

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN  
ARIZA ANALİZLERİ VE UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED MAŞUK DOĞANAY

TEZ DANIŐMANI  
PROF. DR. MEHMET KURBAN

BİLECİK, 2022

10465995

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN  
ARIZA ANALİZLERİ VE UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED MAŞUK DOĞANAY

TEZ DANIŐMANI  
PROF. DR. MEHMET KURBAN

BİLECİK, 2022

## BEYAN

“Güç Sistemlerinde Simetrik ve Simetrik Olmayan Arıza Analizleri ve Uygulamaları” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>		<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	<b>X</b>
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;..... .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**Öğrenci Adı ve Soyadı**

**Muhammed Maşuk DOĞANAY**

**Tarih**

**İmza**

## ÖN SÖZ

Tez çalışmamın hazırlanmasında ve gerçekleştirilmesinde yardımlarını ve hoşgörüsünü esirgemeyen, zamanını ve bilgilerini istifademe sunarak, tez çalışması süreci boyunca kattıkları deneyim, tecrübe ve bilgilerinden dolayı değerli danışmanım Prof. Dr. Mehmet KURBAN' a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Savunma sınavında ve projenin sonlanmasında ki değerli katkıları adına sayın jüri üyelerine teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca, maddi ve manevi olarak bana katkı sunan hocalarıma, meslektaşlarıma, arkadaşlarıma, dostlarıma ve akrabalarıma teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bilhassa, eğitim ve öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak yardımını esirgemeyerek bana destek olan aileme ve aile fertlerime ayrı ayrı teşekkürlerimi sunar ve bu birlikteliğimizin iki cihanda daim olmasını Allah'tan niyaz ederim.

**Muhammed Maşuk DOĞANAY**

## ÖZET

### GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN ARIZA ANALİZLERİ VE UYGULAMALARI

Enterkonnekte elektrik güç iletim sisteminin statik olmamasından ötürü, sistemde mevcut olan üretim, iletim ve dağıtım elemanlarının devreye alınması veya çıkarılması veya herhangi bir arızada nedeniyle sisteme ait parametre değerlerinin değişkenlik göstermesinden dolayı, güç sistemi güncel analizler ile planlanmaktadır. Güç sisteminde ise kullanılacak olan şalt donanımının seçilmesi ve koruma ve koordinasyonu sağlayacak koruma rölelerinin çalışma karakteristiklerini belirleyerek sistemin güvenli ve kararlı bir şekilde işletilmesi sağlanmalıdır. Bu çalışma kapsamında ise Türkiye enterkonnekte sistemine ait olan ve kesit parçası alınmış olan İç Batı Anadolu bölgesine ait güç sistemi, paket program olan Power World bilgisayar destekli grafik tabanlı görsel simülatör programında modellenen güç sistemine ait üç fazlı simetrik arıza hesaplamaları ve simetrik olmayan faz-toprak, faz-faz ve iki faz-toprak arıza hesaplamaları, her bir bara ve hatlara ait gerilim düşümü, akım, faz açısı, aktif ve reaktif güç ve bara admintans değerlerinin hesaplanmasıyla sistemi korumak için dahil edilecek olan kesici yerleşim yerlerinin belirlenmesi ve kesici güçleri hesaplanmıştır. Simülatörde ise sistem içerisinde olası arıza senaryoları ile güç sisteminin güç akışının gerçekleştirilmesiyle arızanın sistem üzerindeki etkisi ve büyüklüğü bir bütün olarak ele alınmasıyla hatlarda oluşacak olan aşırı yüklenmelerin ön görülmesiyle sistemin işletme sınır koşulları ve enerji sürekliliğinin sağlanması için önleyici ve çözüm odaklı yöntemlerin geliştirilmesine katkı sağlanabilir. Simetrik ve simetrik olmayan arızalar ve güç akışı analizlerini yapmak ve arıza türlerinin uygulamalarını gerçekleştirilerek değerlendirilmesi ve güç sistemleri için konunun öneminin kavranılması ve vurgulanması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç Sistemi, Güç akışı, Simetrik Arıza, Simetrik Olmayan Arıza

## ABSTRACT

### SYMMETRICAL AND UNSYMMETRICAL FAULT ANALYSIS AND APPLICATIONS IN POWER SYSTEMS

The static system of interconnected electric power transmission due to a lack of existing in the system generation, transmission and distribution commissioning of the system or any of the components due to rupture or removal due to the variability of the parameter values, the current power system analysis is planned. In the power system, it is necessary to select the switchgear that will be used and determine the operating characteristics of the protection relays that will provide protection and coordination to ensure safe and stable operation of the system. Interconnected system in Turkey within the scope of this study, belongs to the cross-section which is taken from the inner part of western Anatolia in the power system, program the power of the world computer aided graphics-based visual simulator for the power system are modeled in the program is a three-phase fault calculations symmetrical and non-symmetrical phase-to-ground, phase-to-phase and two-phase-ground fault calculations, each bar and lines belong to voltage, current, phase angle, active and reactive power and bus bar admittance values were calculated to determine the breaker locations to be included to protect the system and breaker strengths were calculated. Potential failure scenarios within the system in the simulator with the realization of the power flow of the power system and the impact on the magnitude of the malfunction, the system as a whole, the consideration of which will occur in line with the operational overload of the system by appearance of the front boundary conditions and ensuring continuity of energy, proactive and solution-oriented methods could contribute to the development of. It is aimed to analyze symmetrical and non-symmetrical failures and power flow, as well as to evaluate the types of failures by performing their applications, as well as to understand and emphasize the importance of the issue for power systems.

**Key Words:** Power System, Power Flow, Symmetrical Fault, Unsymmetrical Fault

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması.....	3
1.2. Tezin Amacı.....	4
1.3. Tezde Yapılan Çalışmalar.....	5
2. GÜÇ SİSTEMLERİ.....	7
2.1. Enerji İletim Hatları.....	7
2.1.1. Kısa mesafeli enerji nakil hattı.....	8
2.1.2. Orta mesafeli enerji nakil hattı.....	9
2.1.3. Uzun mesafeli enerji nakil hattı.....	11
2.2. Güç Sistemlerinde Tek Hat Empedans ve Reaktans Diyagramları.....	15
2.2.1. Devre elemanları eşdeğer devre modelleri.....	16
2.3. Güç Sistemlerinde Per-Unit (Birim Başına) Değerler.....	21
2.3.1. Bir fazlı devreler.....	21
2.3.2. Üç fazlı devreler.....	21
2.3.3. Uygulamalı güç sistemi.....	21
3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİMETRİK ARIZA ANALİZİ.....	25
3.1. Seri R-L Anlık Değişimler.....	25
3.2. Yüksüz Senkron Makinede Kısa Devre Akımı.....	27

3.3. Güç Sisteminde Üç Faz Kısa Devreleri.....	29
3.4. Bara Empedans Matrisi .....	29
3.5. Simetrik Bileşenler .....	31
3.6. Empedans Yüklerin Bileşen Devreleri.....	33
3.7. Seri Empedansların Bileşen Devreleri.....	36
3.8. Güç Sisteminde Üç Faz Kısa Devre Durumu .....	38
4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİMETRİK OLMAYAN ARIZA ANALİZİ .....	42
4.1. Güç Sisteminde Hat Kopma Arıza Durumu .....	43
4.1.1. Güç sisteminde tek hat kopma arıza durumu .....	44
4.1.2. Güç sisteminde iki hat kopma arıza durumu .....	44
4.2. Güç Sisteminde Tek Faz-Toprak Arıza Durumu .....	45
4.3. Güç Sisteminde Faz-Faz Arıza Durumu .....	46
4.4. Güç Sisteminde İki Faz-Toprak Arıza Durumu .....	47
4.5. Uygulamalı Güç Sistemi.....	48
4.6. Enerji İletim Sistemlerinde Arıza Oluşumuna Neden Olan Faktörler ve Etkenler .....	52
4.6.1. Elektriksel etkenlere bağlı olarak oluşan arızalar .....	53
4.6.2. Mekanik etkenlere bağlı olarak oluşan arızalar .....	53
4.6.3. Çevre ve iklim koşullarına bağlı olarak oluşan arızalar .....	53
4.6.4. Malzeme ve montaj kaynaklı oluşan arızalar .....	53
4.6.5. İnsan ve canlı kaynaklı oluşan arızalar .....	54
4.6.6. Enerji iletim sistemlerinde misal teşkil eden arızalar .....	54
5. İÇ BATI ANADOLU BÖLGESİNİN ENERJİ İLETİM ŞEBEKESİNDE ARIZA ANALİZİ.....	66
5.1. Güç Sistemlerinde Arıza Analizinde Kullanılan Programlar .....	69
5.2. İç Batı Anadolu Bölgesinin Enerji İletim Şebekesinde Yük Akışı Analizi.....	77
5.3. İç Batı Anadolu Bölgesinin Enerji İletim Şebekesinde Simetrik ve Simetrik Olmayan Kısa Devre Analizleri.....	92

<b>6. SONUÇLAR .....</b>	<b>96</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>101</b>

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa No</b>
<b>Tablo 2.1.</b> Güç sisteminde kullanılan bağlantı şekillerinin sembol gösterimleri .....	16
<b>Tablo 2.2.</b> Güç sisteminde kullanılan generatörün eşdeğer devresinin sembol gösterimleri ..	17
<b>Tablo 2.3.</b> Güç sisteminde kullanılan motorun eşdeğer devresinin sembol gösterimleri.....	17
<b>Tablo 2.4.</b> Güç sisteminde kullanılan transformatörün eşdeğer devresinin sembol gösterimleri .....	17
<b>Tablo 2.5.</b> Güç sisteminde kullanılan T-eşdeğer iletim hattı devresinin sembol gösterimleri	18
<b>Tablo 2.6.</b> Güç sisteminde kullanılan pi-eşdeğer iletim hattı devresinin sembol gösterimleri	18
<b>Tablo 2.7.</b> Transformatör indirgeme çarpanları.....	20
<b>Tablo 5. 1.</b> İletim hatlarına ait karakteristikler .....	80
<b>Tablo 5.2.</b> Güç sistemine dahil edilen yüklerin güç faktörü ve görünür güç değerleri .....	81
<b>Tablo 5.3.</b> Şekil 5.3'teki güç sistemine ait hatların simetrik ve simetrik olmayan kısa devre arıza hesaplamaları.....	93
<b>Tablo 5.4.</b> Şekil 5.3'teki güç sistemine ait baraların simetrik ve simetrik olmayan kısa devre arıza hesaplamaları.....	94

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Kısa mesafeli enerji nakil hattı devre modeli .....	8
Şekil 2.2. Kısa mesafeli enerji nakil hattının fazör diyagramı.....	9
Şekil 2.3. Orta mesafeli enerji nakil hattı nominal T devre modeli .....	10
Şekil 2.4. Orta mesafeli enerji nakil hattı nominal pi devre modeli .....	10
Şekil 2.5. Orta mesafeli enerji nakil hattının fazör diyagramı .....	11
Şekil 2.6. Uzun mesafeli enerji nakil hattı devre modeli .....	11
Şekil 2.7. Uzun mesafeli enerji nakil hattı pi devre modeli.....	14
Şekil 2.8. Uzun mesafeli enerji nakil hattı nominal T devre modeli .....	15
Şekil 2.9. Bir güç sisteminin tek hat şeması .....	19
Şekil 2.10. Şekil 2.9.'da verilen güç sisteminin empedans diyagramı.....	19
Şekil 2.11. Şekil 2.9.'da verilen güç sisteminin reaktans diyagramı .....	20
Şekil 2.12. Örnek güç sistemi .....	23
Şekil 2.13. Şekil 2.12.'nin Örnek güç sisteminin birim başına pozitif dizi reaktans diyagramı .....	23
Şekil 3.1. Alternatif akım kaynaklı seri R-L devresi .....	26
Şekil 3.2. Seri R-L devresinde anahtarın kapatılma anı.....	26
Şekil 3.3. Yüksüz senkron jeneratörün üç faz kısa devre sırasındaki bir faz AC arıza akımı .	27
Şekil 3.4. Güç sisteminde üç faz kısa devrede süperpozisyonun uygulanması .....	30
Şekil 3.5. Dengesiz fazör sisteminin üç ayrı simetrik bileşen sisteminin tasfiyesi .....	31
Şekil 3.6. Dengeli yıldız bağlı empedans yükü.....	34
Şekil 3.7. Üç fazlı dengeli yıldız bağlı bir yükün bileşen devreleri.....	35
Şekil 3.8. Üç fazlı bir sistemin seri empedansları.....	36
Şekil 3.9. Üç fazlı simetrik seri empedansların bileşen devreleri .....	38
Şekil 3.10. Simetrik üç faz kısa devre durumları .....	39
Şekil 3.11. Bileşen devrelerinin Thevenin eşdeğer devreleri.....	39
Şekil 3.12. Örnek güç sistemi .....	40
Şekil 3.13. Örnek güç sisteminin reaktans devresi .....	41
Şekil 3.14. Örnek güç sisteminin reaktans devresinin sadeleştirilmesi .....	41
Şekil 4.1. Üç faz baralı güç sisteminin genel gösterimi.....	43
Şekil 4.2. Dengeli bir sistemde genel üç fazlı bara bileşen devreleri .....	44
Şekil 4.3. Tek hat kopma arızası .....	45

Şekil 4.4. İki hat kopma arızası.....	45
Şekil 4.5. Tek faz-toprak kısa devre arızası .....	46
Şekil 4.6. Faz-faz kısa devre arızası.....	47
Şekil 4.7. İki faz-toprak kısa devre arızası.....	49
Şekil 4.8. Örnek güç sistemi .....	50
Şekil 4.9. Doğru bileşen reaktansı .....	50
Şekil 4.10. Ters bileşen reaktansı.....	50
Şekil 4.11. Sıfır bileşen reaktansı.....	51
Şekil 4.12. Üç faz kısa devre.....	51
Şekil 4.13. İki faz kısa devre.....	52
Şekil 4.14. Faz-toprak kısa devre.....	52
Şekil 4.15. İki faz-toprak kısa devre .....	53
Şekil 4.16. Çeşitli arıza durumları için güç-açı karakteristikleri .....	53
Şekil 4.17. Termal kamera ölçümlerinde A, B, C fazlarına ait izolatör görüntüleri.....	56
Şekil 4.18. A fazına ait arızalı izolatör.....	57
Şekil 4.19. Şalt sahasında arıza durumu .....	58
Şekil 4.20. Gergi izolatörünün patlaması.....	58
Şekil 4.21. Sf6 gaz manometre, Sf6 gaz yoğunluğu göstergesi.....	59
Şekil 4.22. Kesicide oluşmuş gövde delinme arıza durumu .....	60
Şekil 4.23. Hasarlanan C faz parafudr içi .....	60
Şekil 4.24. Fırtına ve kar nedeniyle hat kopması.....	61
Şekil 4.25. Rüzgâr nedeniyle oluşan arızalar .....	62
Şekil 4.26. Şarjlı havalarda yıldırım kaynaklı oluşan arızalar .....	62
Şekil 4.27. Araç kazalarında oluşan arızalar.....	63
Şekil 4.28. Hayvan kaynaklı oluşan arızalar.....	63
Şekil 4.29. Anızların yakılması ile ağaç direklerin zarar görmesi sonucu oluşan arızalar .....	64
Şekil 4.30. Ağaç devrilmesi sonucu oluşan arızalar .....	64
Şekil 4.31. Kazı çalışmalarından kaynaklı arızalar.....	65
Şekil 4.32. Kar yağışından bağlı olarak hat kopma arızaları .....	65
Şekil 5.1. Türkiye elektrik (Enterkonnekte) iletim sisteminden alınan kesit parça .....	68
Şekil 5.2. Türkiye elektrik (Enterkonnekte) iletim sisteminden alınan kesit parçanın şematik gösterimi .....	69
Şekil 5.3. Güç sisteminin Power World simülatöründe modellenmesi.....	80
Şekil 5.4. 1 nolu arıza senaryo durumu.....	83

