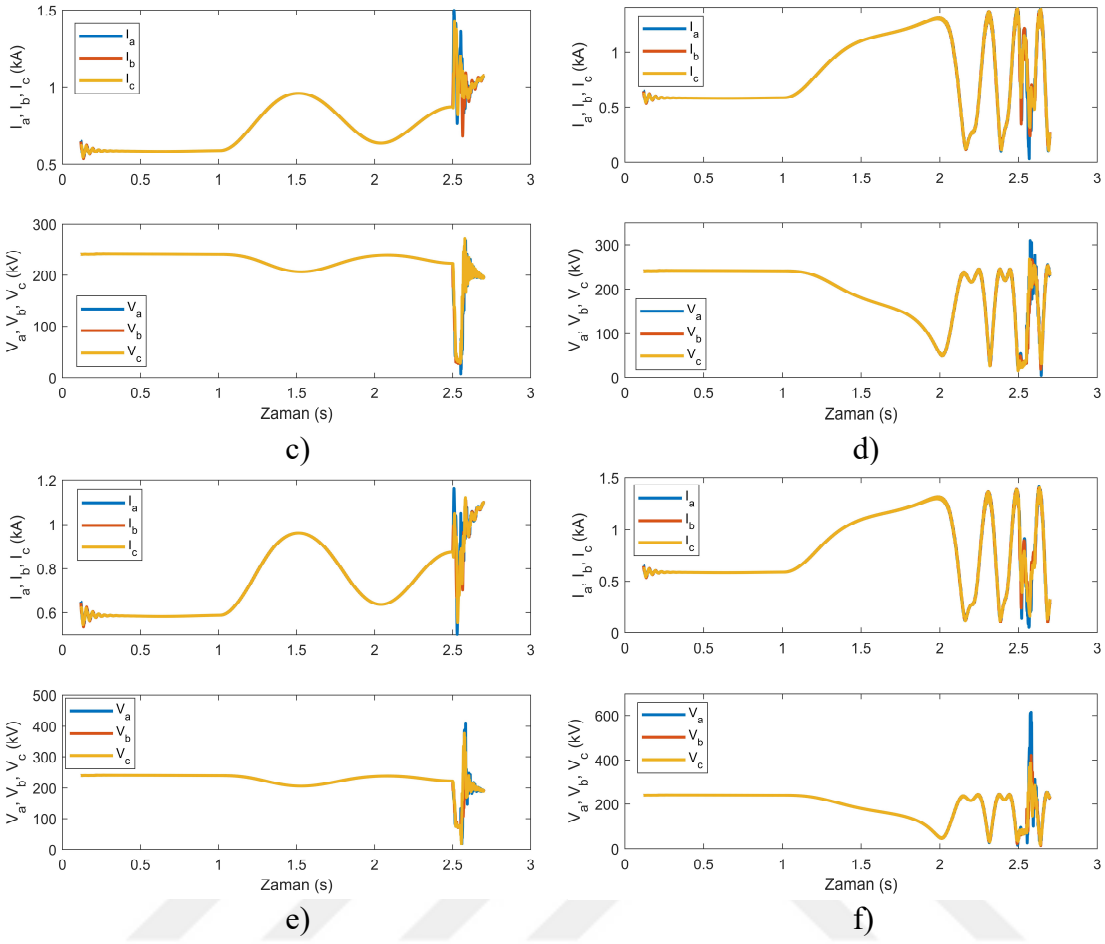
Şekillerden ölçüm noktasından uzaklaştıkça özellikle akım grafiklerinde arıza noktasını ayırt etmenin zorlaştığı gözlenmektedir. Yedek korunan hattın sonunda arıza akımı tepe değeri, güç salınımlarının tepe değerlerine ulaşamamıştır.

5.2.1.2. Kompanzasyonlu Durum

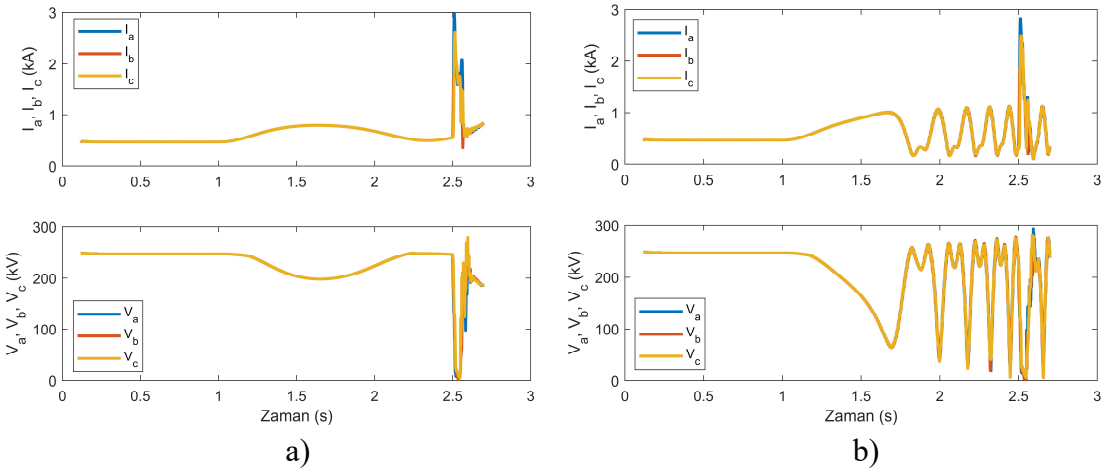
Kompanzasyon cihazlarına ilişkin akım ve gerilimin RMS değerleri korunan hattın başında, sonunda ve yedek korunan hattın sonunda olacak şekilde kararlı ve kararsız salınım durumları altında SC için Şekil 5.5'te, SVC için Şekil 5.6'te ve TCSC için Şekil 5.7'te paylaşılmıştır.



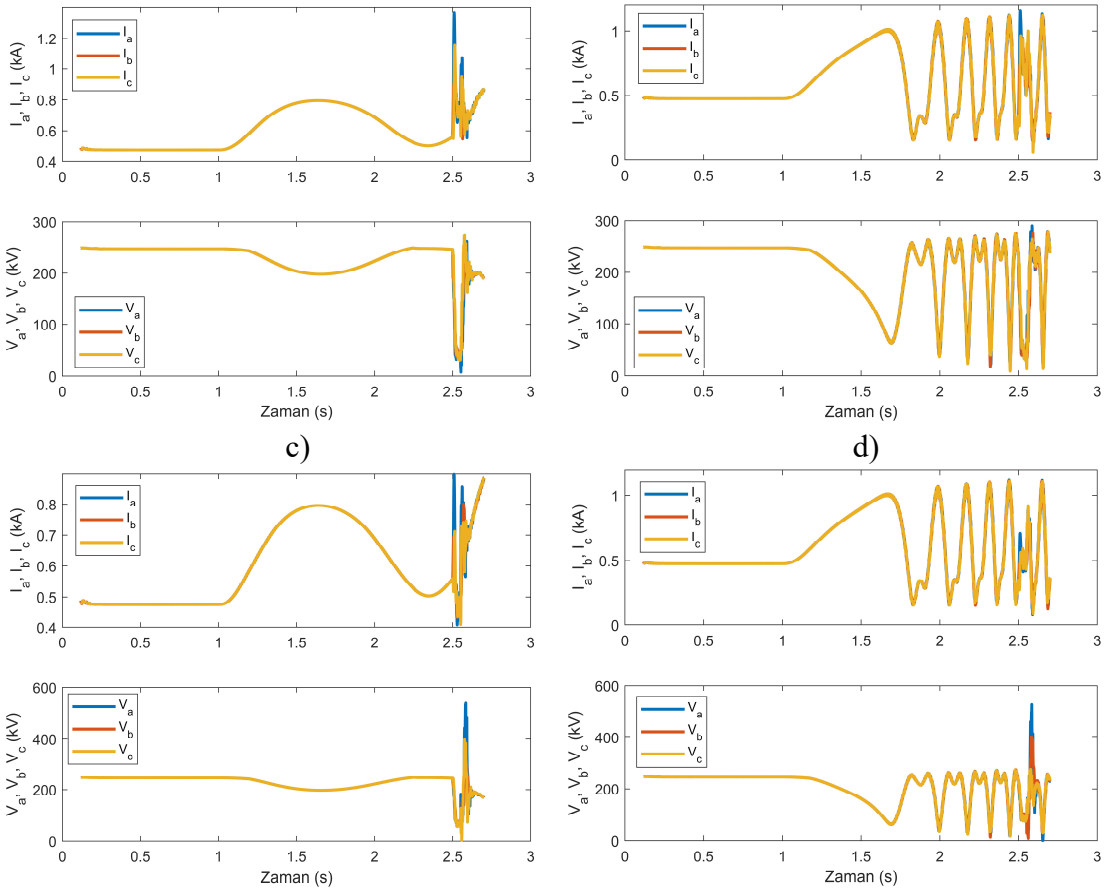
Şekil 5.5. Birinci test sistemi; SC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



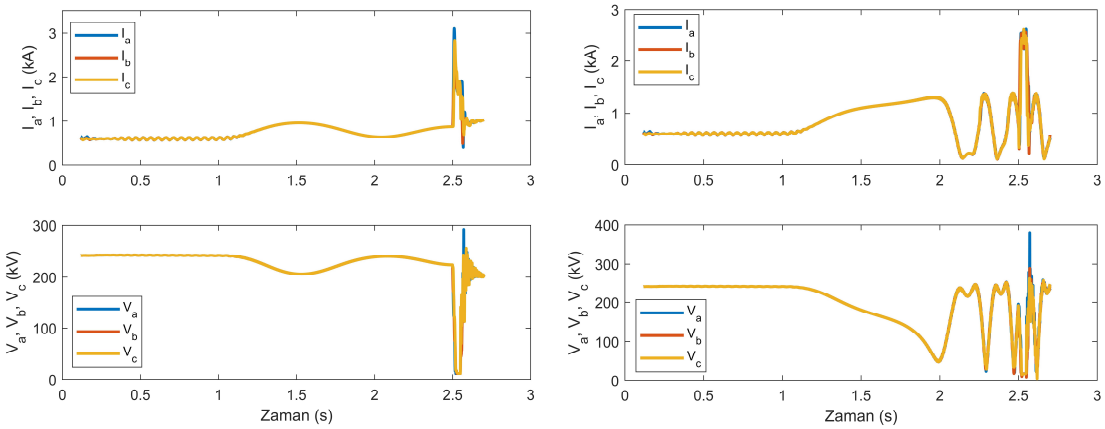
Şekil 5.5. (Devam) Birinci test sistemi; SC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



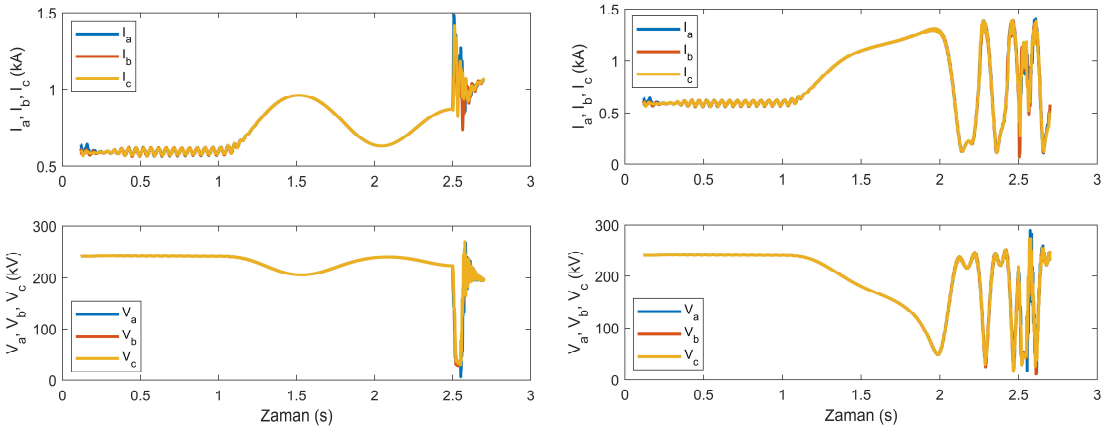
Şekil 5.6. Birinci test sistemi; SVC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



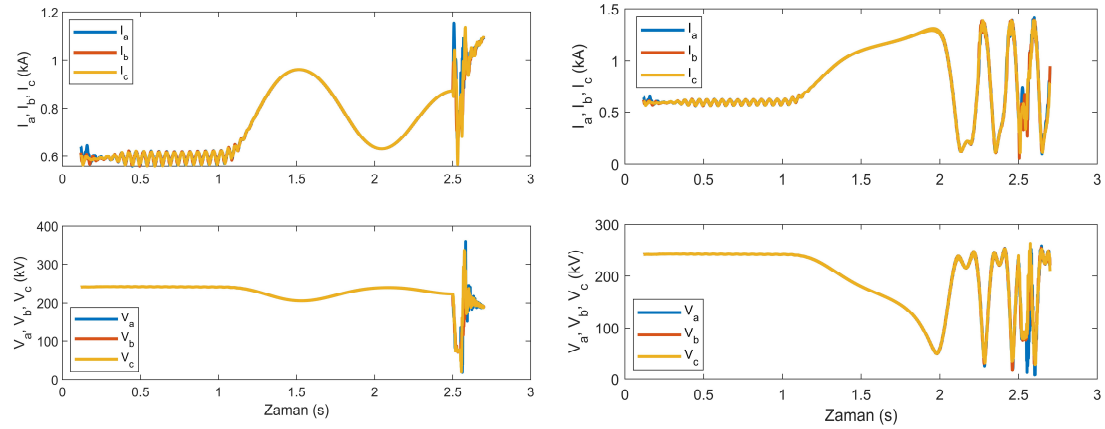
Şekil 5.6. (Devam) Birinci test sistemi; SVC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



Şekil 5.7. Birinci test sistemi; TCSC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



c) d)



e) f)

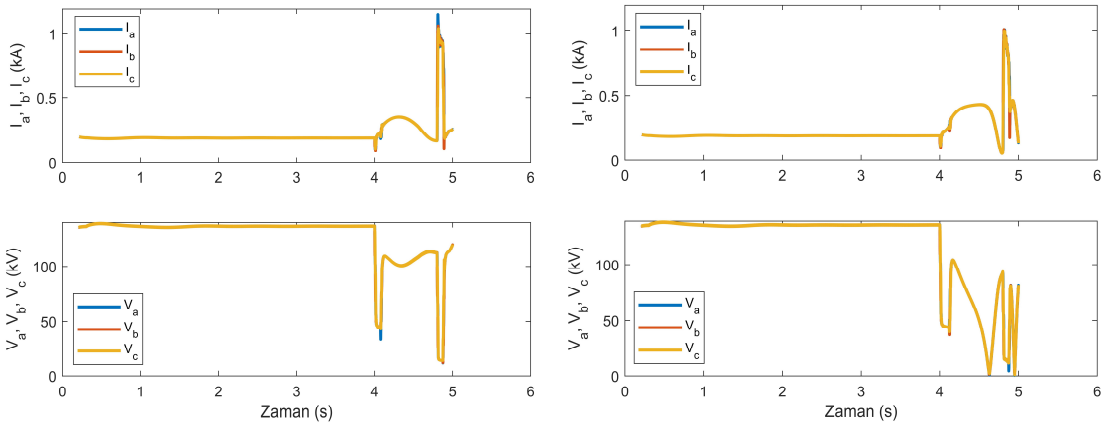
Şekil 5.7. (Devam) Birinci test sistemi; TCSC için korunan hattın başında a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, korunan hattın sonunda c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve yedek korunan hattın sonunda e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza

Hem kompanze edilmemiş hem de kompanzasyonlu durumlarda yedek korunan hat sonunda özellikle yedek korunan hattın sonunda kararsız salınım altında oluşan arıza durumunda akım tespitinin güç olduğu görülmektedir. Her kompanzasyon durumunda ve farklı arıza yerlerinde oluşan değişken akım ve gerilim grafikleri dinamik bir eşik değer olmadan bir çözüm sunmanın zorluğunu göstermektedir.

5.2.2. İkinci Test Sistemindeki Gözlemler

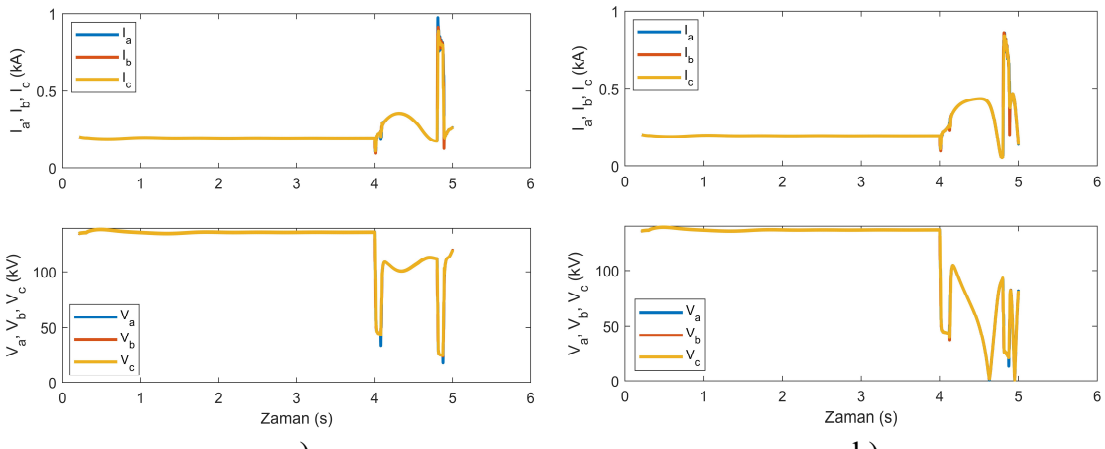
5.2.2.1. Kompanzasyonsuz Durum

Bu bölümde senaryo odaklı grafiklerin ikinci test sisteminde daha net anlaşılabilmesi için RMS akım ve gerilim değerleri kararlı ve kararsız salınım durumlarında verilmiştir. Gecikmesiz 1. bölge koruması için ilgili grafik Şekil 5.8'te verilmiştir.