<b>Şekil 5.5.</b> 2 nolu arıza senaryo durumu.....	84
<b>Şekil 5.6.</b> 3 nolu arıza senaryo durumu.....	85
<b>Şekil 5.7.</b> 4 nolu arıza senaryo durumu.....	86
<b>Şekil 5.8.</b> 5 nolu arıza senaryo durumu.....	87
<b>Şekil 5.9.</b> 6 nolu arıza senaryo durumu.....	88
<b>Şekil 5.10.</b> 7 nolu arıza senaryo durumu.....	89
<b>Şekil 5.11.</b> 8 nolu arıza senaryo durumu.....	90
<b>Şekil 5.12.</b> 9 nolu arıza senaryo durumu.....	91
<b>Şekil 5.13.</b> 10 nolu arıza senaryo durumu.....	92

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

<b>r</b>	:Faz Başına Direnç
<b><math>\ell</math></b>	: Hat Uzunluğu (km başına)
<b>Z</b>	: Toplam Empedans
<b>V<sub>S</sub></b>	: Tek Faz Hat Baş1 Gerilimi
<b>V<sub>R</sub></b>	: Tek Faz Hat Sonu Gerilimi
<b>I<sub>S</sub></b>	: Tek Faz Hat Baş1 Akımı
<b>I<sub>R</sub></b>	: Tek Faz Hat Sonu Akımı
<b>V</b>	: Volt
<b>A</b>	: Amper
<b><math>\delta</math></b>	: İç Faz Açısı
<b>Y</b>	: Admintans
<b>R</b>	: İletim Hattının Direnci
<b>L</b>	: İletim Hattının Self İndüktansı
<b>C</b>	: Birim Uzunluk Kapasitansı
<b>G</b>	: Birim Uzunluk Kaçak İletkenliği
<b>H</b>	: Henry (Bobin Birimi)
<b>F</b>	: Farad (Kondansatör Birimi)
<b><math>\Omega</math></b>	: Ohm (Direncin Birimi)
<b>S</b>	: Siemens (İletkenliğin Birimi)
<b>z</b>	:Birim Uzunluktaki Hattın Seri Empedansını
<b>y</b>	:Birim Uzunluktaki Hattın Şönt Admitansını
<b><math>\gamma</math></b>	:Propagasyon (yayıma) Sabiti
<b><math>\alpha</math></b>	: Zayıflama Sabiti
<b><math>\beta</math></b>	: Faz Sabiti (Radyan/m)
<b>a</b>	: Transformatör Dönüştürme Oranı

- p.u** : Per unit (Birim başına)
- LL** : Faz Faz Gerilimi
- LN** : Faz Nötr Gerilimi
- X<sub>TH</sub>** : Thevenin Eş Değer
- RMS** : Root Mean Square (Etkin değer)
- rms** : Root Mean Square (Etkin değer)
- AC** : Alternatif Akım
- DC** : Doğru Akım
- n** : Arızalı Bara
- N** : Bara Sayısı
- Z<sub>0</sub>** : Sıfır Bileşen Empedansı
- Z<sub>1</sub>** : Pozitif Bileşen Empedansı
- Z<sub>2</sub>** : Negatif Bileşen Empedansı
- Z<sub>f</sub>** : Nötr Noktası Empedansı
- K** : Kısa devre noktası
- TM** : Trafo Merkezi
- S<sub>a</sub>** : Kesici Gücü
- TS** : Türk Standartları
- IEC** : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu

## 1. GİRİŞ

Sanayinin gelişimi ile beraber teknolojinin gelişimi de hız kazanmıştır. Bu sebeple sanayide, ticarethanelerde, üretim tesislerinde ve hanelerde elektrik kullanımı hızla artmış ve hayatın idamesi için elektrik enerjisi önemli bir etken olmuştur. Buna bağlı olarak tüketilen elektrik enerjisinin karşılanabilmesi için enerji üretim tesislerinin artmasına ve buna bağlı olarak enerjinin iletilmesi ve dağıtımı için mevcut olan güç sistemlerine ilave olarak yeni sistemlerin kurulumu da zorunlu hale gelmiştir. Bu nedenle kurulacak olan güç sistemleri için gerekli olan malzeme ve teçhizatın üretilmesi ve temin edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda kurulumu yapılacak olan güç sisteminde kullanılacak olan malzeme ve teçhizatın da iletimi ve dağıtımı yapılacak olan güç sisteminin gücüne bağlı olarak seçilmesi gerekmektedir. Aksi halde güç sisteminde sürekli olarak arızaların meydana gelmesine neden olacağından dolayı sistemde sürekli olarak enerji kesintilerine meydan verecektir. Bu durumda sürekli olmayan elektrik enerjisi için istenilmeyen bir hal alacağından dolayı güç sistemlerinin tasarımı esnasında iletimi yapılacak olan sistemin gücüne bağlı olarak optimum olarak belirlenmelidir.

Standartlara göre seçilen malzeme ve teçhizatların kullanılmasına rağmen enerji iletim sistemlerinde arızalar meydana gelebilmektedir. Bu durumda istenilmeyen bir durum olması ve sürekli çözümlerin üretilmesi ve geliştirilmesi hususu doğmaktadır. Bunun yanı sıra tüketicilerin olumsuz etkilenmesine ve üretimin aksamasına neden olduğundan dolayı maddi zararlara neden olmaktadır. Bu sebeple güç sistemlerinde oluşabilecek arızaların ön görülmesi veya önceden bilinmesi güç sistemlerinin tasarımı esnasında tedbirler alınarak oluşabilecek arızaların en aza indirgenmesi veya ortadan kaldırılması için katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda kullanılacak olan malzeme ve teçhizatın hangi özellikte olması ve hangi kriterlere sahip olması gibi önemli katkılar sağlayacaktır.

Güç sistemlerinde ise birçok arıza meydana gelmektedir. Bu arızalara ise daha önceden etken olan nedenler tespit edilerek arızalar giderilmiş ve bu arızaların bir daha oluşmaması ve oluşması durumunda sistemin zarar görmemesi ve enerji kesintinin uzun süre yaşanmaması için gerekli olan tedbirler alınarak çözümler sunulmuştur. Bu durum güç sistemleri ve tüketiciler için enerji sürekliliği için büyük fayda sağlamıştır. Buna rağmen güç sistemlerinde oluşan arızaların birçok parametreye bağlı olması; elektriksel nedenlere bağlı olması, mekanik nedenlere bağlı olması, çevresel faktörlere bağlı olması (Ertuğrul, 2010:36), malzeme ve montaj kaynaklı etkenlerden dolayı birçok arıza meydana gelebilmektedir. Bu arızaların birçok parametreye bağlı olması güç sistemlerinde oluşan arızaları tümünden ortadan kaldırmak zor ve

maliyetli olmaktadır. Bu nedenle, bu durum güç sistemlerinde arıza esnasında zarar görmemesi ve enerji kesintisinin uzun sürmemesi için tedbirler alınmaktadır.

Güç sistemlerinde enerjinin iletilmesi ve dağıtılması sistemin dış ve iç etkenlere karşı korunması ve arızanın tespiti için birçok yöntem ve cihaz kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra sistemde oluşabilecek arızalara karşı malzeme ve teçhizatın korunması için koruma elemanları da kullanılmaktadır. Fakat buna rağmen enerjinin sürekliliği durumu için ön görülemeyen ve istenilmeyen durumlar yine oluşmaktadır. Bu durum ise kullanılan yöntem ve koruma elemanlarının hata oranlarına bağlı olmasından kaynaklı ve diğer durumlardan kaynaklı olmasıdır.

Güç sistemlerinde kullanılan yöntemlerin ve cihazların arıza tespiti ve koruma yapabilmeleri için bu yöntemlerin ve cihazların geliştirilmesi ile oluşabilecek arızaların önlenmesi ve arızanın giderilmesi için güç sistemlerinde oluşabilecek arızaların önceden analiz edilmesi ve sistemde oluşmuş arızaların görsel ve yazılı olarak rapor edilip arızanın analiz edilmesi güç sistemlerinde kullanılan yöntem ve cihazların geliştirilmesi için çok büyük fayda ve katkı sağlayacaktır. Bu sayede enerji iletim sistemlerinde enerji sürekliliğinin sağlanması üretim ve tüketiciler için oluşan maddi kayıplar önlemek ve enerji kesintisinin en aza indirgenebilir. Buna rağmen oluşabilecek olan arızaların tespiti ve arızanın giderilmesi arızaların ön görülmesi veya daha önceden oluşmuş arızaların rapor edilmesi arıza analizi için büyük katkı sağlayacaktır.

Güç sistemleri için elektrik mühendisleri, otomasyon mühendisleri, saha mühendisleri gibi; güç sistemleri için araştırmacılar ve tasarımcılar tarafından geliştirilen yöntem ve cihazların ortaya konulabilmesi için detaylı olarak güç sisteminin analiz edilmesi, arıza tespiti ve koruma gibi durumların daha hızlı ve ekonomik olarak çözülmesi, yöntem ve cihazların hata oranlarının daha düşük seviyeler indirgenmesi ve ortadan kaldırılması için bu çalışmanın fayda ve katkı sağlanması hedeflenmiş ve kişisel olarak güç sistemlerinde oluşan olumsuz durumların neler olduğu ve bu durumlara etken olan sebepler neler olduğu ortaya konulması amaçlanmıştır. Aynı zamanda daha önceden güç sistemlerinde yapılan çalışmaların neler olduğu, ne tür katkı sağlandığı, ortaya konulan çözümlerin ne oranda katkı sağladığı ve oluşan olumsuz durumlar için ortaya konan çözümün soruna yeterli olduğu veya diğer durumlar için neler yapıldığı konusunda araştırma ve analizler gerçekleştirilmiştir.

## 1.1. Literatür Taraması

Enerji üretim iletim ve dağıtımına ait güç sisteminin enerji sürekliliğinin sağlanması üreticiler ve tüketiciler için önemli bir husustur. Bu nedenle güç sisteminin kararlı bir şekilde optimize edilerek işletilmelidir. Bu kapsamda ise güç sistemlerine ait yapılmış olan bazı çalışmalar ise;

Ahmet çiftçi ve diğerleri elektrik şebekelerinin arızaya neden olan etkenler ve bu etkenlere neden olan sebepler analiz edilmiştir. Arızalara karşı nasıl çözüm getirilmesi ve önlenilmesi yönelik çözüm önerileri sunmuşlar.

Bilal erim 154 kV bir iletim şebekesinin ait olan güç sisteminde bulunan trafo merkezlerine ait bara kısa devre analizlerini gerçekleştirmiştir. TEİAŞ 5. Bölge müdürlüğü sorumluluğunda bulunan güç sistemini ise MATLAB simulink programında modellediği iletim şebekesini ait simetrik ve simetrik olmayan arıza analizlerini gerçekleştirmiştir.

Hakan Çakır ve Muhsin Tunay Gençoğlu tarafından güç sistemlerinde kısa devre, kesici gücü ve yük akışının analiz edilmesi için MATLAB/guide tabanlı program ile güç sistemlerinin analizini gerçekleştirmiştir.

Yasin İçel ve diğerleri tarafından Power World simülasyon programında yenilenebilir enerji sistemlerinin güç sistemine dahil edilmesi durumunda sistem üzerindeki etkisini analiz etmiştir.

Mehmet Yeşil Budak ve arkadaşları tarafından güç sistemlerinin analizi ve güç akışı için kullanılan Gauss-Seidel, Newton-Raphson ve Fast Decoupled metodlarının farklı tolerans değerleri ile iterasyon sayılarının hesaplanması süreleri ile hatlarda ki toplam aktif ve reaktif güç kayıpları karşılaştırmalı olarak incelemişler.

İsmail Öylek ve Metin Varon tarafından baz alınan Kuzeybatı Anadolu bölgesinde ait güç sistemi için sistem dahil edilen ve sistemden izole edilen üretim santrallerinin Power World simülasyon programı ile güç akışı analizleri ile farklı arıza senaryolarının oluşturulmasıyla güç sisteminin arıza analizi ve yük akışı incelenmiştir

Hasan Uzal ve arkadaşları tarafından baz alınan İzmir bölgesine ait güç iletim sisteminin Power World simülasyon programında modellenmesiyle sistemin yük akışı ve arıza analizinin gerçekleştirilmesiyle oluşabilecek olası arızalar için senaryo durumlarını oluşturulması ile sistem içerisinde oluşabilecek arızalar için alternatif çözümler önerilmiştir

Ali Öztürk ve Serhat Duman tarafından elektrik güç sistemlerinin optimizasyona dayalı olarak hatlarda meydana gelen kayıpların minimum olmasını ve gerilim genlik değerlerinin Genetik algoritma ile belirlemişlerdir. Güç sistemlerinde oluşan bu kayıpların minimize edilmesi sayesinde ekonomik kazanç sağlamışlar.

Nihat Pamuk tarafından Sakarya iline olan sapanca ilçesi güç sisteminin baz alınmasıyla güç sisteminin içerisinde sisteme en büyük etki ve hasarı oluşturan üç faz kısa devre arızası hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sayesinde sisteme dahil edilecek olan koruma teçhizatlarının seçimi ve güç değerleri hesaplanmıştır.

Ramazan Bayındır ve arkadaşları tarafından güç sistemlerinde gerilim kararlılığını etki eden bozucu etkenler ele alınmıştır. Digsilent programında güç sisteminin modellenmesi ile sistem içerisinde bulunan teçhizatların parametre değerlerinin değişmesi durumuna göre güç sisteminin gerilim kararlılığına etki eden durumlar incelenmiştir.

Asım Kaygusuz ve arkadaşları tarafından elektrik enerjisi üretimini yapan yenilenebilir enerji santrallerinin güç sistemlerine entegrasyonunda sistem kararsızlığı etki edilebilecek olumsuz senaryo durumları için tedbirlerin alınmasına yönelik yük akışı analizi gerçekleştirmişlerdir.