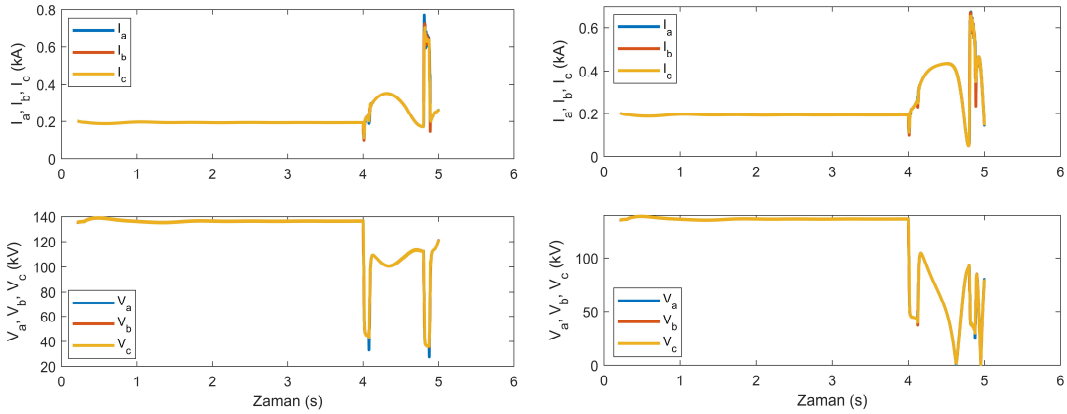


Şekil 5.8. İkinci test sistemi, 1. koruma bölgesi, a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza

Bir önceki test sistemindeki gibi bu test sisteminde de korunan hat sonu ve yedek korunan hat sonu senaryolarına da bakılmıştır. Yedek koruma bölgesi 2. ve 3. bölgeler için arıza ve salınım durumu Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. İkinci test sistemi yedek koruma; 2. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza



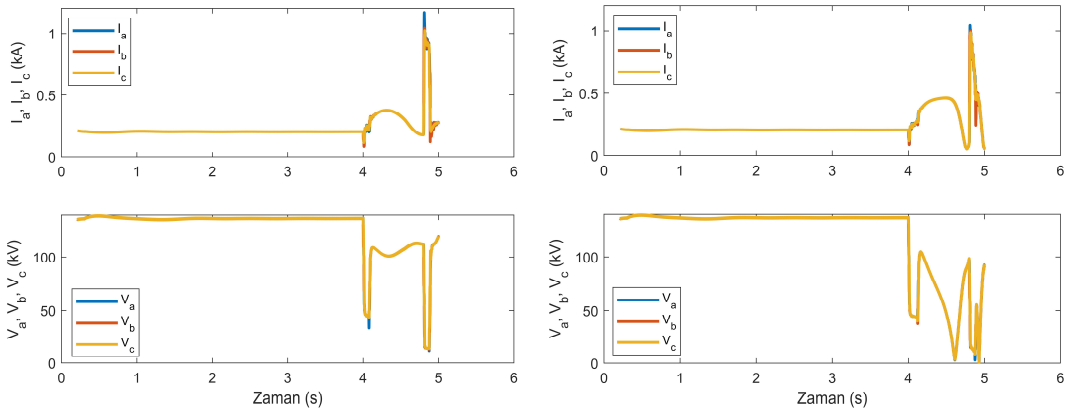
c) d)

Şekil 5.9. (Devam) İkinci test sistemi yedek koruma; 2. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza

Bu test sisteminin farklılığı salınım durumu ve salınım öncesi durum karşılaştırılması ile anlaşılabilir. Özellikle kararsız salınım durumlarında salınım başında oluşan ilk kubbe şekli bir önceki test sisteminden daha kısa sürede tamamlanmıştır. Koruma bölgesi dışında oluşan arıza gerilimde bir çökmeye neden olmuş ve kısa süreli, hızlı çöken bir kubbe şekli oluşturmuştur.

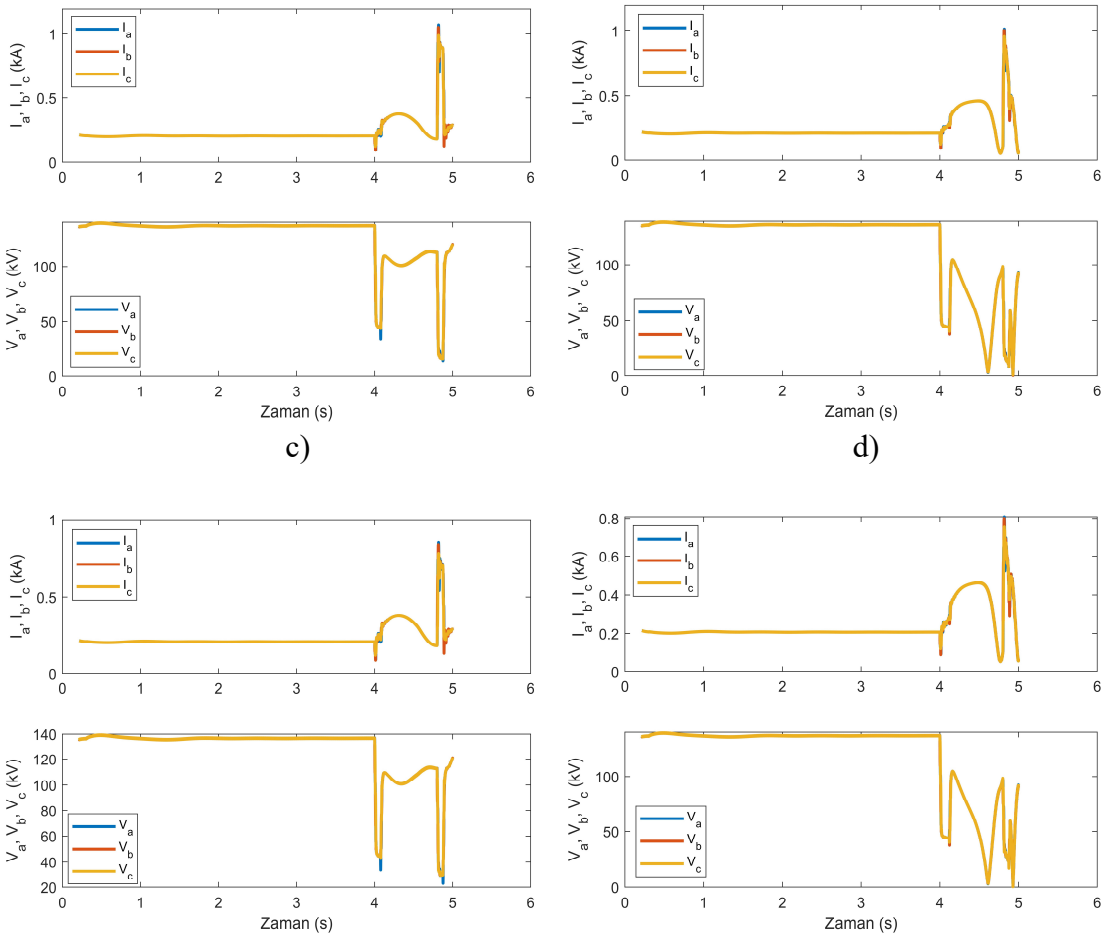
5.2.2.2. Kompanzasyonlu Durum

Kompanzasyonlu durumda akım ve gerilimin RMS değerleri farklı koruma bölgeleri ve güç salınımları için örnekleri SC kompanzasyonu için Şekil 5.10'da ve TCSC kompanzasyonu için Şekil 5.11'de verilmiştir.

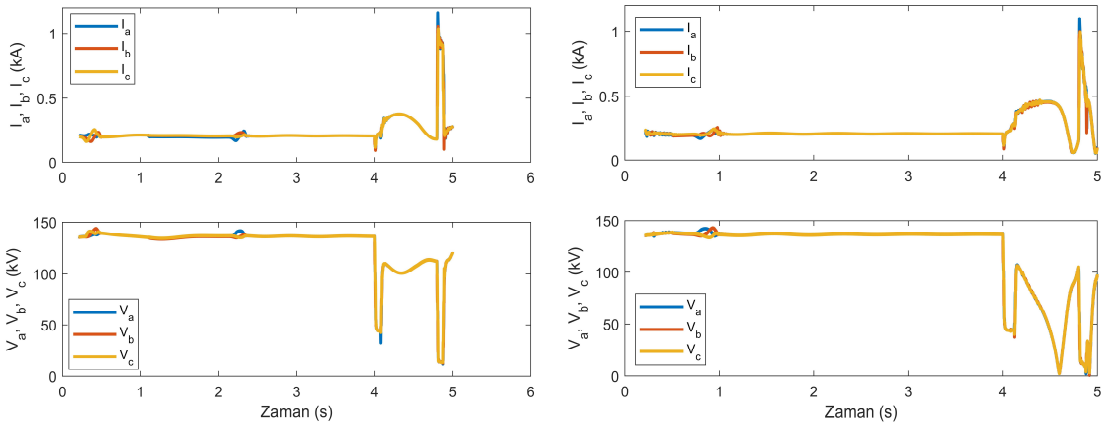


a) b)

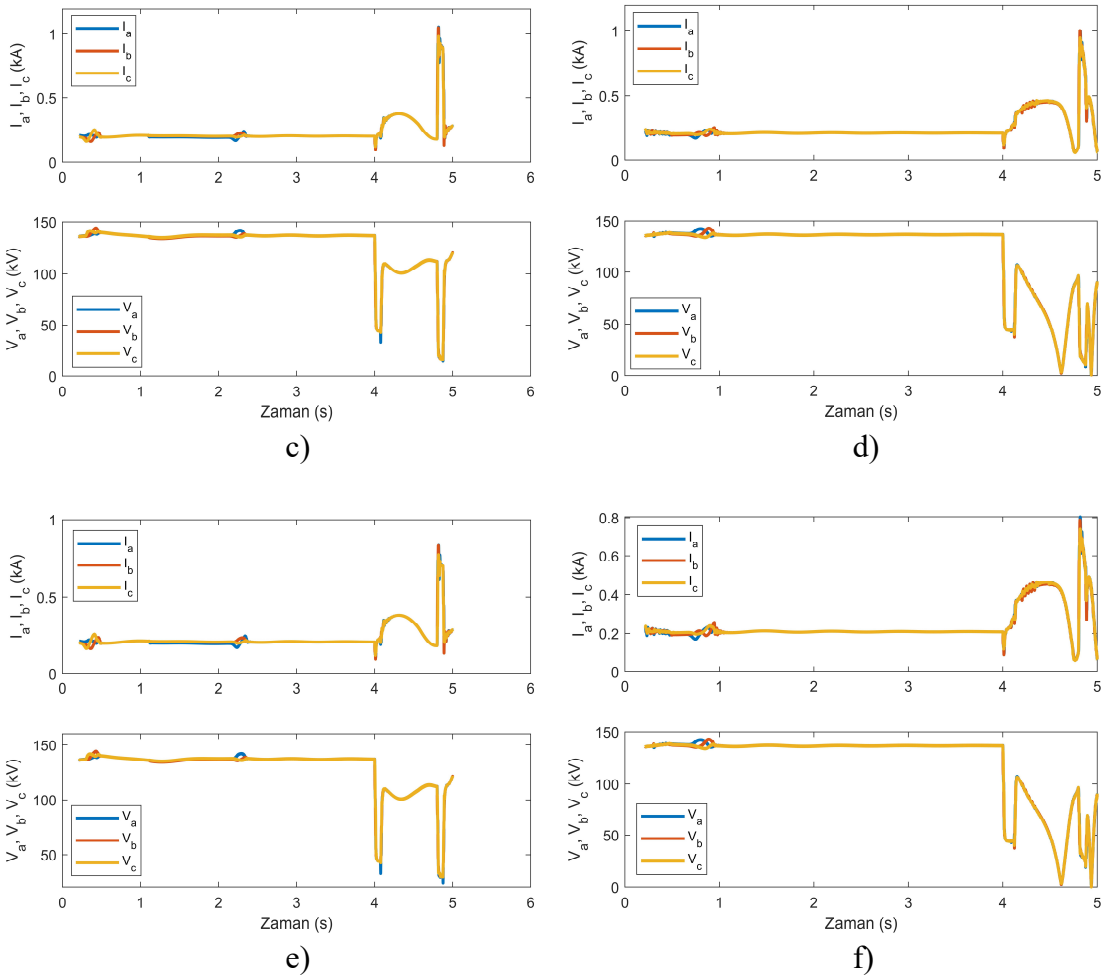
Şekil 5.10. İkinci test sistemi; SC durumunda 1. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, 2. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



Şekil 5.10. (Devam) İkinci test sistemi; SC durumunda 1. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, 2. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



Şekil 5.11. İkinci test sistemi; TCSC durumunda 1. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, 2. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza



Şekil 5.11. (Devam) İkinci test sistemi; TCSC durumunda 1. koruma bölgesi a) kararlı b) kararsız salınım durumunda arıza, 2. koruma bölgesi c) kararlı d) kararsız salınım durumunda arıza ve 3. koruma bölgesi e) kararlı f) kararsız salınım durumunda arıza

İki test sisteminde de alınan örnekler sistemlerin birbirlerinden ne kadar farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Kompanzasyon ve yedek koruma senaryoları ile bu farklılıkların çoğaltıldığı ve bu sayede geniş bir test veri yığını elde edildiği görülmektedir.

5.3. Önerilen Yöntemlerin Uygulanması

Geliştirilen yöntemlerin tanıtılan test sistemlerinde uygulanması ve elde edilen sonuçlar bu başlık altında paylaşılmıştır. Uygulamalarda kullanılan senaryolarda ayrıca verilmiştir.

5.3.1. Birinci Test Sisteminde Uygulanması

5.3.1.1. Uygulama Senaryoları

Birinci test sistemi için kullanılan senaryolar aşağıdaki Tablo 5.2'de verilmiştir. Her kompanzasyon durumu için üç koruma bölgesi de dikkate alınıp senaryolar geliştirilmiştir. Bu test sisteminde alınan salınım frekansları kararlı salınım için 1-1,5Hz arasında kararsız salınım için ise 9-10Hz arasındadır.

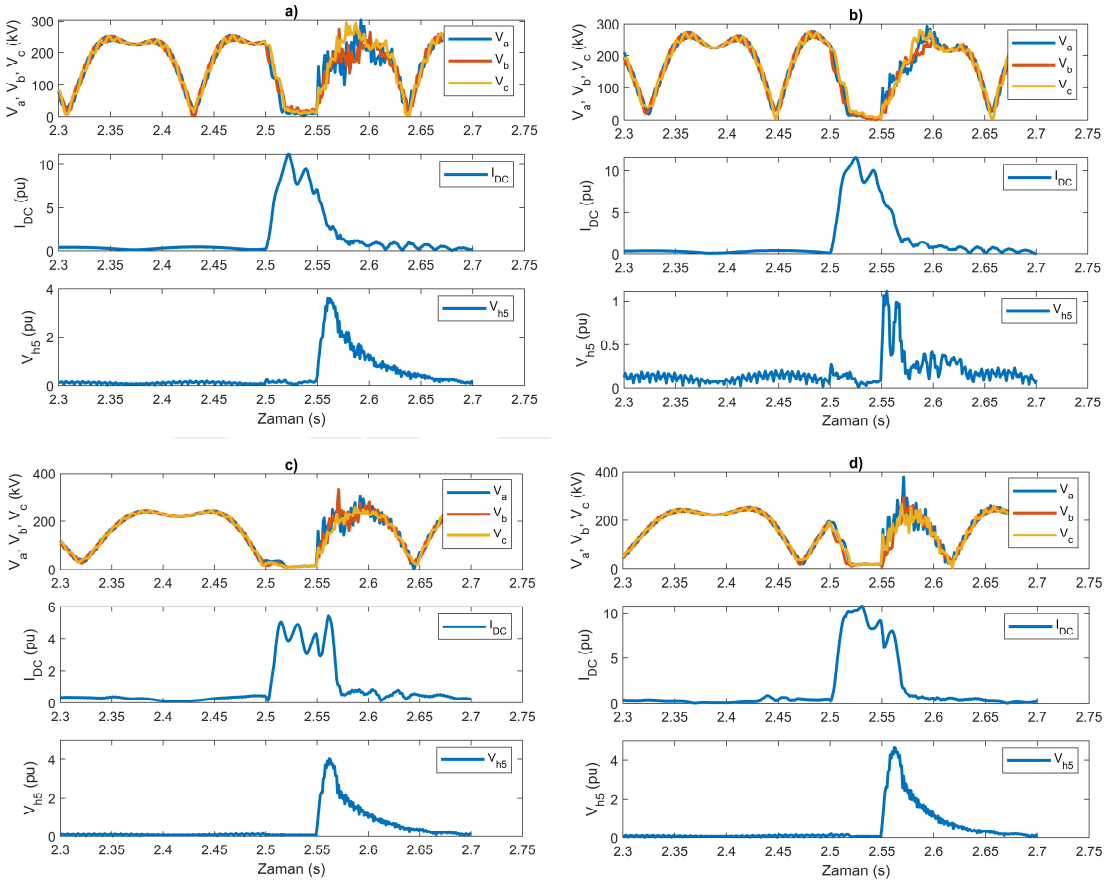
Tablo 5.2. Test sistemi 1'de kullanılan senaryolar

Kompanzasyon Durumu	**Koruma Bölgesi**	**Salınım Durumu**	**Arıza Yeri (km)**
Yok	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Yok	15 (Z_{L1})
Yok	2.Bölge ($0,8Z_{L1} <$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Yok	105(Z_{L1}) ve 12,5 (Z_{L3})
Yok	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Yok	87,5 (Z_{L3})
Yok	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararlı	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})
Yok	2.Bölge ($0,8Z_{L1} <$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararlı	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
Yok	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararlı	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})
Yok	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararsız	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})
Yok	2.Bölge ($0,8Z_{L1} <$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararsız	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
Yok	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararsız	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})
SVC	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararlı	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})

Tablo 5.2. (Devam) Test sistemi 1'de kullanılan senaryolar

SVC	2.Bölge ($0,8Z_{L1}<$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararlı	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
SVC	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararlı	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})
SVC	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararsız	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})
SVC	2.Bölge ($0,8Z_{L1}<$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararsız	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
SVC	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararsız	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})
SC	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararlı	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})
SC	2.Bölge ($0,8Z_{L1}<$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararlı	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
SC	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararlı	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})
SC	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararsız	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})
SC	2.Bölge ($0,8Z_{L1}<$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararsız	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
SC	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararsız	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})
TCSC	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararlı	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})
TCSC	2.Bölge ($0,8Z_{L1}<$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararlı	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
TCSC	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararlı	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})
TCSC	1.Bölge ($\leq 0,8Z_{L1}$)	Kararsız	15, 30, 45, 60, 75, 90 (Z_{L1})
TCSC	2.Bölge ($0,8Z_{L1}<$ $\leq 1,2Z_{L1}$)	Kararsız	105 (Z_{L1}), 12,5 (Z_{L3})
TCSC	3.Bölge ($>1,2Z_{L1}$)	Kararsız	25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5 (Z_{L3})

Birinci test sistemi için kullanılan senaryolar arasında farklılıkların gözlenmesi için faz gerilimleri (RMS değerleri), I_{dc} ve V_{h5} değerleri aşağıdaki Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekil, farklı kompanzasyon durumlarında, kararsız salınım anında, korunan hattın 15.km'sinde oluşan bir arıza için elde edilmiştir. Arıza 2,5s'de başlamıştır ve 50ms sürmektedir.