## **1.2. Tezin Amacı**

Elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla, paralel olarak elektrik üretim, iletim ve dağıtım ağı da daha geniş ve kompleks bir yapıya dönüşmektedir. Bu dönüşüm sebebiyle büyüyen güç ağının analizi de güç ve zor bir hal aldığından dolayı güç sistemini bütüncül olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analizinin yapılması ise enerji sürekliliğinin sağlanması adına büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple mühendisler tarafından enerji sürekliliğinin sağlanması adına güç sistemi içerisinde oluşabilecek arızalar için hızlı ve ekonomik çözümler sağlamaları gerekmektedir. Enterkonnekte yapıdaki veya herhangi bir güç ağında oluşabilecek arıza için enerji sürekliliğinin sağlanması adına farklı çözümler ve önleyici tedbirlerin alınmasıyla optimize edilen sistemin işletilmesi önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada ise güç sistemlerinin genel anlamda analiz edilmesi ve matematiksel hesaplamaların daha kolay bir şekilde hesaplayarak güç sistemlerin analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda bilgisayar destekli grafik tabanlı simülatör programı yardımıyla enterkonnekte sistemin belli bir parçası alınarak simülatör programında modellenmesiyle, güç sisteminde olası arıza senaryolarında farklı arıza türlerinin sistem üzerindeki etkilerinin ve büyüklüklerinin analiz ve hesaplanmasıyla arızanın sistem üzerindeki etkisinin incelenmesi ve analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı arıza senaryolarının güç sistemi üzerindeki büyüklüğü hesaplanmasıyla güç sisteminin güç akışı ve arıza analizinin gerçekleştirilmesiyle sistemi korumak ve arızanın en kısa sürede izole edilerek enerji sürekliliğinin sağlanması da amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada enterkonnekte yapıdaki bir güç sistemine ait olan belli başlı bölgedeki tek hat şemasına sahip güç sisteminin ele alınmasıyla güç sisteminde içerisinde mevcut olan elemanlarının güç ağının çıkarımı, modellenmesi ve elemanlara ait karakteristik

değerlerinin belirlenmesi ve bu karakteristik değerlerinin bilgisayar destekli simülasyon programında değer atamalarının yapılmasıyla olası arıza senaryolarında güç sistemine ait üç faz, iki-faz, faz-faz, faz-toprak ve hat kopması arıza hesaplarının yapılması ile sisteme dahil edilecek olan kesici değerlerinin hızlı ve pratik bir şekilde hesaplanması ve her bir hattaki aktif ve reaktif güç kayıpları hesaplanmasıyla bilgisayar destekli simülasyon programlarının zaman ve maliyet açısından önemli olduğu ve güç sisteminin önceden güç akışı ve olası arıza sonuçlarında sistemin enerji sürekliliğinin sağlanması adına öngörüler ile çözümlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple mühendisler tarafından güç sistemlerine ait güç akışı ve arıza analizlerinin gerçekleştirilmesinde olası olumsuz durum senaryoları için çözüm odaklı yöntemlerin üretilmesi veya geliştirilmesinde katkı sağlanması amaçlanmıştır. İlave olarak enterkonnekte sistemine ait olan bir güç sisteminin analiz edilmesi ve analiz sonuçlarında elde edilen çıktıların araştırmacı ve mühendisler için muhakeme yeteneğinin gelişimine katkıda bulunmak ve mevcut olarak işletilen bir güç sisteminin analiz edilmesi hususundaki uygulama basamaklarının sıralı olarak uygulanmasıyla bir güç sistemi için simetrik ve simetrik olmayan arızalar için güç akışı ve arıza analizlerini gerçekleştirilmesiyle, bu tezin ulusal ve uluslararası anlamda bilgi kazanımına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

### **1.3. Tezde Yapılan Çalışmalar**

Tez çalışması kapsamında Türkiye enterkonnekte sisteminden alınan güç sistemine ait kesici parçanın bilgisayar destekli simülasyon programında modellenmesiyle güç sistemine ait güç akışı analizleri ve kısa devre (üç faz, iki-faz, faz-faz, faz-toprak ve hat kopması) hesaplamalarının gerçekleştirilmesi ve sisteme dahil edilecek kesici güçlerinin belirlenmesi ve olası arıza senaryolarının oluşturulmasıyla sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Birinci bölümde elektrik enerjisinin önemi hakkında genel ifadelerle yer verilerek, literatür taraması ve tezin amacından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde enerji nakil hatları türleri, güç sistemlerine ait tek hat empedans ve reaktans diyagramları ve güç sistemlerinde güç sistemlerinde matematiksel ifadelerin daha sade bir biçimde ifade edilmesi için bir fazlı ve üç fazlı devrelerde per-unit değerleri ifadelerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde güç sistemlerinde simetrik arıza analizinde dikkat edilmesi gereken hususlardan ve üç faz simetrik arıza analizinden ihmal edilen kısımlardan bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde ise güç sistemlerinde simetrik olmayan arıza türleri eklenmiştir. İlave olarak güç sisteminde arızalara neden olan etkenlerden sözlü ve maddeler halinde ifade edilerek, daha önceden güç sistemlerinde meydana gelmiş olan ve görsel olarak rapor haline getirilmiş olan birkaç arıza örnekleri eklenmiştir.

Beşinci bölümde ise güç sistemlerinin analiz edilmesi için kullanılan bilgisayar destekli simülatör programlarından bahsedilmiştir. Ayrıca enterkonnekte sisteminden alınan bölgeye ait güç sisteminin güç akışı ve her bir baranın simetrik ve simetrik olmayan arıza türlerinin kısa devre hesaplamaları yapılarak sisteme dahil edilecek kesici güçleri ve farklı senaryo durumlarında sistemin güç akışı analizleri gerçekleştirilmiştir.

## 2. GÜÇ SİSTEMLERİ

Güç sistemlerinde kullanılacak olan şalt donanımının seçim kriterleri ve koruma ve koordinasyonu sağlayan rölelerin ayarlanması sistemin kararlı bir biçimde çalışması ve işletilebilmesi için güç sistemlerinin güç akışı ve arıza analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Güç sistemlerinin statik olmamasından dolayı sistem içerisinde bulunan jeneratörler, iletim hatları ve yüklerin devreye alınıp çıkarılmasıyla sistem de anlık olarak değişmektedir. Ayrıca daha sonraki süreçlerde sisteme dahil edilen jeneratörlerin, iletim hatları ve yüklerin değişmesinden dolayı sistemin modellenmesi ve planlaması da değişmektedir. Bu nedenle güç sistemlerinin de güncel bir şekilde tutulması için güncel olarak analiz edilmelidirler.

Güç sistemlerinde ise sistem üzerinde birçok arıza meydana gelebilmektedir. Bu arızalar ise kısa devre, fiziksel hasarlar veya canlı kaynaklı hasarlardan dolayı meydana gelmektedir. Bu arızalar ise üç faz simetrik kısa devre arıları ile iki-faz, faz-faz, faz-toprak simetrik olmayan kısa devre arıza türleridir. Bu arızalara ek olarak hat kopma arızaları da ilave edilebilir. Aynı zaman sistem üzerinde eş zamanlı olarak ta birden fazla arızanın oluşma durumları da olabilmektedir.

Güç sistemlerinde meydana gelen arızaların tek faz eşdeğer devresinin modellenmesiyle arıza analizleri gerçekleştirilmektedir. Arıza analizlerinin gerçekleştirilmesinde ise güç sistemine ait olan elemanları ve iletim hatlarına ait bileşenlerin ve karakteristik değerlerinin kullanılmasıyla matematiksel işlemlerinin daha sade ve kolay bir şekilde hesaplanabilmektedir (Lucas, 2005:7).

### 2.1. Enerji İletim Hatları

Elektrik enerjisi üretimi yapılan tesis ya da santrallerden enerjinin tüketicilere iletilmesi ve dağıtılması için yapılan taşıma işlemine enerji nakil hattı olarak adlandırılmaktadır. Enerjinin taşınması üretim ile tüketim merkezi arasındaki uzaklığa ve taşınacak olan enerjinin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak taşınacak olan değişik gerilim seviyelerine göre kullanılacak olan iletkenin kesiti ve cinsi de farklı olacaktır (Ada, 2021:3).

Enerji iletim hatlarının güç sistemleri için analizini yapılabilmek için üç fazlı olan hatlar tek faza indirgeme işlemi yapılarak iletim hatlarının, eşdeğer bir model ile gösterilebilir. Enerji iletim hatlarının elektriksel olarak veriler bilindiğinde normal koşullar altında hattın belirli noktalarında gerilim, akım, güç, kayıplar, gerilim düşümleri ve verim gibi belli başlı parametrelerin büyüklükleri hesaplanabilir. Bu hesaplamaların yapıldığı denklem takımlarına da hat denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak enerji iletim hatları kısa, orta ve uzun mesafeli iletim hattı olmak üzere üç farklı model olarak analiz edilmektedir. Fakat her bir

hat modeli için ayrı denklem takımı oluşturularak ayrı ayrı analiz yapılmaktadır. Yapılacak olan hat model hesaplamaları için doğru ve yaklaşık sonuçlar elde etmek için parametre değerleri doğru seçilmesi gerekir (Tür, 2010:12). Ayrıca hattın mesafesine bağlı olarak kullanılacak olan denklem takımları farklı olacağından dolayı bazı ihmallere ve kabuller yapılarak analiz ve hesaplamalar yapılmaktadır. Şayet hattın mesafesine bağlı olarak uygun denklem takımları kullanılmazsa yapılacak olan analiz ve hesaplamaların sonuçları yanlış olacaktır.

### 2.1.1. Kısa mesafeli enerji nakil hattı

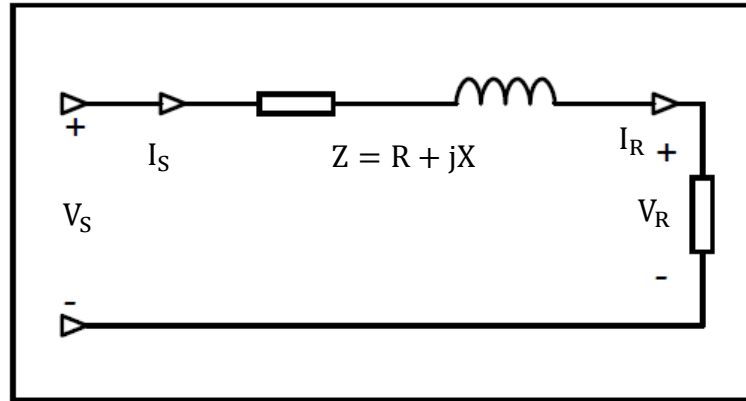
Kısa mesafeli enerji nakil hat modeli, hat mesafesinin 80km'den az olan enerji nakil hat modeli olarak ele alınır. Hat mesafesini en fazla 80 km olmasına bağlı olarak ele alınan hesaplama ve analizler daha kolay ve basit olarak ifade edilebilmektedir. Hattın seri empedansları ise hattın km başına uzunluğuna çarparak elde edilir (Tür, 2010:14).

$$Z = (r + j\omega L) \cdot \ell = R + jX \quad (\text{Toplam Empedans}) \quad (2.1)$$

r: Faz başı direnç

L: İletim hattının self indüktansı (H/km)

$\ell$ : Hat uzunluğu (km başına)



Şekil 2.1. Kısa mesafeli enerji nakil hattı devre modeli

$V_S$ : Tek faz hat başı gerilimi (V)

$V_R$ : Tek faz hat sonu gerilimi (V)

$I_S$ : Tek faz hat başı akımı (A)

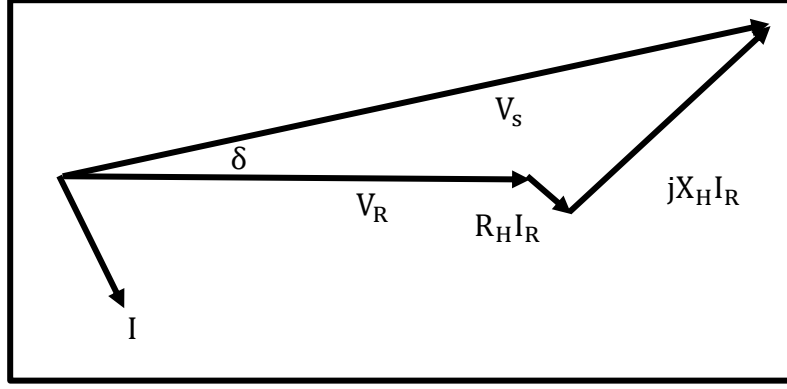
$I_R$ : Tek faz hat sonu akımı (A)

$\delta$ : İç faz açısı

Hat başı faz gerilimi ise;

$$V_S = V_R + I_R(R + jX_L) \quad (2.2)$$

Paralel olan kapasite değeri ihmal edildiği için hat başı ve hat sonu akımı ise;  $I_S \cong I_R$  olur.



Şekil 2.2. Kısa mesafeli enerji nakil hattının fazör diyagramı

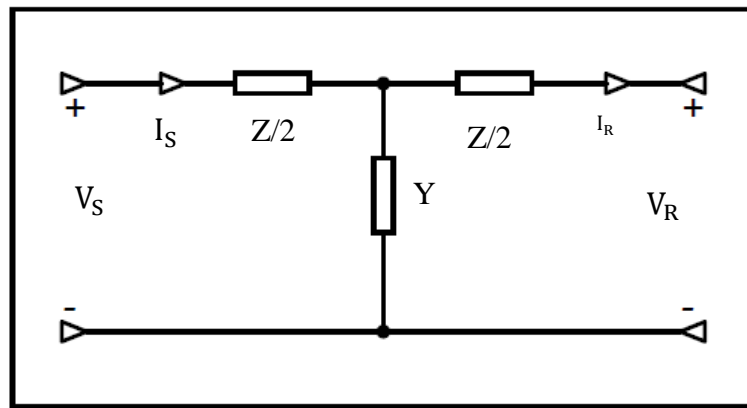
Kısa mesafeli enerji nakil hattının sonuna bağlı olan yükün omik, endüktif ve kapasitif olması durumuna göre ayrı ayrı fazör diyagramı çizilir.

### 2.1.2. Orta mesafeli enerji nakil hattı

Hat uzunluğunun 80-240 km arası olan hat modelidir. İletim hatlarının uzunluğu ve gerilimin artmasıyla kısa iletim hatları modeli ihmal edilen kapasite değerleri bu hat modelinde önem arz etmektedir. (Tür, 2010:16). Bu sebeple doğru bir yaklaşım için kaçak geçirgenlik ve kapasitenin de hesaplara dahil edilmesi gerekir.

Şönt admintansın hat boyunca bir ya da daha fazla noktada toplandığı kabul edilerek orta uzunluktaki iletim hatları nominal  $\pi$  ve nominal T eşdeğer devresi olarak modellenir (Affetmez, 2021:25).

Orta mesafeli enerji nakil hattı nominal T eşdeğer devresi ise hattın toplam empedansı iki eşit parçaya bölünürse ve şönt admintansın öncesine ve sonrasına yerleştirilirse elde edilen eşdeğer devre nominal T devresi elde edilir.



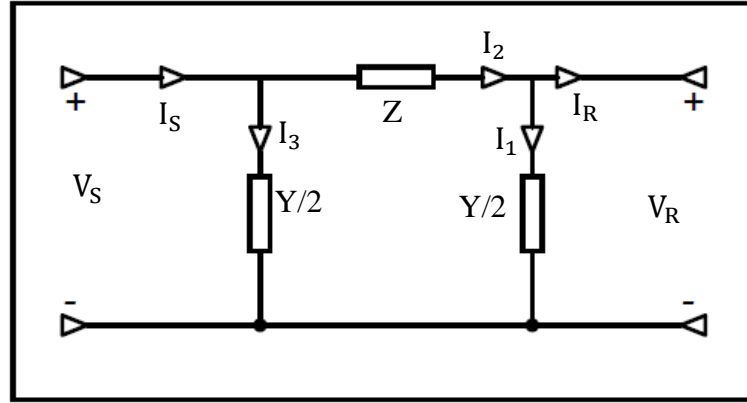
Şekil 2.3. Orta mesafeli enerji nakil hattı nominal T devre modeli

Y: Admintans

T eşdeğer devre modelinin denklemleri ise;

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Z \cdot Y/2 & Z \cdot (1 + Z \cdot Y/4) \\ Y & 1 + Z \cdot Y/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \text{ 'dır. (2.3)}$$

Orta mesafeli enerji nakil hattı nominal  $\pi$  eşdeğer devresi hattın şönt admintasının hattın başına ve sonuna iki eşit parçaya bölünerek yerleştirilirse elde edilen eşdeğer devre nominal  $\pi$  devresi elde edilir.



Şekil 2.4. Orta mesafeli enerji nakil hattı nominal pi devre modeli

$\pi$  eşdeğer devre modelinin denklemleri için hat başı ve hat sonu gerilim ve akım değerleri arasında;

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y/2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y/2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Z \cdot Y/2 & Z \\ Y \cdot (1 + Z \cdot Y/4) & 1 + Z \cdot Y/2 \end{bmatrix} \text{ (2.4)}$$

Eşitlikleri ile ifade edilirler. Bu sayede orta mesafeli hat ve simetrik olan nakil hattı modeli için A, B, C, D değerleri;

$$A = D = 1 + Z \cdot Y/2, B = Z, C = Y \cdot (1 + Z \cdot Y/4) \text{ olarak ifade edilebilmektedir.}$$

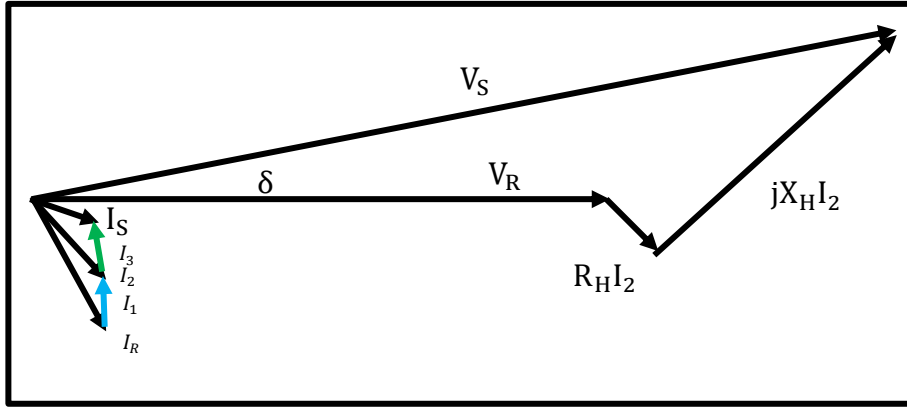
Ve bu denklem takımları genel formda;

$$V_S = A \cdot V_R + B \cdot I_R$$

$$I_S = C \cdot V_R + D \cdot I_R$$

$$V_S = (1 + Z \cdot Y/2) \cdot V_R + Z \cdot I_R$$

$$I_S = Y \cdot (1 + Z \cdot Y/4) \cdot V_R + (1 + Z \cdot Y/2) \cdot I_R$$

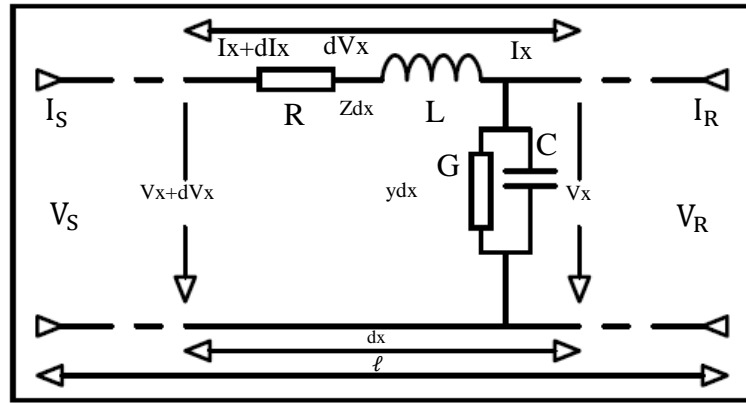


Şekil 2.5. Orta mesafeli enerji nakil hattının fazör diyagramı

Kısa mesafeli enerji nakil hattında fazör diyagramında olduğu gibi orta mesafeli enerji nakil hattının sonuna bağlı olan yükün omik, endüktif ve kapasitif olması durumuna göre ayrı ayrı fazör diyagramı çizilir.

### 2.1.3. Uzun mesafeli enerji nakil hattı

Hat uzunluğu 240 km'den uzun olan hat modelidir. İletim hattının R, L, C, G parametreleri toplu değil, hat boyunca eşit olarak dağıldığı kabulü yapılarak matematiksel çözüm işlemleri yapılır. Matematiksel çözüm için göz önüne alınan Şekil 2.6.'da verilmiştir (Affetmez, 2021:27).



Şekil 2.6. Uzun mesafeli enerji nakil hattı devre modeli

R: İletim hattının kilometre başına direnci ( $\Omega/\text{km}$ )

L: İletim hattının kilometre başına öz indüktansı (H/km)

C: Hattın kilometre başına kapasitansı (F/km)

G: Hattın kilometre başına kaçak iletkenliği (S/km)

z: Birim mesafedeki hattın seri empedansı

y: Birim mesafedeki hattın şönt admitansı

$l$ : Hattın kilometre cinsinden toplam mesafesi

$Z = z.L$ : Toplam seri empedansı

$Y = y.L$ : Toplam şönt admitans

$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$ : Karakteristik empedans

$Y_c = \sqrt{\frac{y}{z}}$ : Karakteristik admitans

$\gamma = \sqrt{z \cdot y} = \alpha + j\beta$

$\gamma$ : Propagasyon (yayıma) sabiti

$\alpha$ : Zayıflama sabiti (dB/m = 8,686xNp/m)

İlerleme yönündeki gerilim veya akım dalgasının birim mesafedeki genlik olarak zayıflaması

$\beta$ : Faz sabiti (Radyan/m) ( $\beta = 2\pi / \lambda$  Radyan/uzunluk)

Birim mesafedeki iki nokta arasındaki gerilim veya akımların faz açıları arasındaki fark hattın dx mesafesi başındaki akım  $I + \Delta I$  gerilim  $V + \Delta V$  iken, hat sonundaki akım  $I_x$  gerilim ise  $V_x$  olmaktadır. Bu durumda dx mesafesi için gerilim ( $dV_x$ ) ve akım ( $dI_x$ ) bağıntılarına ilişkin ifadeleri ele alınabilir. Bu ifadeler ise,  $\ell = x$  için, ( $V_s = V_x$  ve  $I_s = I_x$ ) eşitlikleri tekrar elde edilirse (Affetmez, 2021:30);

Gerilim değişimi;

$$dV_x = (I_x + dI_x) \cdot z dx$$

$$dV_x \cong (I_x) \cdot z dx$$

$$\frac{dV_x}{dx} = z \cdot I_x$$

$$\frac{d^2 V_x}{dx^2} = z \frac{dI_x}{dx} = z \cdot y \cdot V_x$$

Akım değişimi;

$$dI_x = (V_x + dV_x) \cdot y dx$$

$$dI_x \cong (V_x) \cdot y dx$$

$$\frac{dI_x}{dx} = y \cdot V_x$$

$$\frac{d^2 I_x}{dx^2} = z \frac{dV_x}{dx} = z \cdot y \cdot I_x$$

2. dereceden adi lineer diferansiyel denklem;

$$x=0 \text{ için } V_x = V_R, I_x = I_R$$

$$x = \ell \text{ için } V_x = V_S, I_x = I_S \text{ başlangıç şartları}$$

$$V_S = \frac{V_R + I_R Z_c}{2} e^{\alpha \ell} e^{j\beta \ell} + \frac{V_R - I_R Z_c}{2} e^{-\alpha \ell} e^{-j\beta \ell} \quad (2.5)$$

$$I_S = \frac{Y_c V_R + I_R}{2} e^{\alpha \ell} e^{j\beta \ell} - \frac{Y_c V_R - I_R Z_c}{2} e^{-\alpha \ell} e^{-j\beta \ell} \quad (2.6)$$

$$V_S = \frac{V_R + I_R Z_c}{2} e^{\gamma \ell} + \frac{V_R - I_R Z_c}{2} e^{-\gamma \ell} \quad (2.7)$$

$$I_S = \frac{Y_c V_R + I_R}{2} e^{\gamma \ell} - \frac{Y_c V_R - I_R}{2} e^{-\gamma \ell} \quad (2.8)$$

$$V_S = \left[ \frac{e^{\gamma \ell} + e^{-\gamma \ell}}{2} \right] \cdot V_R + \left[ \frac{e^{\gamma \ell} - e^{-\gamma \ell}}{2} \right] \cdot Z_c I_R \quad (2.9)$$

$$I_S = \left[ \frac{e^{\gamma \ell} - e^{-\gamma \ell}}{2} \right] \cdot Y_c V_R + \left[ \frac{e^{\gamma \ell} + e^{-\gamma \ell}}{2} \right] \cdot I_R \quad (2.10)$$

$$V_S = \cosh(\gamma \cdot \ell) \cdot V_R + \sinh(\gamma \cdot \ell) \cdot Z_c \cdot I_R \quad (2.11)$$

$$I_S = \sinh(\gamma \cdot \ell) \cdot Y_c \cdot V_R + \cosh(\gamma \cdot \ell) \cdot I_R \quad (2.12)$$

Bu denklem takımları uzun mesafeli enerji nakil hattı için hat başı parametreleri olan gerilim ve akımını hat sonundaki gerilim ve akımı ile bağlantı olarak ifade edilir. Hattın sabit değerler için belirtildiği gibi, bu eşitlikler genel denklemler halinde daha basit olarak ifade edilirse,

$$V_S = A \cdot V_R + B \cdot I_R$$

$$I_S = C \cdot V_R + D \cdot I_R$$

Şeklinde gösterilebilirler.

Bu sabitler ise uzun mesafeli enerji nakil hattı için eşitlikler;

$$A = \cosh(\gamma \cdot \ell) = \cosh\left(\left(\sqrt{yz}\right) \cdot \ell\right) = \cosh(YZ) = \cosh\theta$$

$$B = Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot \ell) = Z_c \cdot \sinh\left(\left(\sqrt{yz}\right) \cdot \ell\right) = Z_c \cdot \sinh(YZ) = Z_c \cdot \sinh\theta$$

$$C = Y_c \cdot \sinh(\gamma \cdot \ell) = Y_c \cdot \sinh\left(\left(\sqrt{yz}\right) \cdot \ell\right) = Y_c \cdot \sinh(YZ) = Y_c \cdot \sinh\theta$$

$$D = A$$

$$V_S = \cosh(\theta) \cdot V_R + \sinh(\theta) \cdot Z_c \cdot I_R \quad (2.13)$$

$$I_S = \sinh(\theta) \cdot Y_c \cdot V_R + \cosh(\theta) \cdot I_R \quad (2.14)$$

Karmaşık sayıların dolaylı olarak hesaplanabilmesi için çözümlenmede hiperbolik formların açılımlarında ise;

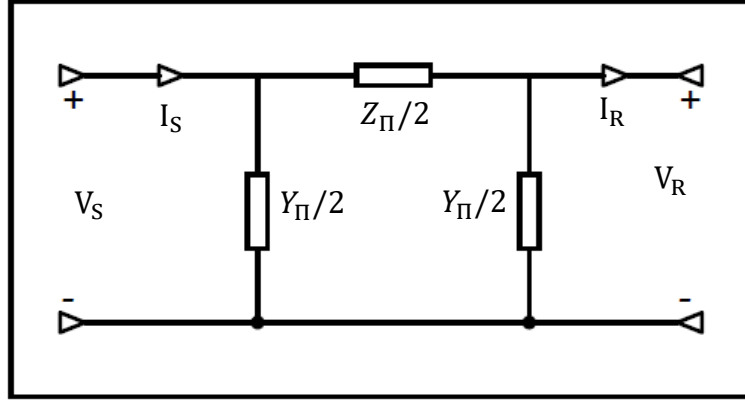
$$\sinh(\gamma \cdot \ell) = \sinh(\alpha \cdot \ell + j\beta \cdot \ell) = \sinh(\alpha \cdot \ell) \cdot \cos(\beta \cdot \ell) + j \cosh(\alpha \cdot \ell) \cdot \sin(\beta \cdot \ell) \quad (2.15)$$

$$\cosh(\gamma \cdot \ell) = \cosh(\alpha \cdot \ell + j\beta \cdot \ell) = \cosh(\alpha \cdot \ell) \cdot \cos(\beta \cdot \ell) + j \sinh(\alpha \cdot \ell) \cdot \sin(\beta \cdot \ell) \quad (2.16)$$

$$\cosh(\gamma \cdot \ell) = \cosh(\alpha \cdot \ell + \beta \cdot \ell) = \frac{e^{\gamma \cdot \ell} + e^{-\gamma \cdot \ell}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (e^{\alpha \cdot \ell} e^{j\beta \cdot \ell} + e^{-\alpha \cdot \ell} e^{-j\beta \cdot \ell}) \quad (2.17)$$

$$\sinh(\gamma \cdot \ell) = \sinh(\alpha \cdot \ell + \beta \cdot \ell) = \frac{e^{\gamma \cdot \ell} - e^{-\gamma \cdot \ell}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (e^{\alpha \cdot \ell} e^{j\beta \cdot \ell} - e^{-\alpha \cdot \ell} e^{-j\beta \cdot \ell}) \quad (2.18)$$

Orta mesafeli enerji nakil hatlarında, hat büyüklükleri için düzenlenmiş parametreler uygulandığında, nominal  $\pi$  ve T devreleri hattı tam olarak karşılayamamaktadır. Uzun mesafeli hatlarda eşit olarak dağıtılmış hat parametreleri uygulandığında, orta mesafedeki hatlar için uygulanan denk bir eşdeğer  $\pi$  veya T devresiyle daha düzgün ve doğru sonuçlar elde edilir.



Şekil 2.7. Uzun mesafeli enerji nakil hattı pi devre modeli

Benzer şekilde devredeki seri empedansa ( $Z_{\Pi}$ ) ve şönt admitansa da ( $Y_{\Pi}$ ) olarak tanımlanırsa simetrik bir devre modeli için uygulanan  $\pi$  denkleminde misli olarak:

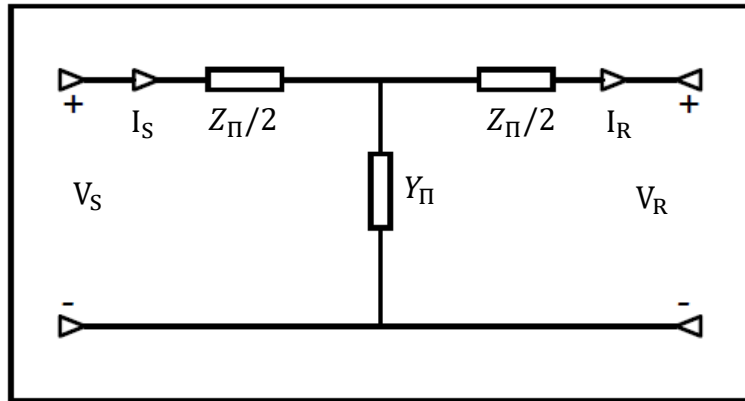
Nominal  $\Pi$  ye benzetimden;

$$V_S = \cosh(\gamma \cdot \ell) \cdot V_R + \sinh(\gamma \cdot \ell) \cdot Z_C \cdot I_R = (1 + Z_{\Pi} \cdot Y_{\Pi}/2) \cdot V_R + Z_{\Pi} \cdot I_R \quad (2.19)$$

$$I_S = \sinh(\gamma \cdot \ell) \cdot Y_C \cdot V_R + \cosh(\gamma \cdot \ell) \cdot I_R = Y_{\Pi} \cdot (1 + Z_{\Pi} \cdot Y_{\Pi}/4) \cdot V_R + (1 + Z_{\Pi} \cdot Y_{\Pi}) \cdot I_R \quad (2.20)$$

$$Z_{\Pi} = B = Z_C \cdot \sinh\theta = Z_C \cdot \sinh(\gamma \cdot \ell) = Z_C \cdot \frac{\sinh(\sqrt{\gamma Z})}{\sqrt{\gamma Z}} \quad (2.21)$$

$$\frac{Y_{\Pi}}{2} = \frac{A-1}{B} = \frac{\cosh\theta - 1}{Z_C \sinh\theta} = \frac{\tanh(\frac{1}{2}\gamma \cdot \ell)}{Z_C} = \frac{Y}{2} \cdot \frac{\tanh(\frac{1}{2}\sqrt{\gamma Z})}{\frac{1}{2}\sqrt{\gamma Z}} \quad (2.22)$$



Şekil 2.8. Uzun mesafeli enerji nakil hattı nominal T devre modeli

Benzer şekildeki durum için nominal T devre modeli için de geçerlidir. Benzer durumda nominal devredeki seri empedansa ( $Z_T$ ) ve şönt admitansa da ( $Y_T$ ) olarak adlandırılırsa simetrik devre modeli için uygulanabilir olan T denklemlerinde aynı şekilde:

Nominal T'ye benzetilirse;

$$V_S = \cosh(\gamma \cdot \ell) \cdot V_R + \sinh(\gamma \cdot \ell) \cdot Z_C \cdot I_R = (1 + Z_T \cdot Y_T/2) \cdot V_R + Z_{\Pi} \cdot (1 + Z_T \cdot Y_T/2) \cdot I_R \quad (2.23)$$

$$I_S = \sinh(\gamma \cdot \ell) \cdot Y_C \cdot V_R + \cosh(\gamma \cdot \ell) \cdot I_R = Y_T \cdot V_R + (1 + Z_T \cdot Y_T) \cdot I_R \quad (2.24)$$

$$Y_T = C = Y_C \sinh \theta = Y_C \frac{\sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \quad (2.25)$$

$$\frac{Z_T}{2} = \frac{A-1}{C} = \frac{\cosh \theta - 1}{Y_C \sinh \theta} = \frac{\tanh(\frac{1}{2} \gamma \ell)}{Y_C} = Z_C \cdot \tanh(\frac{1}{2} \sqrt{YZ}) \quad (2.26)$$

Olur.