Şekil 5.12. İkinci test sistemi; a) kompanze edilmemiş, b) SVC ile kompanze edilmiş, c) SC ile kompanze edilmiş ve d) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda V_a, V_b ve V_c faz gerilimleri, I_{dc} ve V_{h5} değerleri

Korunan en uzak nokta için I_{dc} grafikleri paylaşılmıştı. Bu grafiklerde ise arıza anını ve arıza bitişini çok net I_{dc} değişimi ile görebilmekteyiz, röle noktasından uzaklaşılması ve arıza direncinin artması durumunda bu arıza anı tepe noktası ve kararsız salınım değerleri birbirine daha yakın olacaktır.

5.3.1.2. Her Bir Senaryo için Elde Edilen Sonuçlar

PSCAD programıyla gerçekleştirilen sistemden elde edilen üç faz akım ve gerilim ile Matlab'da oluşturulan ve akış diyagramında verilen algoritma kullanılarak arıza

başlangıcı ve arıza sonu belirlenmesi yapılmıştır. Oluşturulan arızanın başlangıç süresinden, yöntem ile bulunan süre karşılaştırılmış ve görülen gecikme süreleri bu başlık altında paylaşılmıştır. Arıza başlangıcı ve arıza sonu tespitinde gözlenen gecikmenin daha küçük olması yöntemin etkinliğini gösterir.

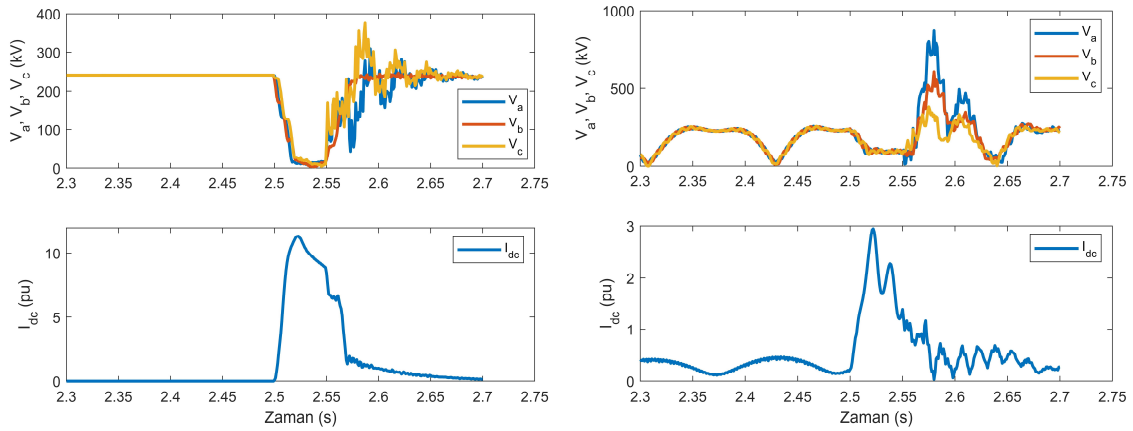
Kompanzasyonsuz durum için geliştirilen yöntem, test sistemi 1'de kararlı, kararsız salınımlar ve salınım olmayan durumlar için denenmiştir, bu testler kapsamında elde edilen detaylı analiz aşağıda verilen Tablo 5.3'te paylaşılmıştır. Şekil 5.13'te ise senaryonun etkisini göstermek için korunan noktaya en yakın ve en uzak noktalar gösterilmiştir, korunan noktaya en yakın senaryo salınım yok iken, en uzak nokta ise kararsız salınım durumunda I_{dc} akımın değişimi gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Test sistemi 1 için kompanze edilmemiş durum odaklı yöntemin sonuçları

Arızalı hat	Arızanın uzaklığı	Salınım tipi	Arıza başlangıcı tespit gecikmesi (ms)	Arıza sonu tespit gecikmesi (ms)
Z_{L1}	15 km	Kararsız	2	1
Z_{L1}	30 km	Kararsız	2	1
Z_{L1}	45 km	Kararsız	2	1
Z_{L1}	60 km	Kararsız	2	1
Z_{L1}	75 km	Kararsız	3	1
Z_{L1}	90 km	Kararsız	3	1
Z_{L1}	105 km	Kararsız	3	1
Z_{L1}	15 km	Kararlı	1	1
Z_{L1}	30 km	Kararlı	1	1
Z_{L1}	45 km	Kararlı	1	2
Z_{L1}	60 km	Kararlı	2	1
Z_{L1}	75 km	Kararlı	2	1
Z_{L1}	90 km	Kararlı	2	2
Z_{L1}	105 km	Kararlı	2	1
Z_{L1}	15 km	Salınım yok	1	1
Z_{L1}	105 km	Salınım yok	2	1
Z_{L3}	12,5 km	Kararsız	4	1
Z_{L3}	25 km	Kararsız	4	1
Z_{L3}	37,5 km	Kararsız	4	1

Tablo 5.3. (Devam) Test sistemi 1 için kompanze edilmemiş durum odaklı yöntemin sonuçları

Z_{L3}	50 km	Kararsız	5	1
Z_{L3}	62,5 km	Kararsız	5	1
Z_{L3}	75 km	Kararsız	5	2
Z_{L3}	87,5 km	Kararsız	5	1
Z_{L3}	12,5 km	Kararlı	2	1
Z_{L3}	25 km	Kararlı	2	1
Z_{L3}	37,5 km	Kararlı	2	1
Z_{L3}	50 km	Kararlı	2	1
Z_{L3}	62,5 km	Kararlı	2	1
Z_{L3}	75 km	Kararlı	2	2
Z_{L3}	87,5 km	Kararlı	2	2
Z_{L3}	12,5 km	Salınım yok	2	1
Z_{L3}	87,5 km	Salınım yok	2	2



a) b)

Şekil 5.13. Birinci test sistemi; a) Z_{L1} 15.km salınım yok durumu, b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumu

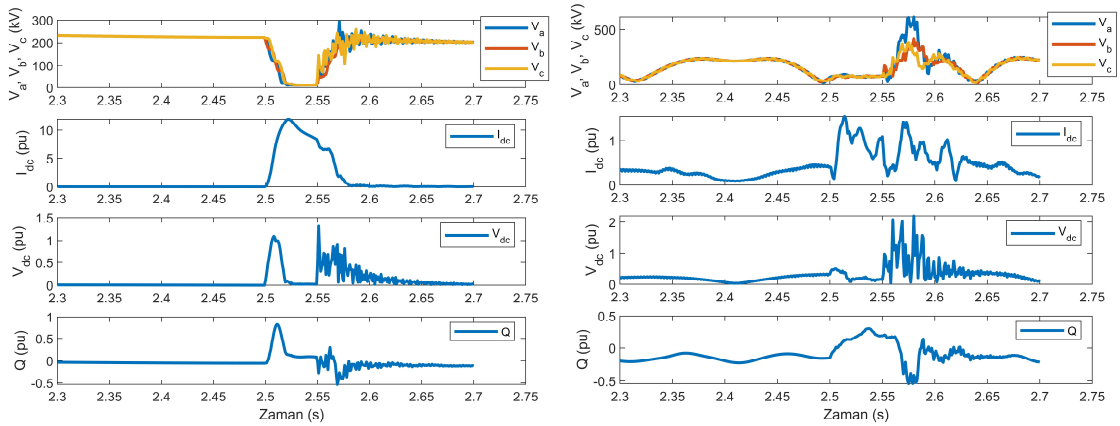
Görüldüğü gibi kompanze edilmemiş durum için geliştirilen yöntem farklı koşullarda arıza başlangıcını 1-5ms'lik bir gecikme ile görebilmektedir. Yedek koruma için gerekli arıza sonu tespitinde ise 1-2ms'lik bir gecikme ile çalışılmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde arıza ölçüm noktasından uzaklaştığında tespit etmenin de o kadar geciktiğini görmekteyiz. Arıza başlangıcı tespitinde en yüksek gecikmenin yaklaşık 10Hz'lik bir salınım altında uzak hatta gerçekleştiği görülmektedir. Kısaca yöntem

özellikle kendi koruma bölgesi için hız ve doğrulukla hareket etmektedir. Şekil 5.13'te verilen I_{dc} değerleri senaryolar arasındaki farkı ortaya koymaktadır, bu farka rağmen zarf yöntemi ile sağlanan dinamik eşik değer arıza başlangıcını yakalayabilmektedir.

Test sistemi 1 için kompanzasyon odaklı yöntemin sonuçları Tablo 5.4'te sunulmuştur. Her kompanzasyon durumu için koruma noktasına en yakın kararlı salınım ve koruma noktasına en uzak kararsız salınım senaryolarına ilişkin grafikler SC kompanzasyon durumu için Şekil 5.14'te, TCSC için Şekil 5.15'te ve SVC için Şekil 5.16'te verilmiştir.

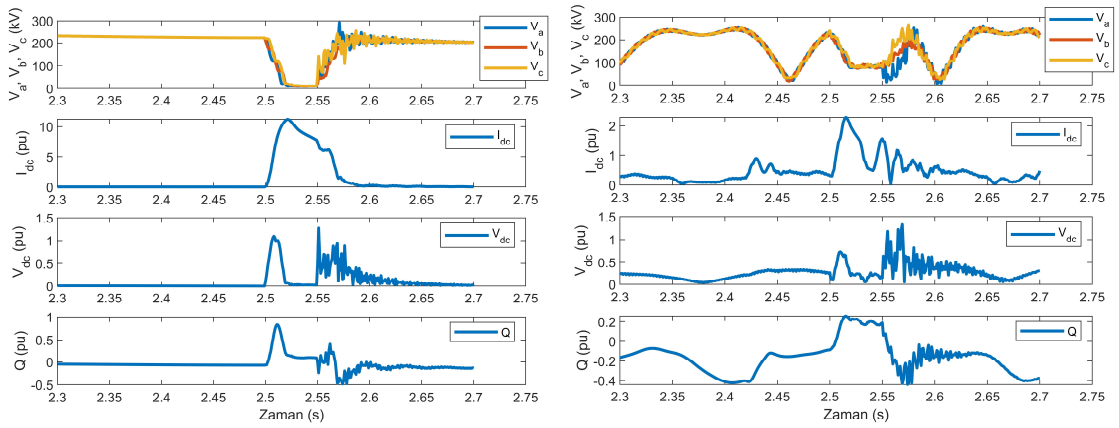
Tablo 5.4. Test sistemi 1 için kompanzasyon odaklı yöntemin sonuçları

Kompanzasyon tipi	Gecikme tipi	Arıza başlangıcı tespiti gecikmesi (ms)				Arıza sonu tespiti gecikmesi (ms)			
		Kararlı salınım		Kararsız salınım		Kararlı salınım		Kararsız salınım	
		Z_{L1}	Z_{L3}	Z_{L1}	Z_{L3}	Z_{L1}	Z_{L3}	Z_{L1}	Z_{L3}
SC	Maks	6	9	9	9	2	2	1	2
	Min	3	7	5	9	1	1	1	1
	Ort	4,37	8	7	9	1,75	1,29	1	1,29
TCSC	Maks	6	9	5	6	2	2	1	1
	Min	3	7	3	6	1	1	1	1
	Ort	4,25	8,14	4,12	6	1,75	1,14	1	1
SVC	Maks	5	8	5	8	4	4	4	2
	Min	3	6	3	6	1	1	0	1
	Ort	4	7	3,71	6,14	2,43	1,71	1,71	1,29
Kompanzasyon olmayan durum	Maks	13	10	5	7	4	2	1	2
	Min	4	7	3	6	1	1	1	1
	Ort	7,86	8	3,57	6,43	1,57	1,29	1	1,29



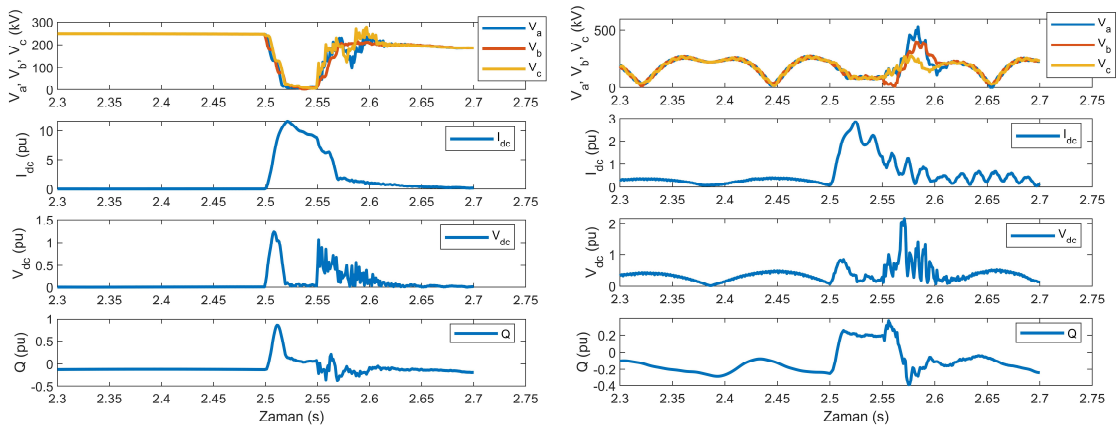
a) b)

Şekil 5.14. Birinci test sistemi; SC kompanzasyonunda a) Z_{L1} 15.km kararlı salınım durumunda arıza, b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumunda arıza



a) b)

Şekil 5.15. Birinci test sistemi; TCSC kompanzasyonunda a) Z_{L1} 15.km kararlı salınım durumunda arıza, b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumunda arıza



a) b)

Şekil 5.16. Birinci test sistemi; SVC kompanzasyonunda a) Z_{L1} 15.km kararlı salınım durumunda arıza b) Z_{L3} 87,5.km kararsız salınım durumunda arıza

Geliştirilen yöntemin testlerinde kompanzasyon durumları da olduğundan analiz sayısı 100'den fazladır o nedenle maksimum, minimum ve ortalama sonuçlar verilmiştir. Özellikle kompanze edilmemiş durum sonuçlarına bakıldığında neden iki farklı yöntem gerektiği ortaya çıkmaktadır. Gecikme 2-3 kat seviyelerine çıkmıştır ancak yine de yöntem herhangi bir nedenle kompanzasyon devre dışı kalsa dahi arızayı tespit edebilecek durumdadır. Yöntemde kararlı ve kararsız salınım sonuçları arasında çok az bir fark vardır. Genel olarak bu yöntemde de uzak hatta oluşan arızaların tespiti daha güçtür. Arıza tespitinde kompanzasyon olan durumlarda gecikme 10ms'den düşüktür. Arıza sonu tespitinde ise 5ms'nin altında kalmıştır.