## 2.2. Güç Sistemlerinde Tek Hat Empedans ve Reaktans Diyagramları

Sisteme dahil olan cihazların eş değer devreleri yerine, bunlar için düşünülmüş standart semboller kullanılarak diyagram da sadece bir fazı için bir hat olarak ifade edilmesine tek hat diyagramı olarak ifade edilmektedir. Tek hat diyagramında doğrudan empedans diyagramı çıkarılabilir. Eğer kısa devre arıza analizi yapılacaksa empedans değil reaktans üzerinden analizler yapılmalıdır.

Eğer güç sisteminin yük analizi yapılacaksa rölenin kaçınıcı periyotta açtığı, kesicinin kaç periyot sonra kestiği gibi tüm özelliklerini göz önünde bulundurmalıyız. Bunu sadece yük analizinde değil arızanın geçici durum analizinde de bunların tamamını dahil etmeliyiz. Genellikle kısa devre arızası ve sürekli durum analizi yapılacağından dolayı röle, kesici ve ayırıcı gibi aygıtların güç analizi hesaplarında ele alınmamaktadır. Fakat kesici seçimi ise üç faz kısa devre durumu için atama değeri yapılmalıdır.

Tek hat ve empedans diyagramları ile hesaplanacak olan sistem modeli yapılarak gerekli olan arıza analizi ve diğer durumlar için hesaplama kolaylığı sağlamaktadır. Ayrıca sistem modelinde üç faz hat modelleme yerine sistem tek faz diyagram analizi yapılarak işlem kolaylığı ve daha hızlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Sadece bulunan sonuç üç fazlı sistem için üç katı ile çarpılması yeterli olacaktır.

Sistemin topraklanması işlemi ise iki farklı türde yapılmaktadır. İşletme topraklaması şebekenin yıldız noktasının topraklanması ve koruma topraklaması yapılarak insan için tehlike arz edecek iletken kısımların topraklanmasıdır. Yıldız noktasının topraklanması ise üç şekilde yapılmaktadır. Bunlar;

- Direk topraklama
- Direnç ile topraklama
- Reaktans ile topraklama

Sistem dengeli ise topraklama yöntemleri birbirinden farksızdır. Ama sistem dengede değilse her biri için farklı model çıkar. Direnç ve reaktans kullanılmasının sebebi, oluşabilecek bir kısa devre arızasında toprak akımı sınırlandırmaktır.

Seri reaktör kısa devre akımını sınırlamak için kullanılır. İşletme topraklaması 66 kV'un üzerinde ise topraklama yapılmak zorunludur. Generatör nötr noktaları direnç ya da reaktans üzerinden topraklanır.

Eğer sistemde yük analizi yapılacaksa bu durumda dirençler de ihmal edilmeyeceğinden tek hat diyagramında dirençlerin değerlerinin de bilinmesi gerekir.

Kısa devre analizinde özellikle döner makine olmayan transformatör, iletim hattı, asenkron motor gibi elemanların arızaya katkısı çok çok küçük olduğundan ihmal edilmektedir. Arıza katkısı yapan elektrik makineleri ise;


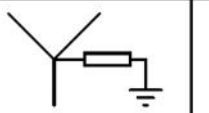

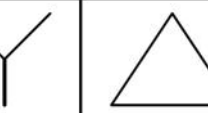
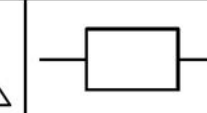
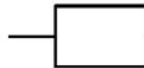
- Senkron motor
- Senkron generatör

Empedans diyagramında tek hat diyagramlarında kullanılan generatörlerin nötrleri ile toprak arasında ki akım sınırlandırıcı empedansları ihmal edilir. Çünkü dengede olan generatör nötr noktaları sistem nötrleri ile aynı potansiyelde olduğundan nötr noktaları üzerinden toprak akımı akmayacaktır (Çakır, 1986:1).

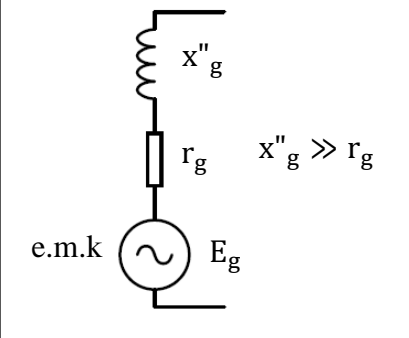
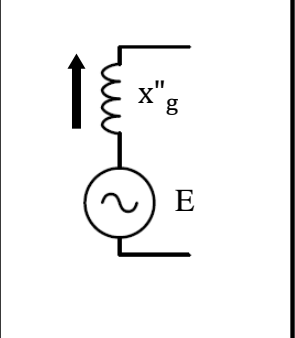
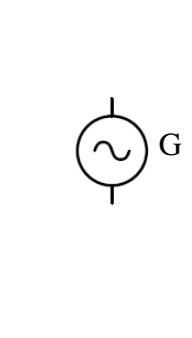
### 2.2.1. Devre elemanları eşdeğer devre modelleri

Güç sistemlerinde arıza analizi yapılırken sistemin kolay modellenebilmesi ve hesapların daha kolay yapılması için sistem tek hat diyagramına indirgenerek işlemler yapılabilmektedir. Bu sayede sistem daha basit ve daha net ortaya konulabilmektedir. Fakat arıza analizinde bazı ihmaller yapılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmaktadır. Güç sistemlerinde ise kullanılan her bir elemanın eşdeğer devresi ve sembol olarak aşağıda verilmiş olan tablolardaki şekiller ile ifade edilerek sistem modellenmesi yapılmaktadır.

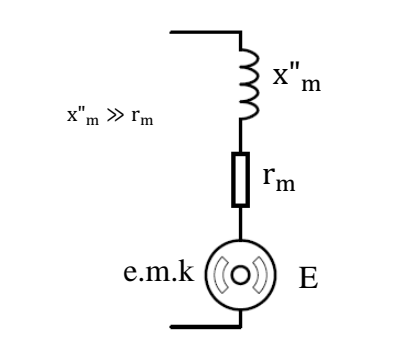
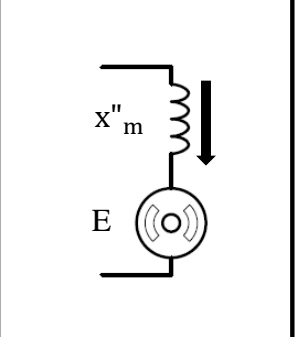
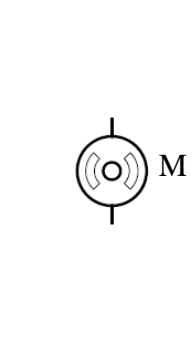
**Tablo 2.1.** Güç sisteminde kullanılan bağlantı şekillerinin sembol gösterimleri

					
Üç Fazlı Yıldız Bağlantı Nötr Noktası Reaktans Üzerinden Topraklı	Üç Fazlı Yıldız Bağlantı Nötr Noktası Direnç Üzerinden Topraklı	Üç Fazlı Yıldız Bağlantı Nötr Noktası Direk Topraklı	Üç Fazlı Yıldız Bağlantı Nötr Noktası Topraksız	Üç Fazlı Üçgen Bağlantı	Kesici

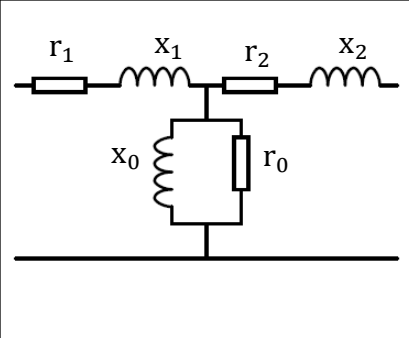
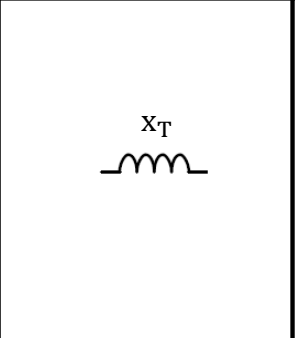
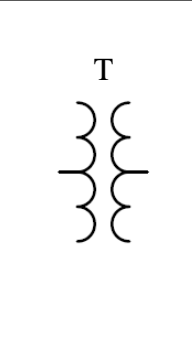
**Tablo 2.2.** Güç sisteminde kullanılan generatörün eşdeğer devresinin sembol gösterimleri

Kullanılan Eleman	Empedans Diyagramında Kullanılan Eşdeğer Devre	Kısa Devre Hesapları İçin Eşdeğer Devre	Tek Hat İçin Standart Sembol
Generatör	 <p><math>x''_g</math> <math>r_g</math> <math>x''_g \gg r_g</math> e.m.k <math>E_g</math></p>	 <p><math>x''_g</math> E</p>	 <p>G</p>

**Tablo 2.3.** Güç sisteminde kullanılan motorun eşdeğer devresinin sembol gösterimleri

Kullanılan Eleman	Empedans Diyagramında Kullanılan Eşdeğer Devre	Kısa Devre Hesapları İçin Eşdeğer Devre	Tek Hat İçin Standart Sembol
Motor	 <p><math>x''_m</math> <math>r_m</math> <math>x''_m \gg r_m</math> e.m.k E</p>	 <p><math>x''_m</math> E</p>	 <p>M</p>

**Tablo 2.4.** Güç sisteminde kullanılan transformatörün eşdeğer devresinin sembol gösterimleri

Kullanılan Eleman	Empedans Diyagramında Kullanılan Eşdeğer Devre	Kısa Devre Hesapları İçin Eşdeğer Devre	Tek Hat İçin Standart Sembol
Transformatör	 <p><math>r_1</math> <math>x_1</math> <math>r_2</math> <math>x_2</math> <math>x_0</math> <math>r_0</math></p>	 <p><math>x_T</math></p>	 <p>T</p>

**Tablo 2.5.** Güç sisteminde kullanılan T-eşdeğer iletim hattı devresinin sembol gösterimleri

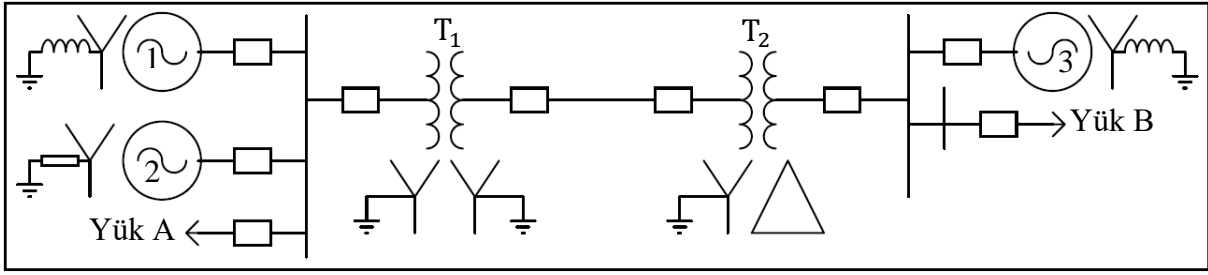
Kullanılan Eleman	Empedans Diyagramında Kullanılan Eşdeğer Devre	Kısa Devre Hesapları İçin Eşdeğer Devre	Tek Hat İçin Standart Sembol
T-Eş Değer İletim Hattı			

**Tablo 2.6.** Güç sisteminde kullanılan pi-eşdeğer iletim hattı devresinin sembol gösterimleri

Kullanılan Eleman	Empedans Diyagramında Kullanılan Eşdeğer Devre	Kısa Devre Hesapları İçin Eşdeğer Devre	Tek Hat İçin Standart Sembol
$\pi$ -Eş Değer İletim Hattı			

Güç sistemlerinde sistemin modellenmesi veya arıza analizi için yapılan işlemlerde tablolarda gösterilen eş değer devre elemanları hat modellenmesi yapılarak istenilen işlem yapılmaktadır. Sadece sistem üzerinde kullanılan generatör sayısı, transformatör sayısı, iletim hatları ve yük sayısına bağlı olarak sisteme ilave edilebilir.

Tabloda verilen güç sisteminde kullanılan elemanların enerji sisteminde nasıl bağlantı yapıldığı ve elemanların tek hat şema çizimi için nasıl ele alınacağı iki baralı, üç adet jeneratörlü, iki adet yükün beslediği, yükseltici ve indirici transformatörün kullanıldığı Şekil 2.9.'da tasarımı gerçekleştirilmiş olan tek hat diyagramını ele alarak güç sisteminin empedans diyagramı ile reaktans diyagramı çıkarılarak ele alalım.



**Şekil 2.9.** Bir güç sisteminin tek hat şeması

Güç sisteminde kullanılan elemanların parametre değerleri;

Generatör 1: 20000 kVA, 6,6 kV,  $x_d''=0,655$

Generatör 2: 10000 kVA, 6,6 kV,  $x_d''=1,31$

Generatör 3: 30000 kVA, 3,81 kV,  $x_d''=0,1452$

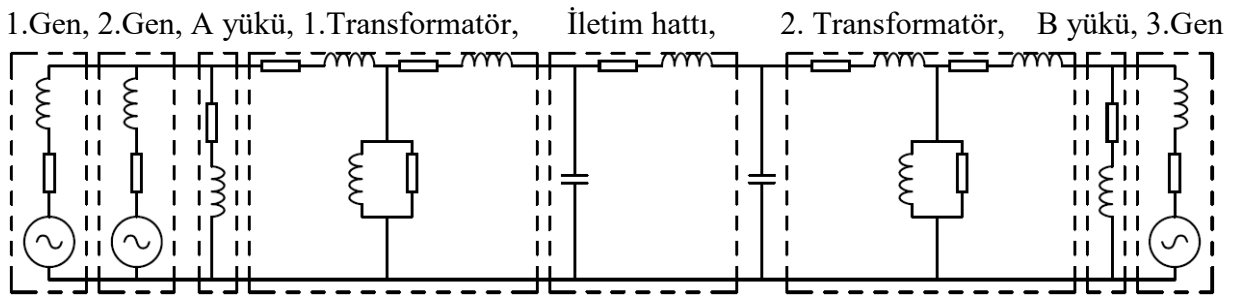
$T_1$  ve  $T_2$  : 10000 kVA, 3,81/38,1 kV,  $x=14,52$  yüksek gerilim tarafına göre (Üç fazlı grupların birindeki tek fazlı transformatörler)

$X_{\text{hat reaktansı}}$ : 17,4

A yükü : 15000kW, 6,6 kV,  $\text{Cos}\theta=0,9$  Endüktif

B yükü : 30000kW, 3,81 kV,  $\text{Cos}\theta=0,9$  Endüktif

Devrenin arıza analizi yapabilmek için de yük analizi yapabilmek için de devrenin herhangi bir noktasındaki akım veya gerilim değerini doğrudan hesaplayabilmek için ya empedans diyagramı ya da reaktans diyagramı kullanılır. Şekil 2.10.'da verilen diyagram ise Şekil 2.9.'da verilen güç sisteminin çıkarılmış empedans diyagramıdır.

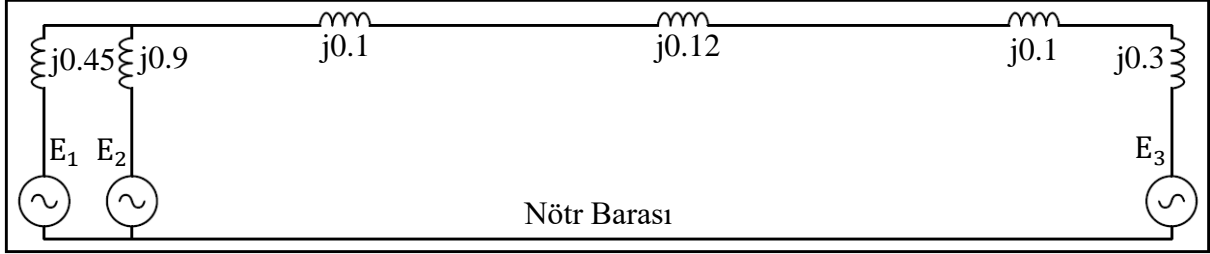


**Şekil 2.10.** Şekil 2.9.'da verilen güç sisteminin empedans diyagramı

Özellikle arıza analizinde reaktans diyagramı çok önemlidir. Arıza hesapları için bütün statik yükleri, dirençleri, transformatörlerin mıknatıslanma akımlarını ve taşıma hatlarının kapasitif akımlarını (kısa devre akımı yanında çok küçük kaldıkları için) ihmal ederse empedans diyagramı reaktans diyagramına çevrilmiş olur (Çakır, 1986:7).

Güç sistemlerinde ise koruma amaçlı veya devrede oluşabilecek herhangi olumsuz bir duruma karşı önlem amaçlı veya koruma amaçlı olarak kullanılan kesici seçiminin değeri sistemde maximum seviyede akım çekebilecek senaryoya göre kesici değeri, reaktans

diyagramının herhangi bir noktasında oluşabilecek kısa devre durumuna göre matematiksel analiz yapılarak kesici değeri seçilir. Şekil 2.11’de verilen diyagram ise Şekil 2.9.’da verilmiş olan güç sisteminin reaktans diyagramıdır. Güç sistemlerinde diyagramda çiziminde ise bazı kabuller yapılarak reaktans diyagramı çizilmektedir.



**Şekil 2.11.** Şekil 2.9.’da verilen güç sisteminin reaktans diyagramı

Reaktans diyagramında güç sisteminde kullanılan elemanların parametre değerleri matematiksel hesaplamalarda tüm değerler ya yüksek gerilim tarafına veya alçak gerilim tarafına indirgeyerek matematiksel işlemler yapılmalıdır. Aksi halde diyagram üzerinde yapılacak olan matematiksel hesaplamalarda yanlış sonuçlar elde edilebilir.

İndirgeme oranı ise güç iletim sistemlerinde kullanılan transformatörlerin dönüştürme oranları göre indirgeme işlemi yapılmalıdır.

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.27)$$

$V_1$ : Primer gerilimi

$V_2$ : Sekonder gerilimi

$I_1$ : Primer akımı

$I_2$ : Sekonder akımı

$N_1$ : Primer sargısı sarım sayısı

$N_2$ : Sekonder sargısı sarım sayısı

**Tablo 2.7.** Transformatör indirgeme çarpanları

	Sekonder tarafından primer tarafına indirgeme oranı	Primer tarafından sekonder tarafına indirgeme oranı
Gerilim	a	1/a
Akım	1/a	a
Direnç	$a^2$	$1/a^2$
Reaktans	$a^2$	$1/a^2$

Güç sistemlerinde arıza analizi yapılırken sistemde kullanılan transformatörlerin dönüştürme oranına göre Tablo 2.7.'de verilen transformatörün parametre değerlerine göre matematiksel analiz işlemlerinde primer tarafı sekonder tarafına indirgenir veya sekonder tarafı primer tarafına indirgenmesi ile matematiksel olarak analizler gerçekleştirilir. Ayrıca yükseltici veya düşürücü tip transformatörlerin çıkışına bağlanan yükünde dönüştürme oranına göre indirme işlemi yapılarak matematiksel analize dahil edilmelidir.

### 2.3. Güç Sistemlerinde Per-Unit (Birim Başına) Değerler

Enerji iletim sistemlerinde ele alınan değerler, sayısal değer olarak büyük olmasından dolayı arıza analizi ve diğer hesaplamalarda yapılacak olan hesaplama işleminin daha basit ve hızlı yapılması için yapılan sayısal dönüşüm işlemi olarak ifade edilebilir. Sistem de baz olarak seçilen değere göre bütün değerler baz değere göre hesaplanır. Böylece yapılacak olan matematiksel ifade tek haneli sayısal değere dönüştürülerek hesaplamalar daha kolay yapılması sağlanır. Yapılan işlemler sonunda elde edilen veriler en sonunda baz değer ile işlem yapıp gerçek değere ulaşılır.

Per-unit değerler yüksek gerilim tarafından da alçak gerilim tarafından da aynı olur. Gerilim, akım, güç, empedans değerlerinden herhangi ikisinin anma (baz) değerini bilmemiz diğerlerini bulmamız için yeterli olmaktadır.

#### 2.3.1. Bir fazlı devreler

$$\text{Baz akım} = \frac{\text{Baz güç}}{\text{Baz gerilim}} \quad (2.28)$$

$$\text{Baz empedans} = \frac{\text{Baz gerilim}}{\text{Baz akım}} = \frac{(\text{Baz gerilim})^2}{\text{Baz güç}} = \frac{\text{kV}_{\text{LNB}}^2 \times 100}{\text{kVA}_{1\phi\text{B}}} = \frac{\text{kV}_{\text{LNB}}^2}{\text{MVA}_{1\phi\text{B}}} \quad (2.29)$$

$$\text{Bir devre elemanının per unit empedansı} = \frac{\text{Gerçek empedans}\Omega}{\text{Baz empedans}\Omega} \quad (2.30)$$

#### 2.3.2. Üç fazlı devreler

$$\text{Baz akım} = \frac{\text{Baz kVA}_{3\phi}}{\sqrt{3}\text{bazgerilim,kV}_{\text{LL}}} \quad (2.31)$$

$$\text{Baz empedans} = \frac{(\text{Baz gerilim}, \frac{\text{kV}_{\text{LL}}}{\sqrt{3}})^2 \times 1000}{\text{BazkVA}_{3\phi}/3} = \frac{(\text{kV}_{\text{LLB}})^2 \times 1000}{\text{kVA}_{3\phi\text{B}}} = \frac{(\text{kV}_{\text{LLB}})^2}{\text{MVA}_{3\phi\text{B}}} \quad (2.32)$$

$$\text{Bir devre elemanının per unit empedansı} = \frac{\text{Gerçek empedans}\Omega}{\text{Baz empedans}\Omega} \quad (2.33)$$

#### 2.3.3. Uygulamalı güç sistemi

Genel olarak güç sisteminde ele aldığımız üst kısımlardaki konular için uygulamalı bir örnek üzerinde ele alarak bir güç sistemi üzerinde reaktans devresi çizilerek matematiksel analiz gerçekleştirilerek problem üzerinde tatbik edilebilir.

## Problem

Şekil 2.12.'de verilen tek hat şeması çizilmiş dört baralı olan güç sistemindeki elemanlarının parametre değerleri alt kısımdaki gibidir (Glover vd., 2008: 412).

Generatör 1: 500 MVA, 13,8 kV,  $x_d''=0,2$  p.u.

Generatör 2: 750 MVA, 18 kV,  $x_d''=0,18$  p.u.

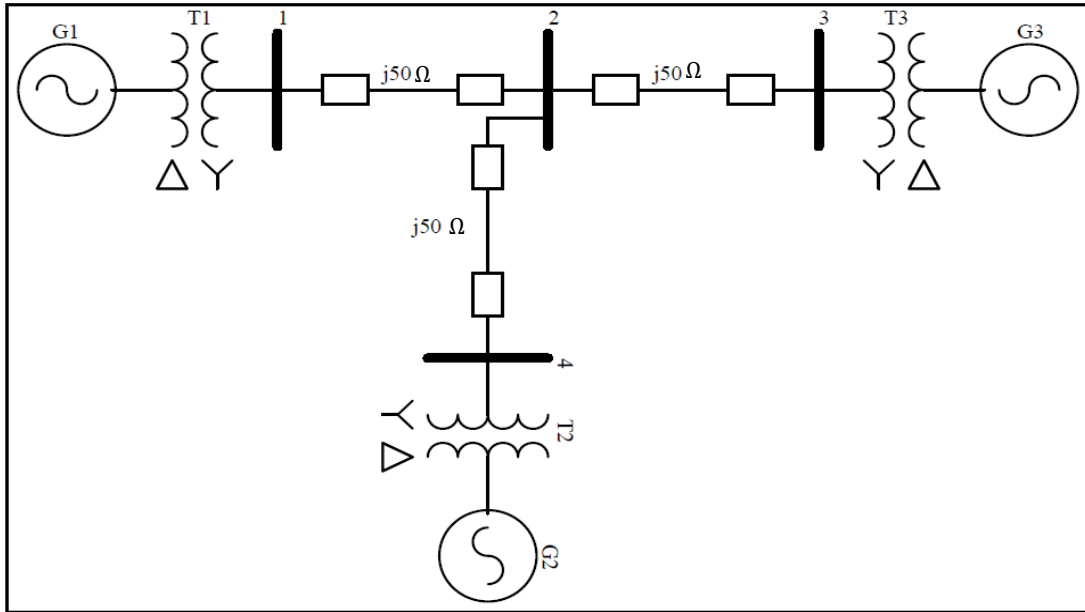
Generatör 3: 100 MVA, 20 kV,  $x_d''=0,17$  p.u.

Transformatör T1: 500 MVA, 13,8 $\Delta$ /500 $\lambda$  kV,  $x=0,12$ p.u.

Transformatör T2: 750 MVA, 18 $\Delta$ /500 $\lambda$  kV,  $x=0,1$ p.u.

Transformatör T3: 1000 MVA, 20 $\Delta$ /500 $\lambda$  kV,  $x=0,1$ p.u.

Hat empedansları:  $x=50\Omega$

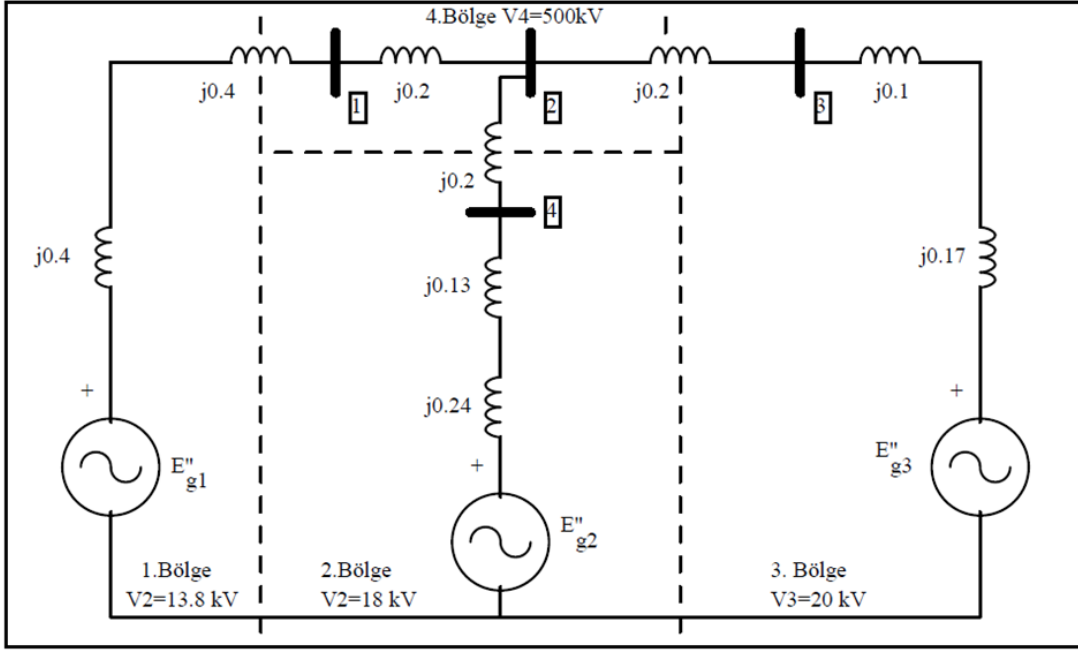


Şekil 2.12. Örnek güç sistemi

Arıza öncesi gerilimin 525kV olduğu birinci bara da üç faz kısa devre meydana gelmiştir. Arızadan önce yük akımı ihmal edilmektedir. Üçüncü jeneratörün 1000MVA, 20kV değerleri baz değeri ile pozitif dizi reaktansını per unit olarak çiziniz.

- Arızada Thevenin reaktansını per-unit olarak belirleyiniz.
- Alt geçici arıza akımını per-unit ve kA rms cinsinden belirleyiniz.
- Birinci generatörün ve 1-2 hattın arızaya katkısını belirleyiniz.