5.3.2. İkinci Test Sisteminde Uygulanması

5.3.2.1. Uygulama Senaryoları

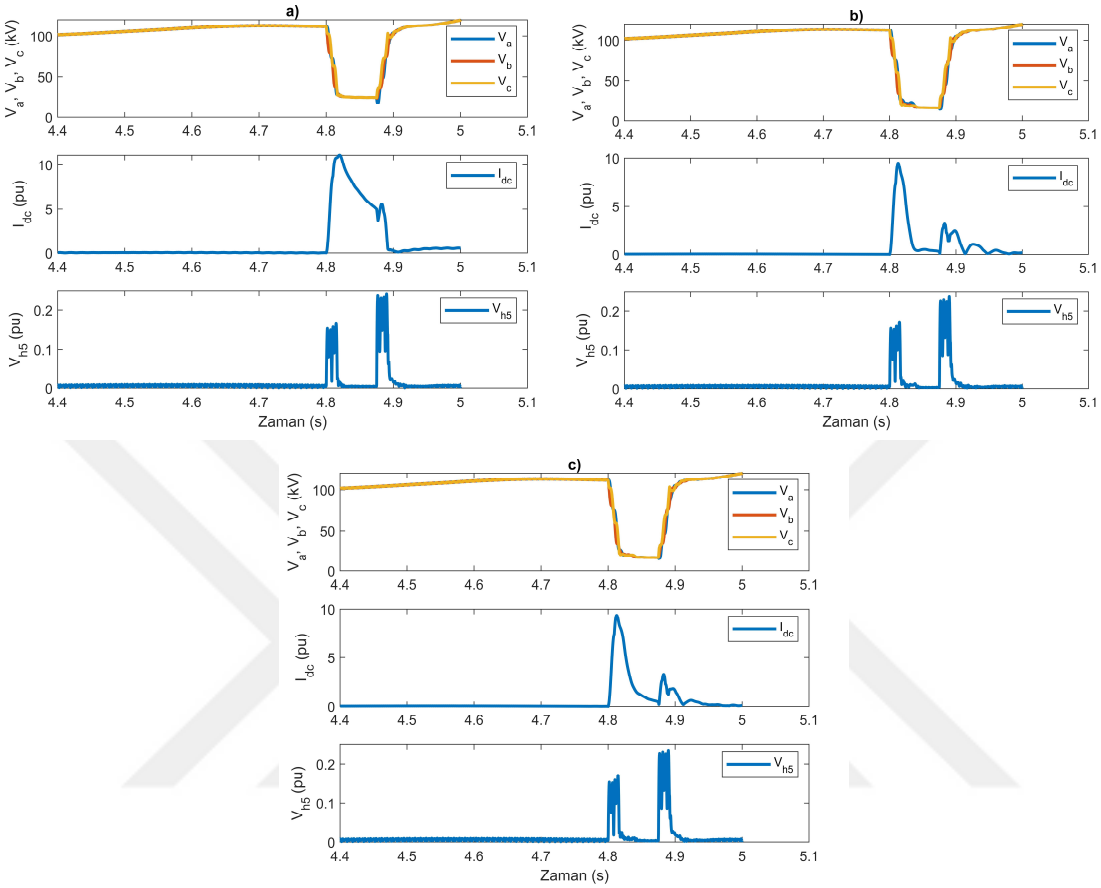
İkinci test sistemi için farklı koruma bölgelerinde, kompanze edilmemiş ve seri kompanze edilmiş durumlar dikkate alınarak oluşturulmuş senaryolar aşağıdaki Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5. Test sistemi 2'de kullanılan senaryolar

Kompanzasyon Durumu	Koruma Bölgesi	Salınım Durumu	Arıza yeri (Korunan Hattın %)
Yok	1.Bölge ($\leq 0{,}8\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%50
Yok	2.Bölge ($0{,}8\ Z_{7\text{-}8} < \leq 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%100
Yok	3.Bölge ($> 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%150
Yok	1.Bölge ($\leq 0{,}8\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%50
Yok	2.Bölge ($0{,}8\ Z_{7\text{-}8} < \leq 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%100
Yok	3.Bölge ($> 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%150
SC	1.Bölge ($\leq 0{,}8\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%50
SC	2.Bölge ($0{,}8\ Z_{7\text{-}8} < \leq 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%100
SC	3.Bölge ($> 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%150
SC	1.Bölge ($\leq 0{,}8\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%50
SC	2.Bölge ($0{,}8\ Z_{7\text{-}8} < \leq 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%100
SC	3.Bölge ($> 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%150
TCSC	1.Bölge ($\leq 0{,}8\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%50
TCSC	2.Bölge ($0{,}8\ Z_{7\text{-}8} < \leq 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%100
TCSC	3.Bölge ($> 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararlı	%150
TCSC	1.Bölge ($\leq 0{,}8\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%50
TCSC	2.Bölge ($0{,}8\ Z_{7\text{-}8} < \leq 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%100
TCSC	3.Bölge ($> 1{,}2\ Z_{7\text{-}8}$)	Kararsız	%150

İkinci test sistemi için faz akımları, I_{dc} ve V_{h5} değerleri korunan hattın %100'ü bir uzaklıktaki bir arıza için aşağıdaki Şekil 5.17'de verilmiştir. Şekil kompanze edilmemiş

ve seri kompanze edilmiş durumları dikkate almaktadır ve kararlı salınım durumu dikkate alınmıştır. Arıza 4,8s'de başlamıştır ve 75ms sürmektedir.



Şekil 5.17. İkinci test sistemi; a) kompanze edilmemiş, b) SC ile kompanze edilmiş ve c) TCSC ile kompanze edilmiş durumlarda V_a, V_b ve V_c faz gerilimleri, I_{dc} ve V_{h5} değerleri

Kararlı salınım olduğundan 2. koruma bölgesinde oluşan bir arıza olmasına rağmen arıza öncesi I_{dc} ve V_{h5} değerleri sıfıra yakındır. I_{dc} ve V_{h5} grafiklerinin bir önce verilen grafikle özellikle kompanzasyon durumlarında daha farklı olduğu görülmektedir, I_{dc} tepe noktasında yaşanan azalma minimum durumda olmasına karşın I_{dc} tepesi çabuk sönmüştür. V_{h5} grafiğinde ise arıza başlangıcında yüksek seviyelere ulaştığı ve birden fazla tepe oluşturduğu görülmektedir, yöntemde verilen arıza başlangıcı sonrası iki periyotluk kilit sistemi olmasaydı bu durumda arıza nedeniyle oluşan V_{h5} değerlerinden arıza sonu tespit etmesi durumu yaşanabilirdi.

5.3.2.2. Her Bir Senaryo için Elde Edilen Sonuçlar

Kompanze edilmemiş sistemler için geliştirilen yöntem bu test sisteminde iki farklı örnekleme frekansı altında denendi ve farklı frekanslardaki etkinliği test edildi. 5kHz ve 20kHz örnekleme frekansları için alınan sonuçlar yöntemin esnekliğini ve hızlı tespitini kanıtlar niteliktedir (Tablo 5.6).

Tablo 5.6. Test sistemi 2 için kompanze edilmemiş durum odaklı yöntemin sonuçları

Arıza yeri	Salınım tipi	Arıza anı tespiti gecikmesi (ms)		Arıza sonu tespiti gecikmesi (ms)	
		20kHz	5kHz	20kHz	5kHz
Bara 7 ve 8'in orta noktası	Kararsız	0,55	1,2	0,35	0,2
Bara 7 ve 8'in orta noktası	Kararlı	0,7	0,8	0,15	0,2
Bara 7 ve 8'in orta noktası	Salınım Yok	0,4	0,4	0,2	0,2
Bara 8	Kararsız	1,25	1,4	0,4	0,6
Bara 8	Kararlı	0,85	1	0,35	0,4
Bara 8	Salınım Yok	0,55	0,6	0,35	0,6
Bara 8 ve 9'un orta noktası	Kararsız	1,65	1,8	0,6	0,6
Bara 8 ve 9'un orta noktası	Kararlı	1,2	1,2	0,55	0,6
Bara 8 ve 9'un orta noktası	Salınım Yok	0,8	1	0,35	0,6

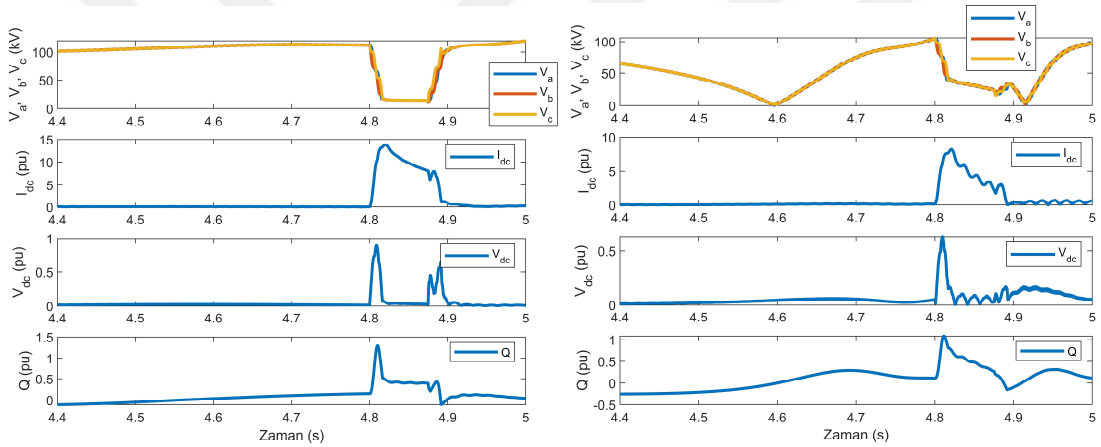
Beklenildiği gibi daha yüksek örnekleme frekansı ile daha iyi sonuçlar elde edildi. Ancak düşük örnekleme frekansı bile bu test sistemi için dikkate değer bir fark oluşturmadı. Özellikle arıza sonu tespiti örnekleme frekansı değişiminden neredeyse etkilenmemiş şekilde gözükmektedir. Kompanzasyon odaklı yöntemin sonuçları ise Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Test sistemi 2 için kompanzasyon odaklı yöntemin sonuçları

Salınım tipi	Kompanzasyon durumu	Arıza anı tespitindeki gecikme (ms)		
		Korunan hattın %50si	Bara 8	Uzak hattın %50si
Kararlı	Kompanzasyonsuz	6,2	6,2	6,4
	SC	2	2,4	2,8
	TCSC	2	2,4	3
Kararsız	Kompanzasyonsuz	2	2,4	2,8
	SC	2,2	2,4	3,2
	TCSC	2,2	2,6	3,4

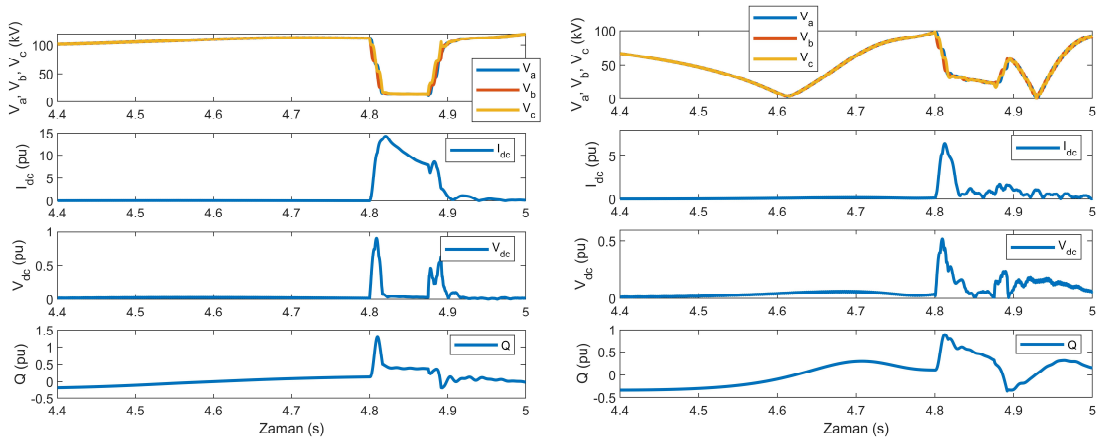
Kompanzasyon odaklı yöntemin kompanzasyon durumunda arıza anını hızlı bir şekilde tespit edebildiği görülmektedir. Yine kabul edilebilir sınırlar içinde olsa da kompanze edilmemiş durumda kararlı salınımda bir gecikme söz konusudur. Ancak yöntemin odak noktası kompanzasyonlu sistemlerdir ve o kısımda başarılı olmuştur. Arıza sonu tespitinde ise gözlenen maksimum gecikme 1ms'dir.

WSCC 9 baralı test sisteminde senaryoların arıza tespitinde kullanılan değerlerine etkisini görmek için kompanzasyonsuz durum, SC kompanze durum ve TCSC kompanze durum için kararlı salınımda koruma noktasına en yakın ve kararsız salınım durumunda koruma noktasına en uzak noktalar için gerilimin RMS değerleri, I_{dc}, V_{dc} ve Q değişimleri sırasıyla Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'te verilmiştir.



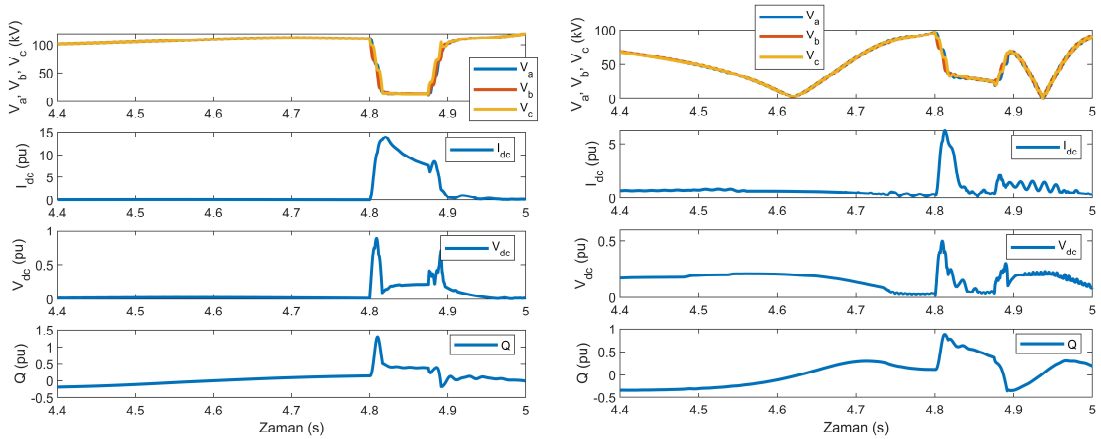
a) b)

Şekil 5.18. İkinci test sistemi; kompanze edilmemiş senaryoda a) korunan hattın %50si kararlı salınım durumunda arıza, b) uzak hattın %50si kararsız salınım durumunda arıza



a) b)

Şekil 5.19. İkinci test sistemi; SC kompanzasyonunda a) korunan hattın %50si kararlı salınım durumunda arıza, b) uzak hattın %50si kararsız salınım durumunda arıza



a) b)

Şekil 5.20. İkinci test sistemi; TCSC kompanzasyonunda e) korunan hattın %50si kararlı salınım durumunda arıza f) uzak hattın %50si kararsız salınım durumunda arıza

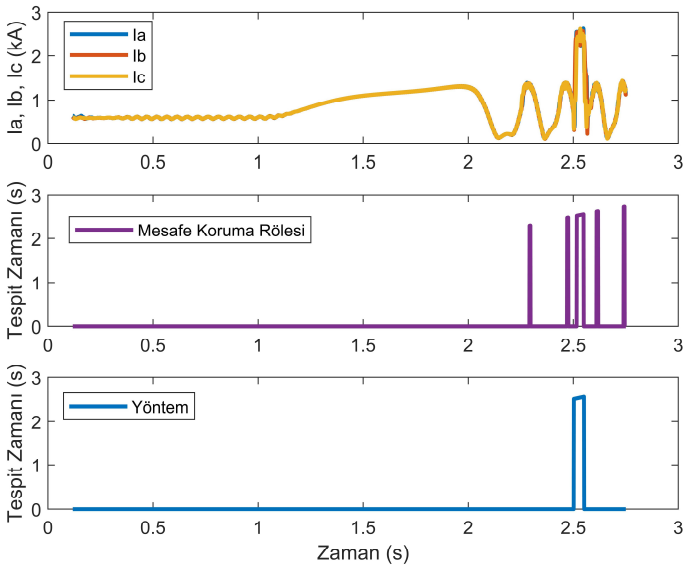
Grafikler incelendiğinde kompanze edilmemiş ve kompanzasyonlu sistemler arasında gözlenen fark özellikle kararlı salınımda çok düşük seviyededir. Kararsız salınım durumuna bakıldığında I_{dc} akımı, kompanzasyonlu sistemlerde arıza anında düşük değerdedir, bu fark DC gerilim ve reaktif güç yönünün kullanılmasını ve DC akımda sinyal kaydırma kullanılması gereksinimini ortaya çıkarmaktadır, bu durum ilgili gecikmeye yol açmaktadır.

5.4. Alınan Sonuçların Değerlendirilmesi

İki yöntemin de ayrı odak noktaları vardır ancak kompanzasyon odaklı yöntemin görüldüğü üzere kompanze edilmemiş durumlarda da çalışabildiği testler sonucunda elde edilmektedir. Kompanze edilmemiş sistem odaklı yöntem de aynı şekilde kompanzasyonlu sistemlerde çalışabilmektedir, elde edilen sonuçlar çok değişken olmakla beraber kompanzasyonlu senaryoların belli bir kısmında beklenen gecikme süresi aralığında arıza başlangıcını bulmakta zorlanmaktadır. Kompanzasyon senaryolarına ait özel durumlar nedeniyle eklenen ek parametreler, kompanze edilmemiş durumlarda gecikmeye neden olmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi kompanzasyon DC bileşen akımını sınırlamaktadır ve seçimi güçleştirmektedir, TCSC kontrol hareketleri de arıza ve salınım benzeri etkilere yol açabilmektedir. Sadece kompanze edilmemiş durumda kullanılan parametreleri kullanmak hatalı arıza tespitine yol açar, bu parametre değiştirmek veya şartları bu duruma göre düzenlemek daha geç arıza anı tespitine yol açar, bu nedenle bu ek parametreler eklenmiştir, bu özel durumlarda asıl belirleyici bu

parametrelerdir. Görüldüğü üzere iki yöntemde odaklandığı sistemlerde yüksek doğruluk ile çalışmakta ancak kendi senaryoları dışında güçlü dezavantajlar yaşamaktadırlar. Yöntemlerin satürasyon durumundaki cevaplarını da gözlemlemek için ek olarak akım transformatörünün satürasyon durumu PSCAD ilgili modelleri ile test edilmiş ancak yönteme bir etkisi görülmemiştir.