## Çözüm



Şekil 2.13. Şekil 2.12.'nin Örnek güç sisteminin birim başına pozitif dizi reaktans diyagramı

$$X''_{g1} = (0.20) \left( \frac{1000}{500} \right) = 0.40 \text{ p. u}$$

$$X''_{g2} = (0.18) \left( \frac{1000}{750} \right) = 0.24 \text{ p. u}$$

$$X_{T1} = (0.12) \left( \frac{1000}{500} \right) = 0.24 \text{ p. u}$$

$$X_{T2} = (0.10) \left( \frac{1000}{750} \right) = 0.13 \text{ p. u}$$

$$X_{T3} = 0.10 \text{ p. u}$$

$$X''_{j3} = 0.17 \text{ p. u}$$

$$Z_{BAZ4} = \frac{V_{BAZ4}}{S_{BAZ}} = \frac{(500)^2}{1000} = 250 \Omega$$

$$X_{\text{HAT } 1.2} = X_{\text{HAT } 2.3} = X_{\text{HAT } 2.4} = \frac{50}{250} = 0.20 \text{ p. u}$$

$$\begin{aligned} \text{a) } X_{\text{TH}} &= (0.4 + 0.24) // [0.20 + (0.20 + 0.10 + 0.17)] // (0.2 + 0.13 + 0.24) \\ &= 0.64 // [0.20 + 0.47 // 0.5733] = 0.64 // 0.4583 \\ &= 0.267 \text{ p. u} \end{aligned}$$

$$\text{b) } V_F = \frac{525}{500} = 1.05 \angle 0^\circ \text{ p. u}$$

$$I_{BAZ4} = \frac{S_{BAZ}}{(\sqrt{3}) \cdot V_{BAZ4}} = \frac{1000}{(\sqrt{3}) \cdot 500} = 1.155 \text{ kA}$$

$$I''_F = \frac{V_F}{Z_{\text{TH}}} = \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j0.2670} = -j3.933 \text{ p. u} = (-j3.933)(1.155) = -j4.541 \text{ kA}$$

c) Akım bölme kuralından;

$$I''_{g1} = (I''_F) \frac{0.4583}{(0.4583 + 0.64)} = (-j3.933)(0.4173) = -j1.641 \text{ p.u} = -j1.896 \text{ kA}$$

$$I''_{\text{HAT 1.2}} = (I''_F) \left( \frac{0.64}{(0.4583 + 0.64)} \right) = (-j3.933)(0.5827) = -j2.292 \text{ p.u} \\ = -j2.647 \text{ Ka}$$

Genel olarak yukarıda belirtilen bilgilerin ışığında ele alınan Şekil 2.12.'deki örnek güç sistemi üzerinde tatbik edilerek çözümlene yapıldı. Aynı şekilde farklı güç sistemleri üzerinde farklı arıza noktalarında çözümlenmeler yapılabilir. Verilen güç sistemin bara sayısına, generatör sayısına vd. elemanların sayısına bağlı olarak hangi hatta kısa devre olmuş ise o hattaki baralara bağlı olan hattın kısa devre hesabı yapılabilir. Fakat bu hesaplamaların yapılabilmesi için verilen güç sisteminin reaktans diyagramı çıkartılıp daha sonra hangi noktada kısa devre meydana gelmiş ise o noktadaki thevenin eş değer reaktans diyagramı çıkartılıp matematiksel olarak analiz işlemi gerçekleştirilebilir.

### 3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİMETRİK ARIZA ANALİZİ

Simetrik arızalarda güç sisteminde arıza meydana geldiğinde akan akım sistemdeki makinaların iç EMK'ları, bu makinaların empedansları ve arıza noktası ile makine arasındaki şebeke empedansları dikkate alınarak bulunur. Bir sistem kısa devreye maruz kalırsa çok yüksek akım geçer. Bu da ısınma yapar ve manyetik alan oluşturur. Akım arttıkça manyetik alan artar. Çok büyük bir manyetik alandan büyük bir akım geçerse sargıyı yerinden çıkaracak kadar büyük kuvvet oluşur. Bu nedenle arızalı kısımların mümkün oldukça en kısa sürede devre dışı bırakılması gerekir.

Arızaya en büyük katkı senkron makinadır. Fakat az da olsa diğer elemanlarında arızaya katkısı vardır. Akımın dinamik etkisinin meydana getirdiği mekanik zararlarda oluşabilmektedir. Bu sebeple arızanın meydana geldiği noktalarda arıza sistemden izole edilerek en kısa sürede arızanın olduğu bölge devre dışı edilmelidir. Standart yüksek gerilim cihazları, arızaları 3 periyotta arızayı izole edecek şekilde tasarlanmaktadır. Daha düşük gerilim hatlarında ise bu süre 5 ila 20 periyot arasında değişmektedir.

Yer altı şebekelerinde oluşan arızaları tespit etmek için piyasada hali hazırda satılan arıza akımı algılama ve gösterge düzeneği olan "LogiCon" markalı ürünün arıza algılama cihazının katalog bilgisi incelendiğinde hat üzerine bağlanan akım trafolarından alınan sinyaller ile üç faz için (RMS) değeri 20 ms'lik periyotlar ile hesaplanarak ayarlanan eşik hata akım değeri baz alınarak hat akımı açma kapama yapılmaktadır (Elektrolojik, 2018:10).

#### 3.1. Seri R-L Anlık Değişimler

Şekil 3.1'de verilen devre senkron jeneratörün eş değer devre modeli olarak ele alındığında devrede mevcut olan anahtar açık konumda iken akımın sıfır olduğu durumdur. Şayet anahtar açık konumdan kapalı konuma alındığında jeneratörün terminal uçları kısa devre edilmiş olacaktır. Böylece  $t=0$  anındaki akım ile  $t \geq 0$  anındaki akım Kirchoff gerilim yasası ile hesaplanabilir.

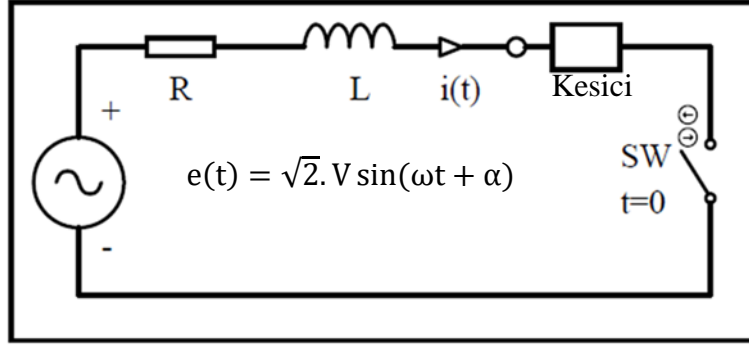
$$L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad t \geq 0 \quad (3.1)$$

$$i(t) = i_{dc}(t) + i_{ac}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{Z} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \right] \text{ Amper} \quad (3.2)$$

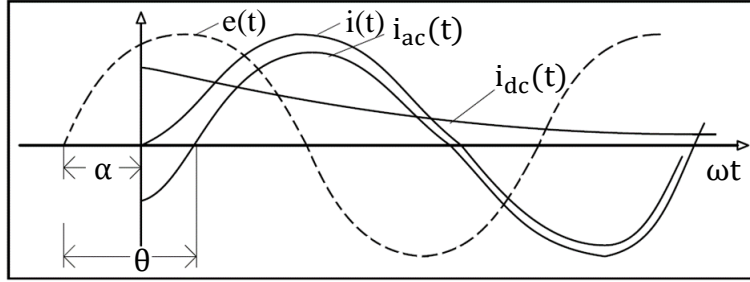
$$T = \frac{L}{R}$$

$$i_{ac}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \theta)] \text{ Amper} \quad (3.3)$$

$$i_{dc}(t) = -\frac{\sqrt{2} \cdot V}{Z} [\sin(\alpha - \theta) \cdot e^{-t/T}] \text{ Amper} \quad (3.4)$$



Şekil 3.1. Alternatif akım kaynaklı seri R-L devresi



Şekil 3.2. Seri R-L devresinde anahtarın kapatılma anı

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + (X)^2} \quad \Omega \quad (3.5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \tan^{-1} \frac{X}{R} \quad (3.6)$$

$I_{ac}$ 'nin maximum değeri alternatif akımının sıfır olduğu noktada  $\alpha = \theta$ 'ya eşit olur.

Sürekli durumda ise  $I_{RMS}$ ;  $I_{ac} = \frac{V}{Z}$ ,  $\alpha = \theta$  iken  $\alpha - \theta = 0$  olur  $\sin 0 = 0$  olduğundan  $\sqrt{2} \cdot I_{ac} = 0$  olur. Sıfır noktasından başlayarak sinüzoidal bir değişim oluşmaktadır. Bu değişim  $I_{ac}$  akımının maximum olduğu noktayı, ya +90 derecede görünür veya -90 derecede görünür. Bu değerlerde ise arıza akımının pik yaptığı noktalar olarak tanımlanabilir. Bu sebeple güç sisteminde meydana gelecek kısa devre durumunda seçilecek olan kesici değeri akımının pik yaptığı noktalardan büyük fakat kısa devre değerine en yakın değer seçilir.

Bu sebeple  $\alpha = \theta - \frac{\pi}{2}$  olarak tanımlanabilir. Arıza akımı ise;

$$I_{ac} = \sqrt{2} \cdot I_{ac} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) + e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad (3.7)$$

3.7'de verilen denklemde sinüs ifadesine ilave olarak eklenen üstel ifadeden dolayı eşitlik periyodik olmadığından dolayı  $e^{-\frac{t}{T}}$  ifadesi sabit olarak kabul edilerek;

$$I_{rms}(t) = \sqrt{|I_{ac}|^2 + |I_{dc}|^2} = \sqrt{|I_{ac}|^2 + (\sqrt{2} \cdot I_{ac} \cdot e^{-\frac{t}{T}})^2} \quad (3.8)$$

3.8 eşitliği periyodik olmadığından dolayı  $e^{-\frac{t}{T}}$  ifadesi sabit olarak kabul edilir.

$$t = \frac{T}{f}, \quad T = \frac{x}{2\pi f R};$$

t: Arıza akımının kaçınıcı periyotta temizlendiğini ifade eder.

$$I_{RMS}(T) = k(T) \cdot I_{ac} \quad (3.9)$$

$$I_{ac} = \frac{V}{Z} ;$$

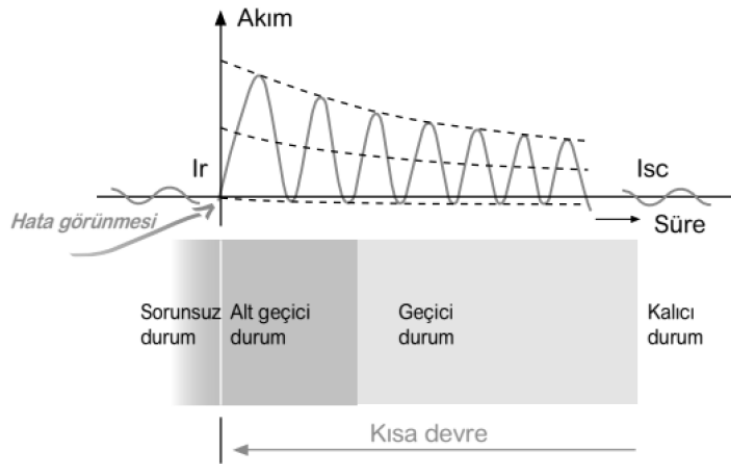
$$k(T) = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-4\pi T / (\frac{X}{R})}} \quad (\text{Asimetri faktörü});$$

Asimetri faktörünün değeri arızanın DC ofset değerinin hangi noktada oluştuğunu, kaçınıcı periyotta oluştuğunu ve periyottaki arıza akımının değerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Glover vd., 2008: 382).

### 3.2. Yüksüz Senkron Makinede Kısa Devre Akımı

Yüksüz senkron makinada 3 faz kısa devreyi incelemek için yapılan deney sırasında senkron makinanın bir fazında oluşan AC arıza akımının salınımı Şekil 3.3.'de verilmiştir. Şekilde olduğu gibi arıza akımı yüksek, bir ilk değerden daha düşük bir kararlı durum değerine indirgenmiştir.

Kısa devre stator akımlarından kaynaklanan manyetik akı öncelikle sargılarla bağlantılı olmayan yüksek relüktansa sahip yollardan akmaya zorlanır. Akı daha sonra düşük manyetik direnç yollarına doğru ilerledikçe stator endüktansı artar. Senkron makinadaki AC arıza akımı zamanla değişen  $L(t)$  veya  $X(t) = \omega \cdot L(t)$  reaktansı uygulanarak seri R-L devresiyle modellenir.



**Şekil 3.3.** Yüksüz senkron jeneratörün üç faz kısa devre sırasındaki bir faz AC arıza akımı

**Kaynak:** (Schneider Electric Orta Gerilim Teknik Kılavuzu 2017: 36)

En büyük arıza akımı alt geçici durumda gerçekleşir. Buna göre kesiciyi seçersek güç sisteminde meydana gelebilecek diğer arızalara da kesici arıza akımlarına dayanabilir. Matematiksel işlemlerin daha kolay ve basit olması adına senkron makinanın bir fazı baz alınarak işlemler yapılır. Daha sonra elde edilen değer tekrar 3 faza eşdeğere dönüştürülebilir.

Senkron makinanın üç fazı kısa devre edildiğinde rotor sargılarında çok büyük akım geçmektedir. Akımın büyüklüğüne bağlı olarak manyetik akı meydana getirir. Bu manyetik akı öncelikle redüktansın büyük olduğu tarafa meyleder. Redüktanstan ötürü buradan geçiş yapmayan manyetik akı reaktans tarafına meyleder. Yani redüktansın küçük olduğu tarafa döner. Bu durumlarda boyuna reaktans kullanılır. Bu durum için önemli olan husus rotorun küçük kısımlarından geçen manyetik akıdır. Boyuna eksen reaktansları kullanarak senkron makinanın anlık AC arıza akımını formül 3.10 ile hesaplanabilir.

$$i_{AC}(t) = \sqrt{2} \cdot E_g \left[ \left( \frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + \left( \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{1}{x_d} \right] \cdot \sin(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}) \quad (3.10)$$

$E_g$  : Senkron makinanın rms arıza öncesi faz-nötr uç gerilim değeri

Endüktans zamana bağlı olarak değişken olmasından dolayı üç tane endüktans değeri kullanılmaktadır. Bunlar;

$x''_d$  : Alt geçici boyuna reaktans

$x'_d$  : Geçici boyuna reaktans

$x_d$  : Boyuna senkron reaktans

$x''_d$ , azalmanın çok hızlı olduğu ilk birkaç periyottaki yüksüz generatör geriliminin DC akımına bölünmesiyle elde edilebilir.

$x'_d$ , azalmanın çok hızlı olduğu ilk birkaç periyot ihmal edilerek zarf geriye doğru uzatılır ve bu durumda  $I'$  (geçici durum) akımı elde edilir.

$x_d$ , sürekli kısa devre akımının maximum olduğu değerdir. Yüksüz senkron generatör gerilimi bu akıma bölünerek boyuna reaktans elde edilir.

$x''_d < x'_d < x_d$ , ifadesinde enine reaktans değerleri içinde geçerlidir.  $x''_q < x'_q < x_q$ , ifadeleri içinde bu akımlar arıza akımını önemli ölçüde tesir etmediğinden dolayı ihmal edilirler.

Yüksüz senkron makine için kısa devre akımları  $t=0$  anında arıza oluşmaya başladığında bileşenlerinin anlık arıza akımları ise;

$$I_{AC}(t) = \frac{E_g}{x''_d} = I'' \text{ Alt geçici arıza akımı} \quad (3.11)$$

$$I_{AC}(t) = \frac{E_g}{x'_d} = I' \text{ Geçici arıza akımı} \quad (3.12)$$

$$I_{AC}(t) = \frac{E_g}{x_d} = I \text{ Kararlı hal arıza akımı} \quad (3.13)$$

$x''_d$ ,  $x'_d$ ,  $x_d$ ,  $T''_d$ ,  $T'_d$  ve  $T_d$  değerleri senkron makina üreticileri tarafından sağlanmaktadır (Glover vd., 2008: 386) .

### 3.3. Güç Sisteminde Üç Faz Kısa Devreleri

Enerji iletim hatlarında oluşan üç faz kısa devre durumu diğer arıza türlerine göre simetrik arıza tipi olan durumdur. Bu nedenle üç faz kısa devre hesaplamalarında arızanın toprağa direkt ya da direnç üzerinden teması hata akımını etkilemez.