Bir önceki bölümde kompanzasyonsuz durum için geliştirilen yöntem ve ek bir yardımcısı olmayan bir mesafe rölesinin kararsız salınım altındaki davranışları arıza durumu odaklı olarak verilmişti. Hem yöntemlerin mesafe rölesine katkısını göstermek hem de geniş bir perspektiften durumun incelenmesi amacıyla ek bir örnek hazırlanmıştır. İletim hattının TCSC ile kompanze edildiği uygulamada, röleye en yakın noktada, 1.s'de başlayan kararsız salınım altında oluşan (1. bölge) 2,5s'de 50ms'lik bir arızanın basit bir mesafe rölesi uygulamasına ve yöntemimize etkisi Şekil 5.21'da verilmiştir. Mesafe rölesi güç salınımı için yardımcı uygulama kullanmamaktadır.



Şekil 5.21. Birinci test sistemi; TCSC kompanzasyonunda kararsız salınım durumunda arızaya mesafe koruma rölesi ve geliştirilen yöntemin cevapları

Şekilde görüldüğü gibi röle uygulaması akım artışlarını arıza olarak görmüştür, geliştirilen yöntem ise arıza anını doğru olarak ayırabilmiştir. Özellikle arıza sonrası devam eden salınımların röleye etkisi yedek koruma için doğru ve hızlı arıza sonunun tespitini vurgulamaktadır. İlgili şekil salınım altında mesafe koruma rölesinin tek başına kullanılamayacağını göstermektedir. Mesafe koruma röle uygulaması geliştirilen yöntem ile beraber kullanıldığında salınım durumunda hatalı açma olayları yöntemin röleyi bloke

etmesi ile yaşanmayacaktır, arıza anında gerektiği gibi çalışabilecektir ve arızanın giderilmesi sonrası devam eden salınımlardan da röle etkilenmeyecektir. Geliştirilen yöntem, röle ile kullanılarak, rölenin fonksiyonu olan yükün devreye alınması, yükün devreden çıkması durumlarının arıza olarak görülmemesi, röleye girilen bilgiler ve benzeri durumlardan faydalanmakta ve bunları önlemek veya veri girişi sağlamak için ek bir uygulamaya ihtiyaç duymamaktadırlar.

6. KARŞILAŞTIRMA ANALİZİ

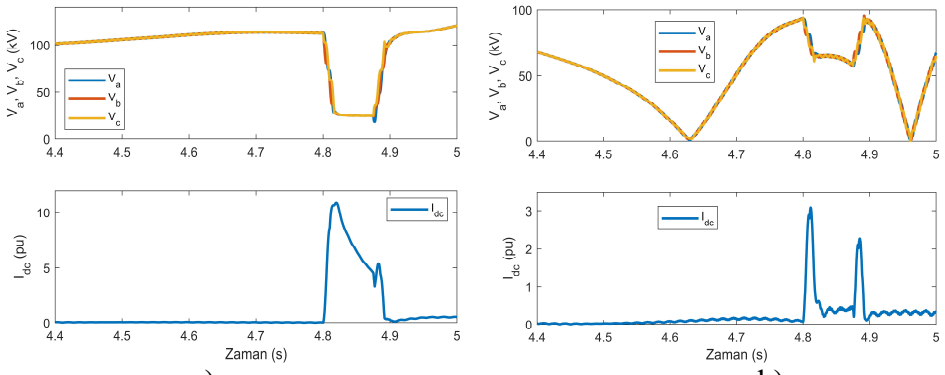
Bu başlıkta amaç iki yöntemin de literatürde var olan diğer yöntemler ile karşılaştırılması ve geliştirilen yöntemlerin güçlü ve zayıf yanlarının sergilenmesidir. Karşılaştırılan yöntemler aynı test sistemini baz almışlardır, röleleri uygulamamızda bulunan röle ile aynı noktadadır ve koruma yaptıkları hat ile uygulamamızda koruma yapılan hat aynıdır. Bu kısımda I_{dc} grafikleri yöntemlerin ve senaryoların birbirleri ile karşılaştırılabilmeleri için sinyal kaydırma işlemi yapılmamış olarak gösterilecektir.

6.1. Kompanze Edilmemiş Sistemlerde Karşılaştırma

Karşılaştırma için öncelikle kompanze edilmemiş durumu dikkate alan yöntem seçilmiştir. Daha kapsamlı bir karşılaştırma için senaryolar genişletilmiştir. Bu kapsamda daha önce 0,01Ω olarak alınan arıza direncinin 1-100 Ω aralığında etkisine bakılmış, ayrı bir senaryo oluşturulmayan arıza başlangıç açısı için ise 0-90^o arasındaki değişimi dikkate alınmıştır. Uygulanan salınım frekansları da genişletilmiş ve üç farklı frekans aralığı için sunulmuştur.

6.1.1. Arıza Direncinin Etkisi

Karşılaştırma için 1-100 Ω arası değişen arıza direnci senaryoları ile arıza direncinin yönteme etkisi paylaşılmıştır. İlgili senaryoların daha net anlaşılabilmesi için arıza tespitinde kullanılan I_{dc} parametresine etkisine bakılması gerekir. 1Ω arıza dirençli kararlı güç salınımı durumu ve 200Ω arıza dirençli kararsız güç salınımı durumlarında I_{dc} parametre değişimleri Şekil 6.1'de sunulmuştur.

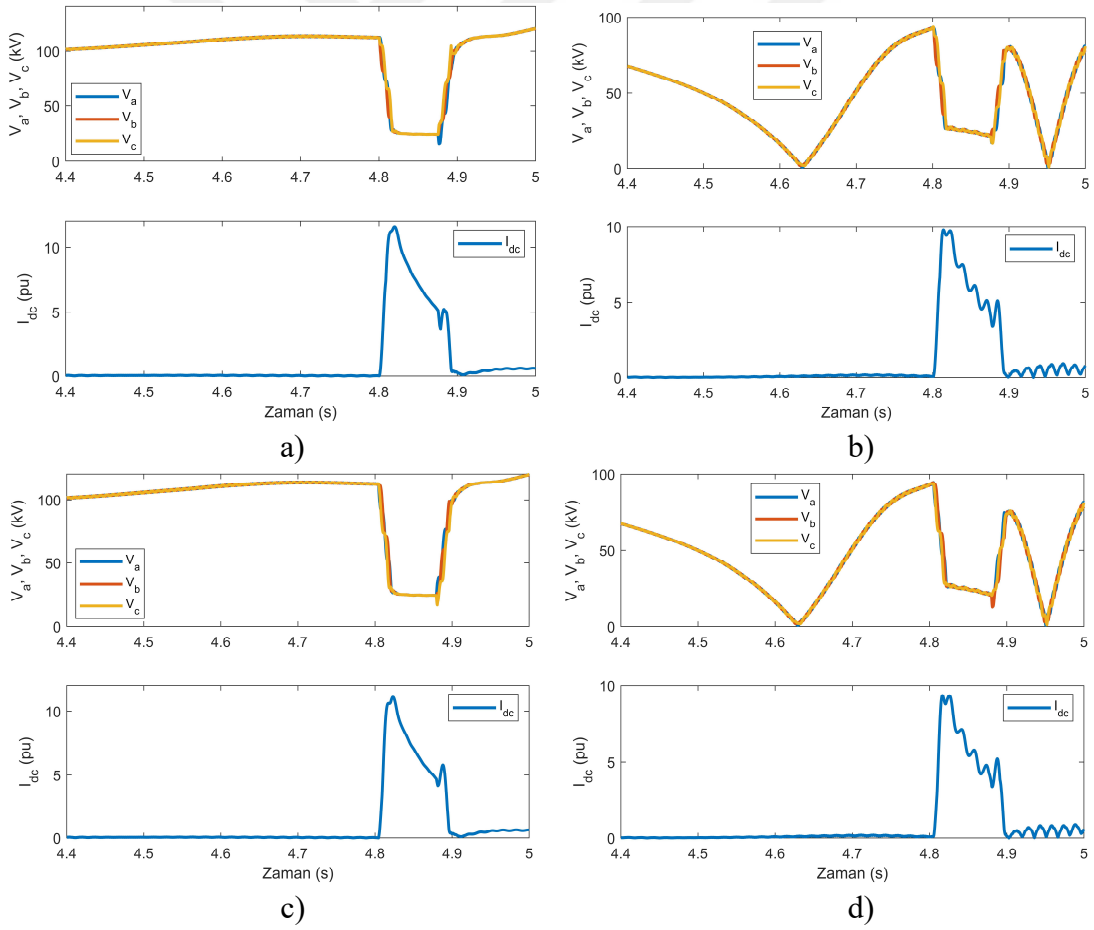


Şekil 6.1. İkinci test sistemi; kompanze edilmemiş senaryoda a) 1Ω kararlı salınım durumunda arıza b) 200Ω kararsız salınım durumunda arıza

Şekilde I_{dc} parametresine bağlı geliştirilen yöntem açısından, kararlı salınımlı ve düşük arıza dirençli durum en iyi, kararsız salınımlı ve yüksek arıza dirençli durum en kötü durum olarak ele alınmıştır. Aynı arıza yerinde gözlenen bu iki durum sabit bir eşik değer ile yorum yapılamayacağını ve dinamik bir eşik değer gerekliliğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen yöntem zarf uygulaması ile dinamik eşik değer tabanlı olduğundan bu senaryonun etkisinin az olacağı sonucuna ulaşılmaktadır.

6.1.2. Arıza Başlangıç Açısının Etkisi

Karşılaştırma için verilen senaryolarda farklı arıza başlangıç açılarının yönteme etkisi paylaşılmıştır. İlgili senaryoların daha net anlaşılabilmesi için arıza tespitinde kullanılan I_{dc} parametresi, 0°, 90° için kararlı ve kararsız salınım durumlarında Şekil 6.2'de sunulmuştur.

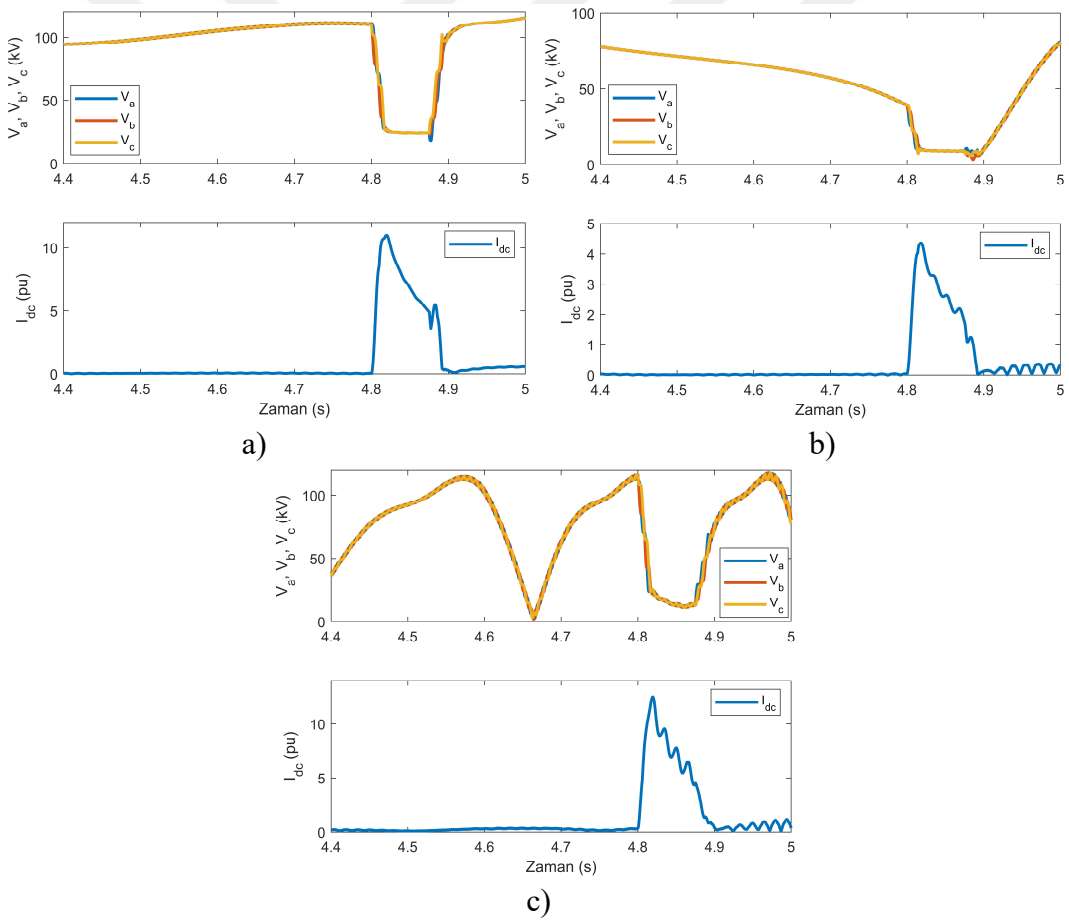


Şekil 6.2. İkinci test sistemi; kompanze edilmemiş senaryoda a) 0° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, b) 0° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu, c) 90° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, d) 90° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu

Şekillerden arıza başlangıç açısının, I_{dc} parametresine etkisinin sınırlı olduğu gözlenebilmektedir, yönteme etkisinin de minimum düzeyde olacağı söylenebilir.

6.1.3. Salınım Frekansı Değişiminin Etkisi

WSCC 9 baralı test sisteminde salınım oluşturmak için daha önce belirtildiği gibi 5. barada 4. saniyede arıza oluşturulmakta ve bu arızaların sürelerine göre farklı frekanslarda salınımlar elde edilmektedir. Bu senaryo kapsamında bu arıza süreleri değiştirilmiş ve daha geniş kapsamlı bir salınım frekansı testi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu senaryoları örnek olarak ifade etmek için 90ms, 110ms ve 190ms arıza sürelerinde oluşan 1,35Hz, 5,6Hz ve 9,1Hz salınımlarında arıza durumu Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. İkinci test sistemi; a) 1,35Hz'lik güç salınımı, b) 5,6Hz'lik güç salınımı ve c) 9,1Hz'lik güç salınımı örneklerinde arıza durumu

Şekilde a şıkkının kararlı ve c şıkkının karasız salınım olduğu görülmektedir. I_{dc} değerleri ve tepe oluşturma hızları benzer olduğundan yöntemin zorlanmayacağını söylemek

mümkündür. Ancak b şıkkı daha önce verilen örneklerden farklıdır, ilgili arıza anı kararsız salınımda oluşan ilk kubbenin bitişinde oluşmuştur, gerilim grafikleri ne kadar kararlı salınıma benzese de kararsız bir salınımdır ve bu durum c şıkkından farklı olarak arıza anında düşük I_{dc} değerlerine yol açmıştır.

6.1.4. Literatür ile Karşılaştırma

Kompanze edilmemiş sistem odaklı yöntem, 5kHz örnekleme frekansını kullanılarak 2 farklı çalışma ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan ilk çalışma (Kaffashbashi ve Damchi, 2023) gerilim enerji sinyalini temel alan istatiksel bir yaklaşım kullanmıştır, karşılaştırmada D-1 olarak ele alınacaktır. Diğer çalışma ise (Patel, 2019) Lissajous tabanlı bir yöntem ile arıza tespiti yapmaya çalışmıştır, bu yöntem D-2 olarak gösterilecektir. Geliştirilen yöntem ise G-1 ile ifade edilmiştir. Geliştirilen bu yöntem kompanze edilmemiş sistemler için tasarlandığından, geliştirilen yöntem ve karşılaştırılan yöntemlerde kompanzasyon olmayan durumlar dikkate alınmıştır. Karşılaştırmaya ilişkin sonuçlar Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanze edilmemiş durum odaklı yöntemin literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Senaryolar	Maksimum arıza tespiti gecikmesi			Ortalama arıza tespiti gecikmesi			Minimum arıza tespiti gecikmesi		
	G-1 (5 kHz)	D-1 (5 kHz)	D-2 (10 kHz)	G-1 , (5 kHz)	D-1 (5 kHz)	D-2 (10 kHz)	G-1 (5 kHz)	D-1 (5 kHz)	D-2 (10 kHz)
Farklı arıza yerleri									
Bara 7-9	1,8ms	4,2ms	3,7ms	1,04ms	0,55ms	1,55ms	0,4ms	0,1ms	0,7ms
Salınım frekansı									
<1,5Hz	1ms	2,4ms	2,2ms	1ms	0,42ms	1,37ms	1ms	0,4ms	1,1ms
1,5-8Hz	1,6ms	2,6ms	3,2ms	1,3ms	0,71ms	1,96ms	1ms	0,4ms	1,3ms
8-10Hz	2,2ms	3ms	3,2ms	1,3ms	0,94ms	1,76ms	1ms	0,4ms	1,2ms
Arıza direnci									
<1 Ω	1,4ms	4 ms	-	1,2ms	0,73ms	-	1ms	0,2ms	-
10-100Ω	1,6ms	5,6ms	~5,3ms	1,22ms	0,8ms	-	1ms	0,2ms	-
200Ω	1,8ms	6ms	-	1,5ms	0,97ms	-	1,2ms	0,2ms	-
Arıza başlangıç açısı									
0°	1,4ms	-	-	1,15ms	-	-	0,9ms	-	-
22,5°	1,2ms	-	-	0,95ms	-	-	0,7ms	-	-
45°	1,2ms	-	-	1,05ms	-	-	0,9ms	-	-
67,5°	1,4ms	-	-	1,15ms	-	-	0,9ms	-	-
90°	1,2ms	-	-	0,95ms	-	-	0,7ms	-	-

Maksimum gecikme değerinin diğer yöntemlerden düşük olması yöntemin güçlü yanı olduğu söylenebilir. Ortalama ve minimum değerlerde ise yöntem D-1 ile yakın D-2 yönteminden ise daha üstün sonuçlar verdiği görülmektedir. Arıza sonu tespiti geliştirilen yöntemin özellikle yedek korumayı destekleyen bir kısmıdır, bu testlerde elde edilen maksimum, ortalama ve minimum gecikme sırasıyla 1,4ms, 0,53ms ve 0,2ms şeklindedir, karşılaştırılan yöntemler bu kapsamda bir sonuç sunmadıklarından bir karşılaştırma mümkün değildir. Alınan sonuçlarda yöntemin D-2 çalışmasından daha üstün konumda olduğu, D-1 çalışmasından ise hem güçlü hem zayıf yanları olduğu görülmektedir. Ancak ortalama ve minimum gecikmede D-1 ve yöntem yakın olsa da maksimum gecikme değerlerindeki fark geliştirilen yöntemi ön plana çıkarmaktadır. Arıza sonu tespiti de yöntemin güçlü ve özgün kısımlarındandır.

6.2. Kompanze Edilmiş Sistemlerde Karşılaştırma

Kompanzasyon odaklı yöntem de iki farklı yöntem ile karşılaştırılmıştır. (Andanapalli ve Biswal, 2020)'de verilen eşik bazlı çalışma hızlı ama salınımın ayrıca tespitini ve pozitif dizi empedans hesaplamasını gerektiren bir yöntemdir. Bu durum çeyrek periyot kadar bir gecikmeye neden olur. (Biswas ve Nayak, 2019) genelleştirilmiş bir Teager-Kaiser enerji operatörünü anlık akım ölçümlerinde kullanılmasını uygulayan bir çalışmadır ancak yöntemin asimetrik arıza tespitinde yapılan çalışmalara odaklanması ve az durumda simetrik arıza tespiti örneği içermesi, kısaca limitli bir test ortamı ile sonuçların paylaşılması bir dezavantaj olarak ifade edilebilinir. Yöntemin performansı, sabit SC senaryoları için (Andanapalli ve Biswal, 2020)'deki ve TCSC uygulamaları için (Biswas ve Nayak, 2019)'dakilerle karşılaştırılmıştır. Senaryo değişkenleri dışında (tablolarda bu değişkenler verilmiştir), her durum için test başlangıç değerleri; 5kHz örnekleme frekansı, 8. barada 0,01Ω arıza direnci ile oluşan 75ms süren bir arıza şeklindedir.

Farklı arıza yerlerine göre geliştirilen yöntemin sonuçları zaten paylaşılmıştır, bunlarla ilgili bir karşılaştırma yapacak olursak. (Andanapalli ve Biswal, 2020)'de verilen sabit seri kompanzasyon durumunda hattın %47'sinde olan bir arızada minimum 9ms gecikme elde edildiğini görürüz. (Biswas ve Nayak, 2019), hattın %85'inde bulunan bir arıza sırasında sabit seri kompanzasyon durumu için 5ms gecikme paylaşmıştır. Yöntemimizin sabit seri kompanzasyon durumunda test edilen bütün arıza yerlerinde 2-3,2ms arasında

değişen gecikmesi bulunmaktadır, bu sonuçların diğer yöntemlerin sonuçlarından üstün olduğu açıktır.

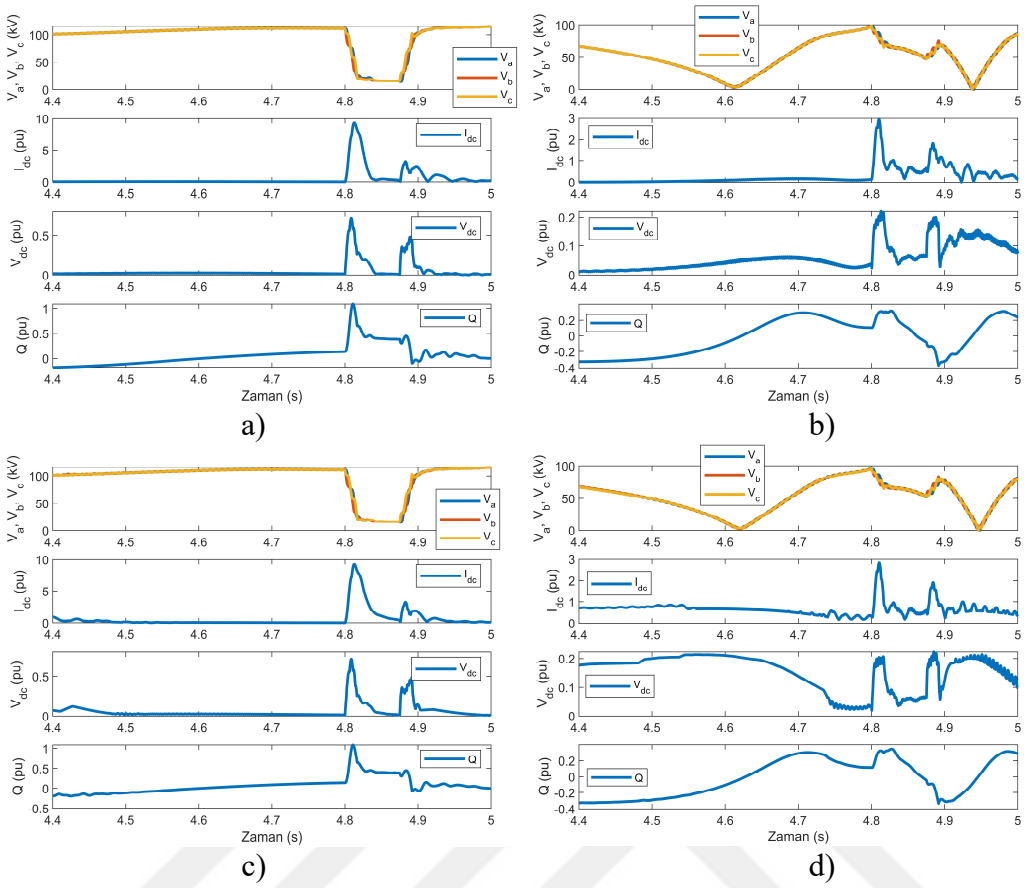
TCSC senaryosu için (Biswas ve Nayak, 2019), korunan hattın sırasıyla %30, %70 ve %150'si için arıza başlangıcı tespitinde 4, 5 ve 6ms gecikme yaşarken yöntemimizin aynı kompanzasyon senaryosunda farklı arıza yerlerindeki gecikmesi 2-3,4ms aralığındadır. Hem SC hem de TCSC kısmında geliştirilen yöntemin üstünlüğü görülmektedir.

6.2.1. Farklı Arıza Direncinin Etkisi

Bu senaryoda 0,01Ω - 200Ω aralığında direnç değerleri için testler yapılmıştır. Farklı arıza dirençlerindeki sonuçlar Tablo 6.2'de paylaşılmıştır, tablodan sonra diğer yöntemler ile karşılaştırılması özetlenmiştir. Şekil 6.4'te ise senaryonun arıza tespitinde kullanılan parametrelerine etkisini görmek için SC ve TCSC kompanzasyonlarında 1Ω kararlı salınım ve 200Ω kararsız salınım durumları paylaşılmıştır.

Tablo 6.2. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin farklı arıza dirençlerindeki sonuçları

Salınım	Arıza direnci	Arıza başlangıcı tespitindeki gecikme(ms)		
		Kompanzasyon		
		Kompanzasyonsuz	SC	TCSC
Kararlı	0,01 Ω	6,2	2,4	2,4
	1 Ω	6,2	2,4	2,4
	10 Ω	6	2,4	2,4
	50 Ω	6	2,6	2,6
	100 Ω	5	2,6	2,6
	200 Ω	5	3,2	3,2
Kararsız	0,01 Ω	2,4	2,4	2,6
	1 Ω	2,4	2,6	2,6
	10 Ω	2,6	2,6	2,6
	50 Ω	2,6	2,8	3
	100 Ω	3,2	3	3,4
	200 Ω	3,2	3,6	3,8



Şekil 6.4. İkinci test sistemi; SC kompanzasyonu a) 1Ω arıza direnci kararlı salınım durumu, b) 200Ω arıza direnci kararsız salınım durumu ve TCSC kompanzasyonu c) 1Ω arıza direnci kararlı salınım durumu, d) 200Ω arıza direnci kararsız salınım durumu

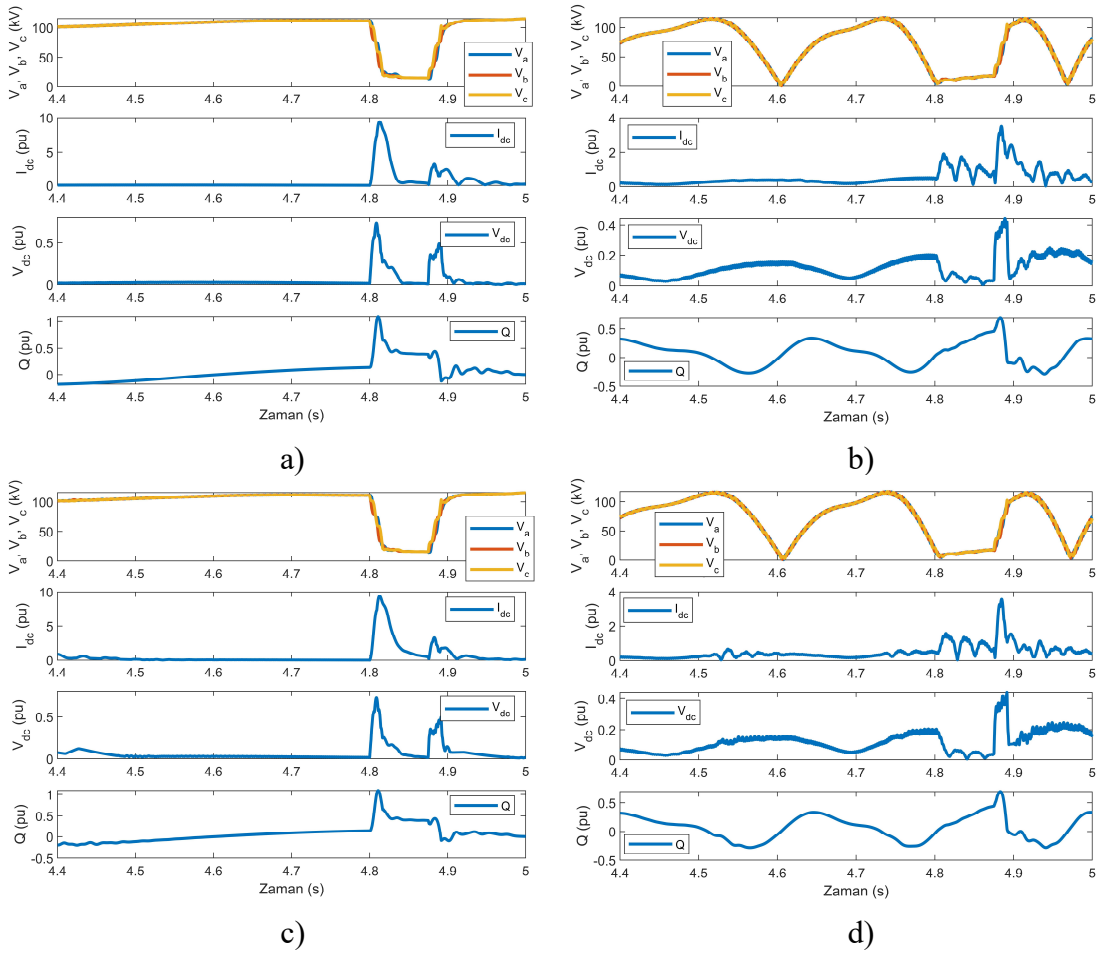
(Andanapalli ve Biswal, 2020) makalesi 10Ω arıza direnci altında kararlı salınımlarda ve 100Ω arıza direnci altında kararsız salınımlarda sırasıyla 9 ve 12ms gecikme ile arıza tespiti yapmıştır. İki katı arıza direncine çıkmamıza rağmen bu gecikmelere yaklaşılmamış olması geliştirilen yöntemin daha hızlı arıza tespiti yaptığını kanıtlamıştır. (Biswas ve Nayak, 2019), sadece düşük arıza direncinde simetrik arızalar ile testler yapmıştır, bu testler sonucunda 4-6ms gecikme gözlenmiştir, alınan arıza dirençleri 1Ω'dan düşük değerdedir. Yöntemimiz arıza direnci konusunda özellikle bir tercih sebebi olabileceğini göstermiştir.

6.2.2. Farklı Salınım Frekansının Etkisi

Farklı salınım durumlarına ilişkin elde edilen sonuçlar (Tablo 6.3) ve karşılaştırmalar aşağıda paylaşılmıştır. Şekil 6.5'te SC ve TCSC kompanzasyon durumları için farklı salınım frekanslarında arıza tespit parametreleri değişimleri paylaşılmıştır.

Tablo 6.3. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin farklı salınım frekanslarındaki sonuçları

Kompanzasyon	Arıza başlangıcı tespitindeki gecikme (ms)		
	Salınım frekansları		
	<1,5 Hz	1,5 Hz < < 7Hz	7 Hz ≥
Kompanzasyonsuz	8,6	2,4	9,2
SC	2,4	2,4	6
TCSC	2,4	2,6	8



Şekil 6.5. İkinci test sistemi; SC kompanzasyonu a) 1,37Hz salınım durumu, b) 7Hz salınım durumu ve TCSC kompanzasyonu c) 1,35Hz salınım durumu, d) 7,5Hz salınım durumu

(Andanapalli ve Biswal, 2020) 0,2 ile 7Hz arası salınım frekanslarını dikkate almıştır ve SC için minimum 9ms arıza tespiti gecikmesine sahiptir. (Biswas ve Nayak, 2019) SC için 2,5Hz güç salınım frekansı için 5ms gecikme elde etmiştir, TCSC senaryosunda ise

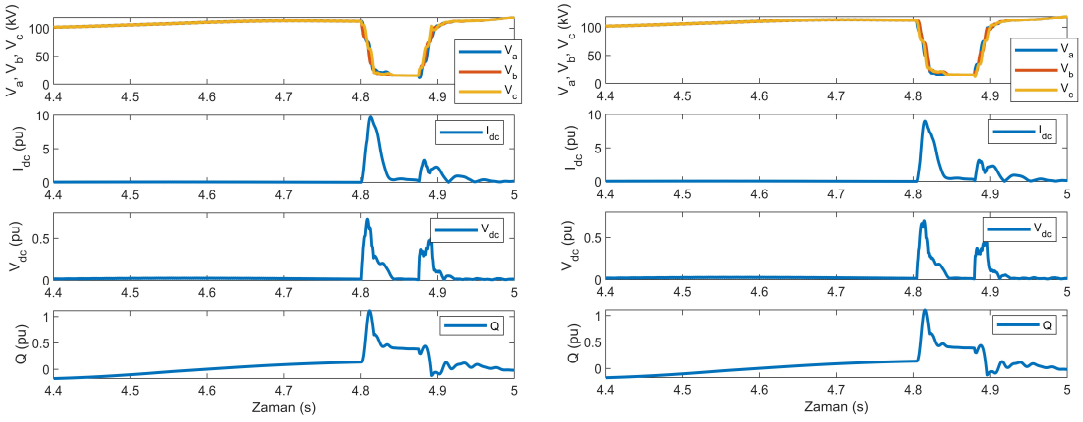
0,5Hz, 5Hz, 7Hz güç salınım frekansları test edilmiş ve sırasıyla 4-6ms, 4ms, 5ms gecikmeler elde edilmiştir. Kompanzasyon odaklı yöntem, 7Hz altındaki salınımlar için düşük bir gecikme ile arıza başlangıcı tespiti yapabilmektedir, 7Hz'den büyük frekanslar için karşılaştırılan yöntemlerin örnek sayısı çok azdır ancak sonuçlarımıza yakın cevaplar sunmuşlardır.

6.2.3. Farklı Arıza Başlangıç Açısının Etkisi

Tablo 6.4'te farklı başlangıç açılarına ilişkin sonuçlar paylaşılmıştır. Şekil 6.6'te SC ve Şekil 6.7'te TCSC kompanzasyon durumunun 0° ve 90° senaryolarında kararlı ve kararsız salınım altındaki arıza tespiti parametreleri paylaşılmıştır.

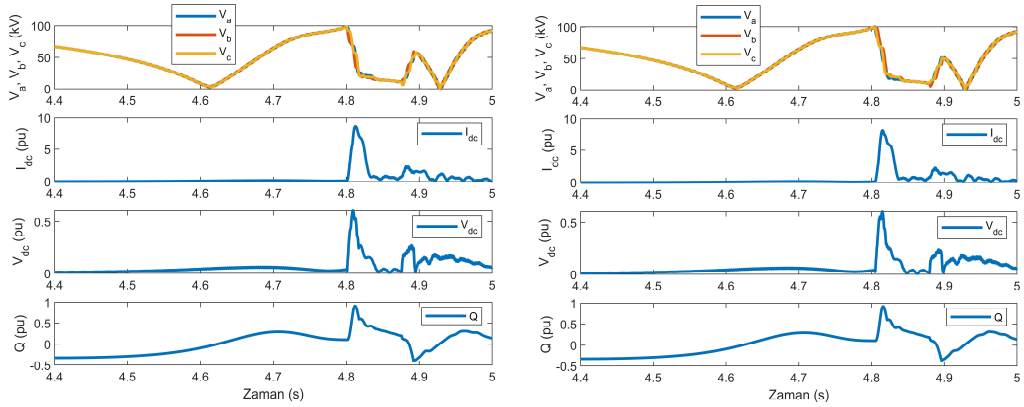
Tablo 6.4. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin farklı arıza başlangıç açısındaki sonuçları

Salınım	Kompanzasyon	Arıza başlangıcı tespitindeki gecikme (ms)				
		Arıza başlangıç açısı				
		0°	22,5°	45°	67,5°	90°
Kararlı	Kompanzasyonsuz	5,8	7,8	6,8	8,6	7,6
	SC	2,3	2,1	2,3	2,1	2,3
	TCSC	2,3	2,1	2,3	2,3	2,3
Kararsız	Kompanzasyonsuz	7,6	7,6	6,6	7,4	7,4
	SC	2,45	2,25	2,45	2,25	2,25
	TCSC	3,6	3,8	4	4	4,4



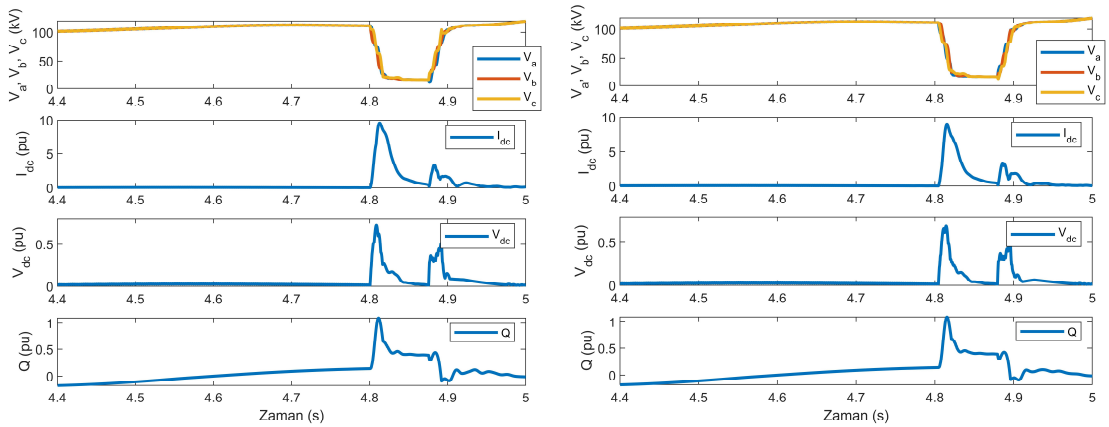
a) b)

Şekil 6.6. İkinci test sistemi; SC kompanze edilmiş senaryoda a) 0° arıza başlangıç açısı ve b) 90° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, c) 0° arıza başlangıç açısı ve d) 90° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu

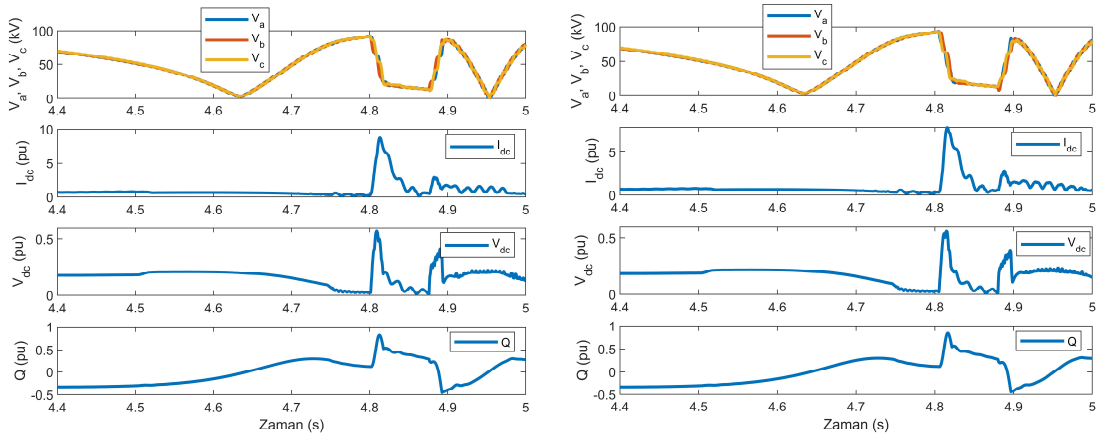


c) d)

Şekil 6.6. (Devam) İkinci test sistemi; SC kompanze edilmiş senaryoda a) 0° arıza başlangıç açısı ve b) 90° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, c) 0° arıza başlangıç açısı ve d) 90° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu



a) b)



c) d)

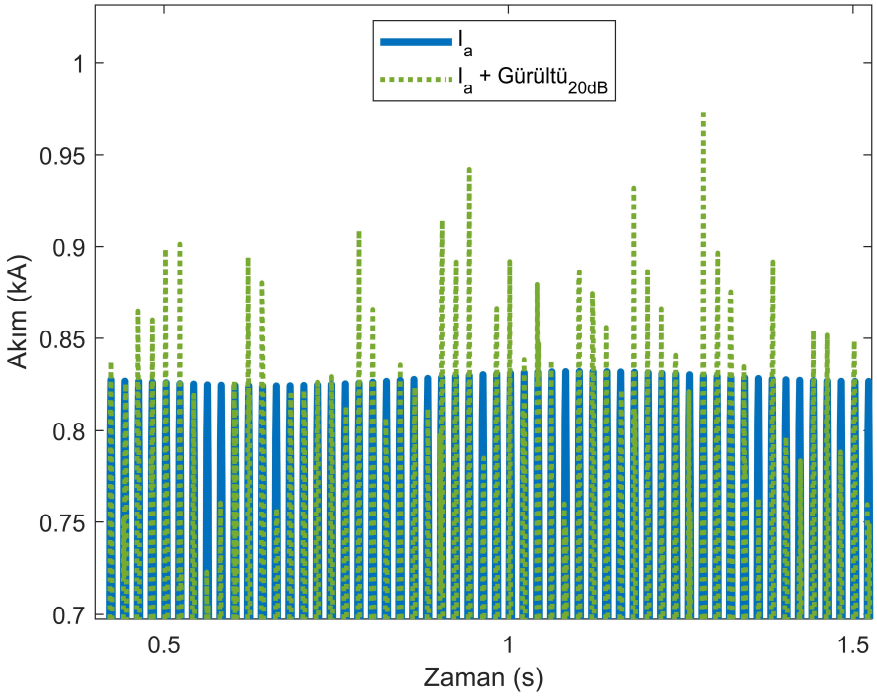
Şekil 6.7. İkinci test sistemi; TCSC kompanze edilmiş senaryoda a) 0° arıza başlangıç açısı ve b) 90° arıza başlangıç açısı kararlı salınım durumu, c) 0° arıza başlangıç açısı ve d) 90° arıza başlangıç açısı kararsız salınım durumu

Diğer yöntemlerin bu konuda çalışmaları yoktur, ancak yöntemimizin bu senaryolardan da minimum etkilendiği gözlenmektedir. Kompanzasyonlu her durumda gecikme 4,5ms'nin altında kalmıştır.

Karşılaştırılan yöntemlerde arıza sonu tespiti olmadığından yer verilmemiştir ancak genel olarak bütün senaryolarda arıza sonu 1,2ms'nin altında görülmüştür.

6.2.4. Gürültülü Durumun Etkisi

Yöntem ayrıca gürültü durumu içinde test edilmiştir. 20-40dB SNR gürültüye sahip akım ve gerilim için 3 baralı test sisteminde SC kompanzasyonlu durumda sonuçlar incelenmiş ve arıza başlangıcının bulunması durumunda herhangi bir etkisi olmadığı görülmüştür, arıza sonunun tespitine ilişkin senaryolarda ise 2ms değerine kadar bir gecikme durumu gözlenmiştir. Eklenen gürültünün anlaşılması için 20dB SNR'a sahip a fazı ve gürültüsüz a fazı sinyali Şekil 6.8'te verilmiştir. Verilen sinyallerde gürültü dışında bir bozucu bulunmamaktadır.



Şekil 6.8. Birinci test sisteminde gürültüsüz a fazı akım sinyali ve 20dB SNR'a sahip a fazı akım sinyali

Gürültü testinde en büyük bozulma durumu 20dB SNR'da yaşanmaktadır. SNR durumunda dB değeri arttıkça sinyalde daha az gürültü oluşmaktadır. Gürültü Matlab'ın sinyale beyaz Gauss gürültüsü ekleme fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

6.2.5. Literatür ile Karşılaştırma

Genel karşılaştırma özeti Tablo 6.5'te verilmiştir. Karşılaştırılan çalışmalarda senaryo sayısının az olduğu sonuçlar kısmında dikkate alınmalıdır. Arıza direnci ve salınım frekansı senaryolarında sunulan yöntem daha zor şartlarda test edilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır.

Tablo 6.5. WSCC 9 baralı test sistemi için kompanzasyon odaklı yöntemin genel karşılaştırma sonuçları

Senaryo	(Andanapalli ve Biswal, 2020)	(Biswas ve Nayak, 2019)	Kompanzasyon Odaklı Yöntem
	Kompanze durumlardaki arıza başlangıcı tespitinde yaklaşık ortalama gecikme (ms)		
Farklı Arıza Yerleri	9ms	4,25ms	2,55ms
Arıza Direnci	11,34ms	5ms	2,76ms
Farklı Salınım Frekansları	10,5ms	4,67ms	4ms
Arıza Başlangıç Açısı	-	-	2,73ms

Tablo incelendiğinde sunulan yöntemin üstünlüğü görülmektedir. Özellikle arıza direnci senaryolarının arıza başlangıcının tespitini minimum ölçüde etkilemesi dikkat çekmektedir. Sonuçlardan, genel olarak yöntemin doğruluğu ve sistem değişkenlerinin yönteme etkilerinin diğer yöntemler gözlendiğinde çok daha az olduğu gözlenmektedir. Yöntemin farklı test sistemlerinde, farklı kompanzasyon durumlarında ve farklı test senaryolarında verdiği sonuç uygulanabilirliği ve doğru sonuç vermesi konularında diğer yöntemlerden daha ön planda olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Hem kompanzasyon odaklı yöntem hem de kompanze edilmemiş durum odaklı yöntem ile yapılan karşılaştırmalar literatürde yedek korumada yardımcı olabilecek, detaylı arıza sonu tespiti ile ilgili bir çalışma yapılmadığını göstermektedir. Kompanze edilmemiş yöntemin sonuçları farklı senaryolarda bile birbirine yakın ve hızlı bir arıza tespiti

sunmuştur. Kompanzasyon odaklı yöntemin ise daha geniş bir kullanım alanı vardır ve kompanzasyon durumunda verdiği sonuçlar üstünlük sağlamıştır. Genel olarak yöntemler geliştirmeye açıktır, optimizasyon ile alınan zarf verilerini azaltmak mümkündür, iki yöntem, sistemde kompanzasyon olup olmadığını anlayan ek bir uygulama ile tek bir yöntem haline uyarlanabilir veya salınım durumunu izleyen bir sistem ile sadece salınım durumlarında çalışmaları sağlanabilir. Görüldüğü üzere yöntemler özellikle yedek çalışma için ek bir güvenilirlik sunuyorken, geliştirmeye açık yapıları ile herhangi bir uygulamaya uyum sağlayabileceklerini de göstermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kompanze edilmemiş ve kompanzasyonlu sistemler için güç salınımı altında mesafe rölesinin doğru açma vermesi konusu ele alınmıştır. Güç salınımı durumunda mesafe rölesinin yetersiz kaldığı, geleneksel ve geliştirilen yöntemlerin beklentiyi karşılamadığı ve özellikle kompanzasyonlu sistemler için yeni bir yaklaşım gerekliliği tespit edilmiştir. Bu eksiklik ve yetersiz durumların giderilmesinin önemi dikkate alınarak, güç salınımı altında mesafe rölesine yardımcı yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen yöntemin kompanze edilmemiş ve farklı kompanzasyon durumları için doğrulukla çalıştığı görülmektedir.

Mesafe koruma rölesi görülen empedansa dayalı olarak çalışmakta ve bu nedenle görülen empedansı etkileyen bozuculardan olumsuz etkilenmektedir. Güç salınımları bu bozuculardan biridir. Mesafe koruma rölesinin doğru çalışmamasının güvenilirliği etkileyeceği dikkate alınırsa, konu önem arz etmektedir. Kısaca mesafe koruma rölesi arıza anında girilen ayara göre açma verdirmeli ama güç salınımı durumunda açma sinyali göndermemelidir. Bu sorunun önlenmesi için geliştirilen geleneksel yöntemler vardır. Bu yöntemler genel olarak bir eşik değer tabanlı çalışmaktadır. Bu eşik değer güç sistemine özel olduğundan, güç salınımı frekansı, arızanın tipi, arıza yeri ve benzeri etkenlerden olumsuz etkilenmektedir. Bütün bu durumları hesaba katıp bir eşik değer oluşturmak zordur ve her güç sistemi için ayrı ayrı bu değerler seçilmelidir. Bu nedenle bir çalışmada bazı geleneksel yöntemler doğru sonuç verirken, farklı çalışmalarda kullanılamaz durumda olduğu görülmektedir.

Güç sistemlerinde yaşanan salınım ve bu salınım altında oluşan arızanın mesafe koruma rölelerine etkisi ile ilgili problemin çözümü konusunda literatürde güncel çalışmalar da bulunmaktadır. Tez kapsamında dikkate alınan bu çalışmaları kompanze edilmemiş ve kompanze edilmiş sistemler odaklı olarak iki kısma ayırmak mümkündür. Kompanze edilmemiş sistemler için dikkate alınan iki yayından biri güç değerleri tabanlı, diğeri ise Lissajous tabanlıdır. Kompanzasyon durumları için ise Teager-Kaiser enerji operatörünü kullanan ve pozitif dizi empedansı hesabına dayalı iki farklı yöntem dikkate alınmıştır.

Tez kapsamında dinamik bir eşik değere bağlı yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Geliştirilen yöntem, simetrik arızalara odaklanmış bir çalışmadır, arıza başlangıcını minimum

gecikme ve yüksek doğrulukla tespit etmektedir. Rölenin yedek çalışma korumasını desteklemek için de arıza sonunu tespit eden bir metotla güçlendirilmiştir. Zarf uygulaması kullanılarak dinamik bir eşik değer elde edilmiş ve geliştirilen yöntemlerin uygulandığı sistemden mümkün olduğunca bağımsız olması sağlanmıştır.

Geliştirilen uygulamanın performansı iki test sistemi yardımıyla sunulmuştur. İlk test sistemi üç baralı bir test sistemidir. Sistemin basit yapısı nedeniyle her test koşulunda yüksek frekanslarda salınım üretmek mümkün olmuştur. İkinci test sistemi ise WSCC 9 baralı test sistemidir. Bu test sistemi literatürde hem kompanze edilmemiş hem de çeşitli kompanzasyonlu uygulamalarda sıkça kullandığından tercih edilmiştir. Bu test sistemi yöntemlerin sağlıklı şekilde karşılaştırılmasına olanak sağlamış ve daha kompleks yapısı nedeniyle, yeni ve farklı bir test ortamı sunmuştur.

Geliştirilen uygulama iki test sisteminde de denenmiş ve literatürdeki yöntemler ile karşılaştırılmıştır. İlk test sistemi uygulamanın genel performansını göstermek için ideal bir durum sergilemiştir. Salınım frekans sınırına yakın kararsız salınımlar ve arıza direnci, arıza açısı ve benzeri senaryoları içeren geniş bir test yelpazesi ile uygulamanın etkisi ortaya konulmuştur. İkinci test sisteminde ise diğer yöntemler ile karşılaştırılarak güçlü yanları sunulmuştur.

Kompanze edilmemiş yöntemin karşılaştırılmasında, güncel yöntemler ele alınmıştır. Bu kapsamda literatürde ilk görülen durum, örnekleme frekansının, dikkate aldığımız frekansa yakın veya üstünde olmasıdır. Bu durum diğer yöntemler ile karşılaştırmada üstünlük sağlamaktadır. Sonuçlar karşılaştırıldığında ise literatürdeki diğer uygulamaların geliştirilen yöntemler ile yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak elde ettikleri sonuçlar daha geniş aralıktadır. Geliştirilen yöntemin maksimum gecikme değerlerinin karşılaştırmalarda oldukça düşük değerde kalması yöntemimizin senaryolardan daha az etkilendiğini ve daha dar bir aralıkta gecikmeye yol açtığını söylemek mümkün olacaktır. Ayrıca arıza sonu tespiti yöntemimize özel bir uygulamadır ve yedek koruma dikkate alındığında önemi ortaya çıkmaktadır.

Kompanzasyon odaklı karşılaştırmalarda ise geliştirilen yöntem daha fazla senaryoda daha zor koşullarda test edilmiştir. Buna rağmen elde edilen gecikme diğer yöntemlerden oldukça düşük seviyededir. Kompanzasyonlu sistemler için geliştirilen yöntemin,

kompanze edilmemiş durumda da çalışabilmesi ayrıca bir ek özelliktir. Ne kadar kompanzasyonlu durumdan daha yüksek bir gecikme elde edilse de doğruluk açısından ve literatürdeki geleneksel yöntemler karşılaştırıldığından uygulanabilir olduğu görülmektedir. Karşılaştırılan yöntemler ve sunulan sonuçlar incelendiğinde, kompanzasyon durumunda yapılan çalışmaların kompanze edilmemiş duruma göre çok yüksek gecikmeler verdiği ve kompanzasyon durumunda genel olarak senaryoların azlığı dikkat çekmektedir. Geliştirilen yöntem bu durum göz önüne alındığında daha da önem kazanmaktadır.

İki test sisteminde de farklı senaryolar sunularak hem arıza başlangıcı hem de arıza sonunun özellikle maksimum değerlere bakıldığında karşılaştırılan yöntemlerin altında bir gecikme ile çalıştığı gözlenmiştir. Özellikle kompanzasyonlu uygulama elde edilen sonuçlarla ve karşılaştırma kısmında gözlenen üstünlüğü ile yöntemin önemini vurgulamıştır. Uygulanan senaryodaki sistem değişimlerinin yönteme etkisinin minimum düzeyde olduğunu söylemek mümkündür, geliştirilen yöntem bütün senaryo ve karşılaştırılmalara karşın minimum gecikme ile arıza başlangıcını bulabileceğini göstermiştir.

Geliştirilen yöntem farklı kompanzasyon koşulları, örnekleme frekansı ve diğer değişken sistem koşullarında çalışacak şekilde geliştirilmiştir. Yöntem yüksek doğruluk ile arıza başlangıcı ve arıza sonu noktalarını bulabilmekte ve mesafe rölesini düşük tespit gecikmesi süresi ile desteklemektedir. Özellikle arıza sonunun çok düşük gecikmeler ile tespit edilmesi, çalışmanın yedek koruma kısmındaki önemini göstermektedir.

KAYNAKLAR

Abdollahzadeh, H., Mozafari, B., Jazaeri, M. (2015). Realistic insights into impedance seen by distance relays of a SSSC-compensated transmission line incorporating shunt capacitance of line. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 65*, 394-407. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.10.037

Abidin, A.F., Mohamed, A., Shareef, H. (2011). Intelligent detection of unstable power swing for correct distance relay operation using S-transform and neural networks. *Expert Systems with Applications, 38*(12), 14969-14975. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.05.050

Albehadili, A., Abdul-Qader, I. (2015). Analysis of distance relay performance on shunt FACTS-compensated transmission lines. *2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*. DOI: 10.1109/EIT.2015.7293339.

Alsyoufi, Y.R., Hajjar, A.A. (2019). A high-speed algorithm to discriminate between power swing and faults in distance relays based on a fast wavelet. *Electric Power Systems Research, 172*, 269-276. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.03.021

Ambekar, V.A., Dambhare, S.S. (2012). Comparative evaluation of out of step detection schemes for distance relays. *2012 IEEE Fifth Power India Conference*. DOI: 10.1109/poweri.2012.6479500

Andanapalli, K., Biswal, M. (2020). An enhanced power swing and symmetrical fault discrimination logic for integrated power network. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 30*(7). DOI: 10.1002/2050-7038.12416

Andanapalli, K., Biswal, M. (2021). Symmetrical Fault-Swing Discrimination Algorithm for Transmission system. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 102*(5), 1033-1048. DOI: 10.1007/s40031-021-00578-6

Apostolov, A.P., Tholomier, D., Richards, S. H. (2004). Superimposed components based sub-cycle protection of transmission lines. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. DOI: 10.1109/psce.2004.1397508

Asle Mohammad Alizadeh, B., Esmaeili Tayeb, M., Razzaghi, R., Mohammadi-Ivatloo, B. (2021). An adaptive cumulative sum based method for unblocking distance relays in TCSC compensated transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 131*, 107095. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107095

Biswas, A., Si, B.C. (2011). Revealing the Controls of Soil Water Storage at Different Scales in a Hummocky Landscape. *Soil Science Society of America Journal, 75*(4), 1295-1306. DOI: 10.2136/sssaj2010.0131

Biswas, S., Nayak, P.K. (2019). An unblocking assistance to distance relays protecting TCSC compensated transmission lines during power swing. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 29*(8). DOI: 10.1002/2050-7038.12034

Blackburn, J.L., Domin, T.J. (2006). *Protective Relaying Principles and Applications* (Third Edition). Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Clarke, E. (1945). Impedances Seen by Relays During Power Swings With and Without Faults, *AIEE Transactions, 64*, 372-384.

Daryalal, M., Sarlak, M. (2017). Fast fault detection scheme for series-compensated lines during power swing. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 92*, 230-244. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.05.015

Dubey, R., Samantaray, S.R. (2013). Wavelet singular entropy-based symmetrical fault-detection and out-of-step protection during power swing. *IET Generation, Transmission & Distribution, 7*(10), 1123-1134. DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0528.

Emami, Y., Koochaki, A., Moghimian, M.M. (2017). Constant Angel Control of TCSC for Mitigation of SSR. *Journal of New Innovations in Electrical Engineering, 62*(1), 1-10.

Esmaeilian, A., Kezunovic, M. (2016). Impact of electromechanical wave oscillations propagation on protection schemes. *Electric Power Systems Research, 138*, 85-91. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.01.002.

Esmaeilian, A., Ghaderi, A., Tasdighi, M., Rouhani, A. (2011). Evaluation and performance comparison of power swing detection algorithms in presence of series compensation on transmission lines. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874850

Ewart, D. N., Koessler, R.J., Mountford, J.D. (1990). Flexible AC transmission systems (FACTS) scoping study. *Electric Power Research Inst*., EPRI Report, EL-6943.

Ghorbani, A. (2011). Comparing Impact of STATCOM and SSSC on the Performance of Digital Distance Relay. *Journal of Power Electronics, 11*(6), 890-896.

Ghorbani, A., Mozafari B., Ranjbar A.M. (2012). Digital distance protection of transmission lines in the presence of SSSC. *Electrical Power and Energy Systems, 43*, 712–719.

Gunasegaran, M.K., Tan, C., Bakar, A.H.A., Mokhlis, H., Illias, H.A. (2015). Progress on power swing blocking schemes and the impact of renewable energy on power swing characteristics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52*, 280-288. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.066

G&W Electric (2019). *Clearing Time For Viper-S*. G&W Electric. https://www.gwelectric.com/webfoo/wp-content/uploads/GWTG04-2019-Clearing-Time-For-Viper-S-10-19.pdf (Ziyaret tarihi: 25 Şubat 2024).

Hammons, T.J., Lim, S.K. (1997). Flexible Ac Transmission Systems (FACTS). *Electric Machines & Power Systems, 25*(1), 73–85. DOI: 10.1080/07313569708955725

Hemmingsson, M. (2003). *Power System Oscillations - Detection, Estimation and Control, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation*. Lund Institute of Technology, https://lup.lub.lu.se/record/21436 (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2024).

Hingorani, N.G., Gyugyi L. (2000). *Understanding FACTS : concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: IEEE Press Marketing.

IEEE Power System Relaying Committee (2005). *Power Swing and Out-of-Step Considerations on Transmission Lines*. IEEE PSRC WG. https://www.pes-psrc.org/kb/report/080.pdf (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2024).

Jahdi, S., Loi Lei Lai. (2011). Affects of TCSC usages on Distance protection and Voltage profile of a system; a novel. *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. DOI: 10.1109/INTLEC.2011.6099829

Kaffashbashi, A., Damchi, Y. (2023). Statistical approach for detection of fault and stable and unstable power swings based on signal energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 145*, 108638. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108638

Karegar, H.K., Mohamedi, B. (2009). A new method for fault detection during power swing in distance protection. *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. DOI: 10.1109/ecticon.2009.5136999

Kezunovic, M., Ren, J., Lotfifard, S. (2016). *Design, Modeling and Evaluation of Protective Relays for Power Systems*. Switzerland: Springer International Publishing.

Khederzadeh, M., Sidhu, T. S. (2006). Impact of TCSC on the Protection of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery 21*, 80–87. DOI: 10.1109/tpwrd.2005.858798

Khodaparast, J., Khederzadeh, M., Faria da Silva, F., Leth Back, C. (2017a). Performance of power swing blocking methods in UPFC-compensated line. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 27*(11), e2382. DOI: 10.1002/etep.2382

Khodaparast, J., Khederzadeh, M., Silva F., Bak C. (2017b). Power Swing Detection in UPFC-Compensated Line by Phase Angle of Current. *IEEE Journal On Emergıng And Selected Topıcs In Cırcuıts And Systems, 7*(3), 459-468.

Khodaparast, J., Khederzadeh, M., Faria da Silva, F., Bak, C.L. (2017c). Variation of UPFC controllable parameters during power swing and their impacts on distance relay. *IET Generation, Transmission & Distribution, 11*(7): 1735-1744. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.1375

Khorashadi-Zadeh, H. (2005). Evaluation and performance comparison of power swing detection algorithms. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. DOI: 10.1109/pes.2005.1489280

Kmec, M., Bena, L., Lison, L. (2015). Effect of series FACTS devices on distance relays. *8th International Scientific Symposium on Electric Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2015)*, Stara Lesna, Slovak Republic, 16-18 September 2015.

Kumar, J, Jena, P, (2019). Fault Detection During Asymmetrical Power Swing Using Superimposed Negative Sequence Current. *Arabian Journal for Science and Engineering, 44*, 7033–7046. DOI: 10.1007/s13369-019-03768-z

Lazaro, C., Marques, J.P., Marchesan, G., Cardoso, G. (2018). Waveform asymmetry of instantaneous current signal based symmetrical fault detection during power swing. *Electric Power Systems Research, 155*, 340-349. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.11.005

Lin, X., Gao, Y., Liu, P., (2008). A Novel Scheme to Identify Symmetrical Faults Occurring During Power Swings. *IEEE Transactions on Power Delivery, 23*, 73–78. DOI: 10.1109/tpwrd.2007.911154

Lin, X., Li, Z., Ke, S., Gao, Y. (2010). Theoretical Fundamentals and Implementation of Novel Self-Adaptive Distance Protection Resistant to Power Swings. *IEEE Transactions on Power Delivery, 25*(3), 1372-1383. DOI: 10.1109/tpwrd.2010.2043450

Mahamedi, B, (2011) A new power swing blocking function based on wavelet transform. *2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*. DOI: 10.1109/epecs.2011.6126843

Mahamedi, B., Zhu, J.G. (2012). A Novel Approach to Detect Symmetrical Faults Occurring During Power Swings by Using Frequency Components of Instantaneous Three-Phase Active Power. *IEEE Transactions on Power Delivery, 27*(3), 1368-1376. DOI: 10.1109/tpwrd.2012.2200265

Manitoba Hydro International Ltd. (2018). *PSCAD IEEE 09 Bus System*. PSCAD. https://www.pscad.com/knowledge-base/download/ieee_9_bus_technical_note.pdf (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2024).

Mason, C.R. (1998). *The Art and Science of Protective Relaying*. New York: John Wiley and Sons.

McGuinness, S., Patel, M., Kelly, A. (2018). Performance of protection relays during stable and unstable power swings. *The Journal of Engineering, 2018*(15), 1125-1129. DOI: 10.1049/joe.2018.0178

Mehrjerdi, H., Ghorbani, A. (2017). Adaptive algorithm for transmission line protection in the presence of UPFC. *Electrical Power and Energy Systems, 91*, 10–19.

Moravej, Z., Ashkezari, J.D., Pazoki M. (2015). An effective combined method for symmetrical faults identification during power swing. *Electrical Power and Energy Systems, 64*, 24–34.

Moravej, Z., Pazoki, M., Khederzadeh, M. (2014). Impact of UPFC on Power Swing Characteristic and Distance Relay Behavior. *IEEE Transactions on Power Delivery, 29*(1), 261–268.

M.S., P., Nayak, P.K., Pradhan, G. (2018). Detection of three-phase fault during power swing using zero frequency filtering. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 29*(1), e2700. DOI: 10.1002/etep.2700

Narain, A., Srivastava, S.K. (2015). An Overview of Facts Devices used for Reactive Power Compensation Techniques. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 4*(12), 81-85.

Nayak, P.K., Ganeswara Rao, J., Kundu, P., Pradhan, A.K., Bajpai, P. (2010). A comparative assessment of power swing detection techniques. *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*. DOI: 10.1109/pedes.2010.5712568

Niaki, A., Amiri, I. (2015) Impact of Shunt-FACTS Devices on Distance Relay Performance. *KBEI 2015*, Tehran, Iran, 5-6 November 2015.

Padiyar, K.R. (2007). *FACTS Controllers In Power Transmission and Distribution*. New Delhi: New Age International Publishers.

Pang, C., Kezunovic, M. (2010). Fast Distance Relay Scheme for Detecting Symmetrical Fault During Power Swing. *IEEE Transactions on Power Delivery, 25*(4), 2205-2212. DOI: 10.1109/tpwrd.2010.2050341

Patel, B. (2019). A new technique for detection and classification of faults during power swing. *Electric Power Systems Research, 175*, 105920. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.105920

Paula, H., Pereira, C.S., De Conti, A., Morais, A.P., Silveira, E.G., Andrade, J.S. (2022). Rotating negative-sequence phasors for blocking and unblocking the distance protection during power swings. *Electric Power Systems Research, 202*, 107554. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107554

Pazoki, M., Chaitanya, B.K., Yadav, A. (2023). A new wave-based fault detection scheme during power swing. *Electric Power Systems Research, 216*, 109077. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.109077

Phadke, G.A., Thorp J.S. (2009). *Computer Relaying for Power Systems* (2nd Ed), Hertfordshire: Wiley.

Rao, J.G., Pradhan, A.K. (2012). Differential Power-Based Symmetrical Fault Detection During Power Swing. *IEEE Transactions on Power Delivery, 27*(3), 1557-1564. DOI: 10.1109/tpwrd.2012.2196527

Rao, J.G., Pradhan, A.K. (2015). Power-Swing Detection Using Moving Window Averaging of Current Signals. *IEEE Transactions on Power Delivery, 30*(1), 368-376. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2342536

Sai Kumar, M.L.S., Kumar, J., Mahanty, R.N. (2020) Fault Detection During Power Swing in a TCSC-Compensated Transmission Line Based on Clark's Transform and Teager–Kaiser Energy Operator. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering 45*, 47–60. DOI: 10.1007/s40998-020-00344-2

Shukla, S., Mishra, S., Singh, B., Kumar, S., (2017). Implementation of Empirical Mode Decomposition Based Algorithm for Shunt Active Filter. *IEEE Transactions on Industry Applications, 53*, 2392–2400. DOI: 10.1109/tia.2017.2677364

Swetapadma, A., Yadav, A. (2016). Data-mining-based fault during power swing identification in power transmission system. *IET Science, Measurement & Technology, 10*(2), 130-139. DOI: 10.1049/iet-smt.2015.0169

Tekdemir, İ. (2017). Mesafe Koruma Rölelerinin Güç Salınımlarında Çalışma Başarımlarının Yükseltilmesi. Doktora Tezi. Elektrik Müh., Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 474081.

Tekdemir, İ., Alboyacı B. (2014). Mesafe Koruma Rölelerinin Güç Salınımlarında Çalışma Başarımlarının Yükseltilmesi. *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 27 – 29 Kasım 2014.

Tripathy, L.N., Jena, M.K., Samantaray, S.R. (2014). Differential relaying scheme for tapped transmission line connecting UPFC and wind farm. *Int. J. Electr. Power Energy Syst., 60*, 245-257.

Warrington, A.R., Van, C. (1943). Graphical Method for Estimating the Performance of Distance Relays During Faults and Power Swings. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 62*, 608-621.

Warrington, A.R., Van, C. (1949). Protective Relaying For Long Transmission Lines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 68*(1), 261-268.

Zadeh, H.K., Li, Z., (2008). A novel power swing blocking scheme using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Electric Power Systems Research 78*, 1138–1146. DOI: 10.1016/j.epsr.2007.09.007

EKLER

Ek-A

SVC kontrolünde PI kullanılmıştır, ilgili bloğun iç ayarları test sistemi 1 için aşağıda verilmiştir.

Test sistemi 1 için;

- GP (Proportional Gain) = 5
- TI (Integral Time Constant) = 0.004 [s]
- YHI (Maximum Limit) = 1
- YLO (Minimum Limit) = -0.6
- YINIT (Initial Output of Integrator) = 0
- Mthd (Integration Method) = 0
- compat (Limits Enforcement) = 0

Ek-B

TCSC kontrolünde PI kullanılmıştır, ilgili bloğun iç ayarları test sistemi 1 ve 2 için aşağıda verilmiştir.

Test sistemi 1 için;

- GP (Proportional Gain) = 20
- TI (Integral Time Constant) = 0.05 [s]
- YHI (Maximum Limit) = 1
- YLO (Minimum Limit) = 0
- YINIT (Initial Output of Integrator) = 0
- Mthd (Integration Method) = 0
- compat (Limits Enforcement) = 0

Test sistemi 2 için;

- GP (Proportional Gain) = 5
- TI (Integral Time Constant) = 0.005 [s]
- YHI (Maximum Limit) = 1
- YLO (Minimum Limit) = 0
- YINIT (Initial Output of Integrator) = 0
- Mthd (Integration Method) = 0
- compat (Limits Enforcement) = 0

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çapar, A., Basa Arsoy, A. (2014). Evaluating Accuracy of Fault Location Algorithms Based on Terminal Current and Voltage Data. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering, 3*(3). DOI: 10.12720/ijeee.3.3.202-206

Çapar, A., Basa Arsoy, A. (2015). Performance oriented impedance based fault location algorithm for series compensated transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 71*, 209-214. DOI: j.ijepes.2015.02.020

Çapar, A., Basa Arsoy, A. (2017). ANN Fault Location Algorithms with High Speed Training. *ELECO 2017*, Bursa, Türkiye, 30 Kasım - 02 Aralık 2017.

Çapar, A., Basa Arsoy, A. (2024). Signal Envelope Based Adaptive Power Swing Blocking. *Electric Power Components and Systems,* kabul edildi.

Çapar, A., Ünverdi Ağlar, E., Basa Arsoy, A (2018). Evaluating Conventional Power Swing Blocking Methods. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control*. DOI: 10.1145/3284557.3284731

Çapar, A., Ünverdi, E., Basa Arsoy, A. (2018). İletim Hattı Modellerinin Güç Salınımları Benzetiminde Etkileri. *ELECO 2018*, Bursa, Türkiye, 30 Kasım - 01 Aralık 2018.

Çapar, A., Ünverdi, E., Basa Arsoy, A. (2020). Performance Evaluation of Power Swing Blocking in Compensated Transmission Lines. *Journal of Physics: Conference Series, 1457*(1), 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1457/1/012005

Ünverdi Ağlar, E., **Çapar, A.**, Basa Arsoy, A. (2018). Assessment of Sub-synchronous Resonance Analysis Techniques in Series Compensated Line. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control*. DOI: 10.1145/3284557.3284732

Ünverdi, E., **Çapar, A.**, Basa Arsoy, A. (2018). Özdeğer Analiz Tekniği ile Güç sistemlerindeki Senkronaltı Rezonansın İncelenmesi. *ELECO 2018*, Bursa, Türkiye, 30 Kasım - 01 Aralık 2018.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Balıkesir'de tamamladı. 2007 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi'nin Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında ikincilik ile mezun oldu. Aynı yıl içinde mezun olduğu üniversitenin Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yine aynı yıl içinde doktora eğitimine başladı. Ayrıca, 2013 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde başladığı araştırma görevlisi görevini halen sürdürmektedir.