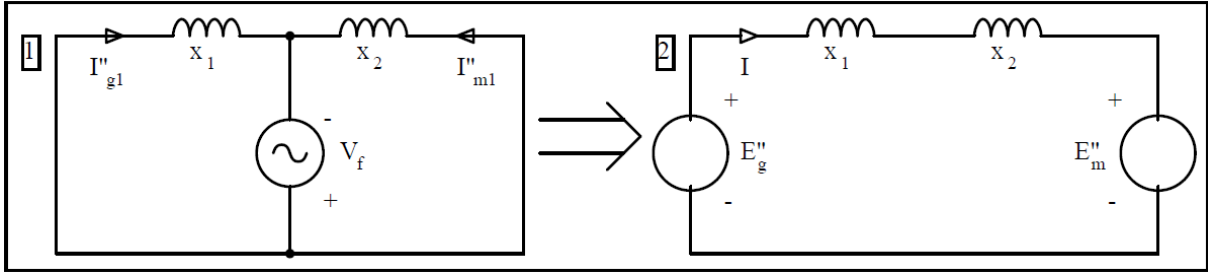
Enerji iletim sistemlerinde arızanın akımının en yüksek olduğu durum olmasından dolayı hatta kullanılacak olan kesici değerleri de bu duruma göre seçilerek kesici değeri atanır. Üç faz kısa devre durumunda alt geçici arıza akımının hesaplanabilmesi için bazı kabuller yapılarak sonuca varılır. Bunlar;

- Transformatörler kaçak reaktanslarıyla ifade edilirler. Sargı dirençleri, şönt admintansları ve yıldız-üçgen faz kaymaları ihmal edilir.
- İletim hatları eşdeğer seri reaktanslarla ifade edilir. Seri direnç ve şönt admintanslar ihmal edilir.
- Senkron makineler alt geçici reaktans ve sabit gerilim kaynağı ile ifade edilirler. Rotor direnci, çıkıntı ve doyma ihmal edilir.
- Statik yük empedansları ihmal edilir.
- İndüksiyon motorları 40 kW'tan daha düşükse ihmal edilir. Daha büyük değerler için senkron makineleri benzer şekilde modellenir. Bu kabuller hesaplamaları basitleştirmek amacıyla yapılır. Gerçek zamanlı uygulamalarda bu varsayımlar geçersizdir (Glover vd., 2008: 389).

### 3.4. Bara Empedans Matrisi

Güç sistemi modellenirken tüm dirençler, şönt admintanslar ve döner olmayan empedans yükler ihmal edilir. Arıza öncesi akımlarda ihmal edilmektedir. Ayrıca matematiksel ve sistem analizini sadeleştirilerek basit bir şekilde kullanılmaktadır. Güç sisteminde herhangi (n barası) bir barada meydana gelen üç faz kısa devre göz önüne alınacak olursa süperpozisyon yöntemi ile analiz edilebilir.

Güç sisteminin empedans matrisi elde edebilmek için öncelikli olarak sistemin admintans matrisi elde edilir. Daha sonra elde edilen bara admintansı ters çevrilerek empedans matrisi elde edilir.



**Şekil 3.4.** Güç sisteminde üç faz kısa devrede süperpozisyonun uygulanması

Bir nolu devre için düğüm gerilimi;

$$Y_{\text{BARA}} \cdot V^{(1)} = I^{(1)} \quad (3.14)$$

$$Z_{\text{BARA}} = Y_{\text{BARA}}^{-1} \text{ ise}$$

$$Y_{\text{BARA}} \cdot I^{(1)} = V^{(1)} \quad (3.15)$$

1 nolu devre sadece arızalı bara n'de bulunan bir kaynak içerdiğinden akım kaynağı vektörü  $I_n^{(1)} = -I''_{fn}$  ile gösterilen ve sıfır olmayan tek elemana sahiptir. Arızalı bara n'deki gerilim değeri 1 nolu devreye göre  $E_n^{(1)} = -V_f$  kadardır.

N kadar barılı bir sistemde n barasında arıza oluştuğunda;

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} & \dots & Z_{nN} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{Nn} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ -I''_{fn} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^{(1)} \\ V_2^{(2)} \\ \vdots \\ \vdots \\ -V_f \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

n: Arızalı bara

N: Bara sayısı

$Z_{nn}$ : Arıza empedansı

$$V_n^{(1)} = -V_f$$

$I''_{fn}$ : Arızalı baradan geçen akım

Alt geçici arıza akımı ise;

$$I''_{fn} = \frac{-V_f}{Z_{nn}} \quad (3.17)$$

1 nolu devrede herhangi k barasında meydana gelen gerilim;

$$V_k^{(1)} = Z_{kn}(-I''_{fn}) = \frac{-Z_{kn}}{Z_{nn}} \cdot V_f \quad (3.18)$$

2 nolu devre arıza öncesi akımları göstermektedir. Arıza öncesi yük akımı ihmal edilerek 2. devre boyunca tüm gerilimler arıza öncesi gerilime eşit olur. Genel olarak “k” barası için  $V_k^{(2)} = V_f$  olur, 1. ve 2. devreye göre;

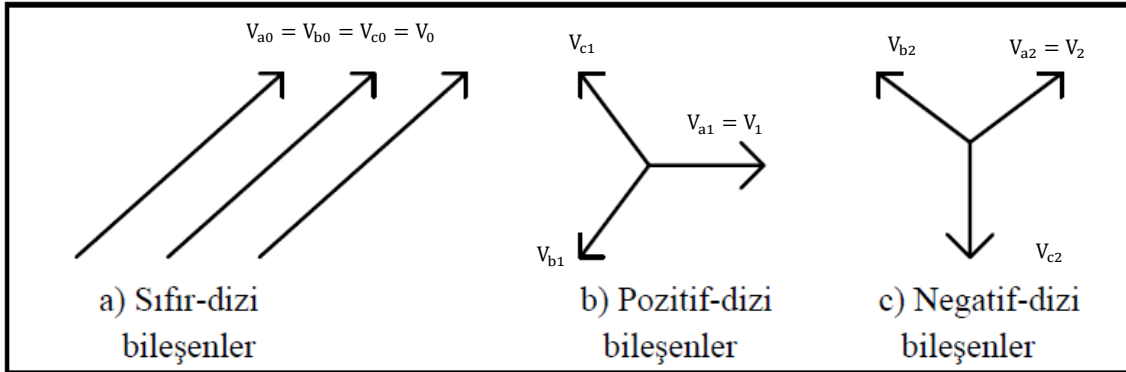
$$V_k = V_k^{(1)} + V_k^{(2)} = \frac{-Z_{kn}}{Z_{nn}} \cdot V_f + V_f \quad (3.19)$$

k=1,2,3.....N için herhangi bir “k” barasındaki arıza gerilim değerleridir.

### 3.5. Simetrik Bileşenler

Üç fazlı bir sistemde her bir hat için  $V_a, V_b$  ve  $V_c$  olarak tanımlanan hat gerilimleri için fazör takımının Fortescue’ya göre hat gerilimlerinin fazörleri üç ayrı bileşen sistemine tasfiye edilir.

1. Sıfır-dizi bileşen sistemi, birbirleri içerisinde faz farkı olmayan büyüklükleri aynı Şekil 3.5 (a)’da verilen üç fazörden meydana gelir.
2. Pozitif-dizi bileşeni sisteminde ise, birbirleri içerisinde  $\pm 120^\circ$  faz farkına sahip özgün sistemle aynı dizi büyüklükleri Şekil 3.5 (b)’de gösterilen üç fazörden meydana gelir.
3. Negatif-dizi bileşen sisteminde, birbirleri içerisinde  $\pm 120^\circ$  faz farkına sahip özgün sistemle ters dizi büyüklükleri aynı Şekil 3.5 (c)’de verilen üç fazörden meydana gelir (Grainger vd., 1994: 417).



Şekil 3.5. Dengesiz fazör sisteminin üç ayrı simetrik bileşen sisteminin tasfiyesi

Üç fazlı sistemin sadece A fazına ait sıfır, pozitif ve negatif dizi bileşenlere ait sırasıyla  $V_{a0}, V_{a1}$  ve  $V_{a2}$  fazörleri analiz edilecektir. Daha sade ve basit bir yöntem ile “a” indisini göz ardı edilerek belirlenen bileşenleri  $V_0, V_1$  ve  $V_2$  olarak alınacaktır. Bu bileşenler ise 3.20 eşitliği ile dönüştürülerek tanımlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

3.20 eşitliği ise ayrı ayrı eşitlik olarak belirtilirse;

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (3.21)$$

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \quad (3.22)$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \quad (3.23)$$

Birim genlikli olan ve  $120^\circ$ 'lik faz açısına sahip olan "a" indisi kompleks olan bir sayıdır. Şayet herhangi bir fazör "a" indisi ile çarpıldığı zaman bu fazör  $120^\circ$  saat yönünün tersi yönde döner. Eşitlik 3.20 'de matris ifadeleri ile  $V_P$  ve  $V_S$  vektörleri ile A matrisini alt kısımda belirtilmiştir.

$$[V_P] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$[V_S] = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$V_P$ : Kolon vektörünün faz gerilimleri

$V_S$ : Kolon vektörünün bileşen gerilimlerini verir

A:  $3 \times 3$  dönüşüm matrisi

verilen ifadeler kullanılarak 3.20'de verilen matris denklemi alt kısımda verilen şekilde ifade edilebilir.

$$V_P = A V_S \quad \text{Olur.} \quad (3.27)$$

A matrisinin tersi alınır;

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

olarak bulunur.

Matematiksel olarak bir matrisi tersiyle çarptığımız zaman birim matrisi elde edilir. Bu nedenle eşitlik 3.27'de eşitliğinin her iki yanını  $[A^{-1}]$  ile çarpıldığında elde edilen eşitliğin ifadesi ise alt kısımda belirtilen 3.29'daki gibi olacaktır.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

3.29 eşitliğindeki matristen üç farklı denklem yazılabilir.

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (3.30)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.31)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (3.32)$$

Eşitlik 3.30'da dengeli üç fazlı bir sistemde dengeli fazörlerin toplam sıfıra eşit olacağından sıfır dizi bileşen geriliminin mevcut olmayacağını ifade eder. Dengesiz olan üç fazlı bir sistemde ise faz-toprak gerilimlerin sıfır dizi bileşeni olabilir. Fakat faz-faz gerilimlerinin hiçbir zaman sıfır dizi bileşeni olmaz. Aynı şekilde simetrik bileşen dönüşüm işlemleri bir sistemin bileşen gerilimlerine uygulandığı gibi akım fazörlerine de uygulanabilir. Bu eşitlikler ise alt kısımda belirtildiği gibi yazılabilir.

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.33)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (3.34)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (3.35)$$

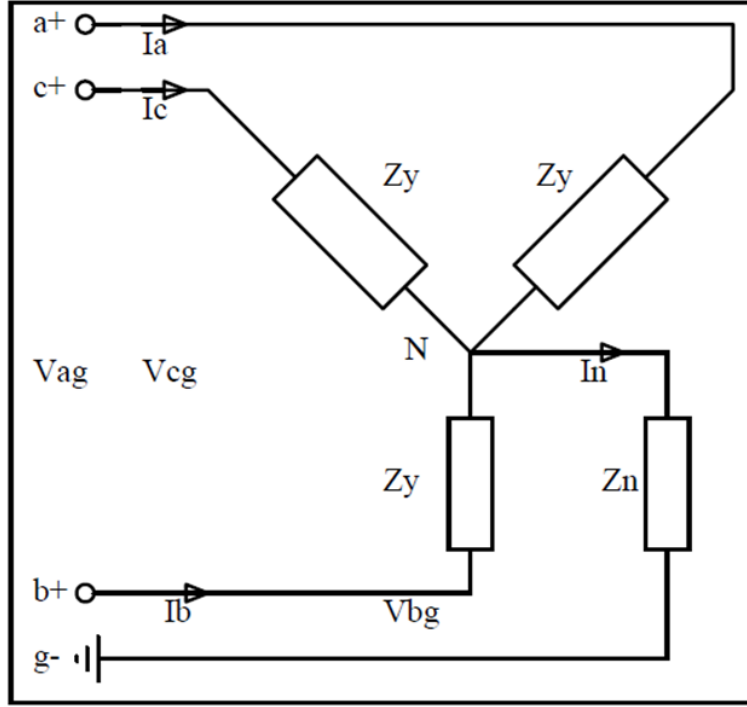
Yıldız bağlantının yapıldığı bir sistemde, nötr akımı  $I_n$  ile adlandırılan hat akımlarının toplamına eşit olur.

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (3.36)$$

3.36'daki eşitlikten yıldız noktasının nötr akımı sistemdeki sıfır bileşen akımının değerinin üç katı olmaktadır. Dengede olan üç fazlı bir sistemde nötr noktadan akım geçmediğinden dolayı nötr akımı sıfır olur. Aynı şekilde üçgen bağlı olan bir sistemde veya yıldız bağlı olan bir sistemin nötr noktası topraklanmamış ise bu tür sistemler için sıfır bileşeni olmamaktadır (Glover vd., 2008: 428).

### 3.6. Empedans Yüklerin Bileşen Devreleri

Şekil 3.6'da verilen yıldız bağlı dengeli yükün empedansı gösterilmiştir. Her faza ait empedans “ $Z_y$ ” ile ifade edilmiştir. Nötr hattına ait empedans ise “ $Z_n$ ” ile ifade edilerek yükün nötr noktası (yıldız noktası) ile toprak arasına bağlantı sağlanmıştır. Dengeli ve yıldız bağlı olan yükün her bir fazı için faz-toprak gerilim değerleri ise;



Şekil 3.6. Dengeli yıldız bağlı empedans yükü

$$V_{ag} = (Z_y + Z_n)I_a + Z_n I_b + Z_n I_c \quad (3.37)$$

$$V_{bg} = (Z_y + Z_n)I_b + Z_n I_a + Z_n I_c \quad (3.38)$$

$$V_{cg} = (Z_y + Z_n)I_c + Z_n I_a + Z_n I_b \quad (3.39)$$

Hat gerilimleri ile hat akımları arasındaki bağıntıların denklemleri bu şekilde yazılabilir.

Bu eşitlikleri matrisel bir biçimde ifade edilerek tekrar düzenlenebilir. Eşitlik 3.37, 3.38 ve 3.39 eşitliklerinin matrisel olarak yazılımı ise;

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_y + Z_n) & Z_n & Z_n \\ Z_n & (Z_y + Z_n) & Z_n \\ Z_n & Z_n & (Z_y + Z_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Bişiminde gösterilebilir. 3.40 ifadesinin sade hali ise alt kısımda belirtilen 3.41 eşitliği ile yazılabilir.

$$V_p = Z_p I_p \quad (3.41)$$

$V_p$ : Faz-toprak gerilimlerinin vektörü

$I_p$ : Hat akımlarının vektörü

$Z_p$ : 3×3 faz empedans matrisi (3.40' da verilen matris)

Denklem 3.41 ait olan simetrik bileşenlerine ait gerilim ve akım vektörleri ile belirttiğimizde alt kısımda belirtilen 3.42 eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin matematiksel olarak elde edilmesi 3.27 eşitliği ve akım fazörleri arasındaki ilişki gibi ifade edilebilir:

$$A V_S = Z_p A I_S \quad (3.42)$$

Eşitlik 3.42'nin her iki yanını  $A^{-1}$  ifadesi ile çarpılırsa;

$$V_S = (A^{-1}Z_P A) I_S \quad (3.43)$$

Ya da,

$$V_S = Z_S I_S \quad (3.44)$$

bulunur. Burada,

$$Z_S = A^{-1}Z_P A \quad (3.45)$$

olarak tanımlanır. Nihai olarak dengeli sistemin empedans matrisine ait açık ifadesi alt kısımdaki gibi yazılabilir:

$$[Z_S] = \begin{bmatrix} (Z_y + 3Z_n) & 0 & 0 \\ 0 & Z_y & 0 \\ 0 & 0 & Z_y \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

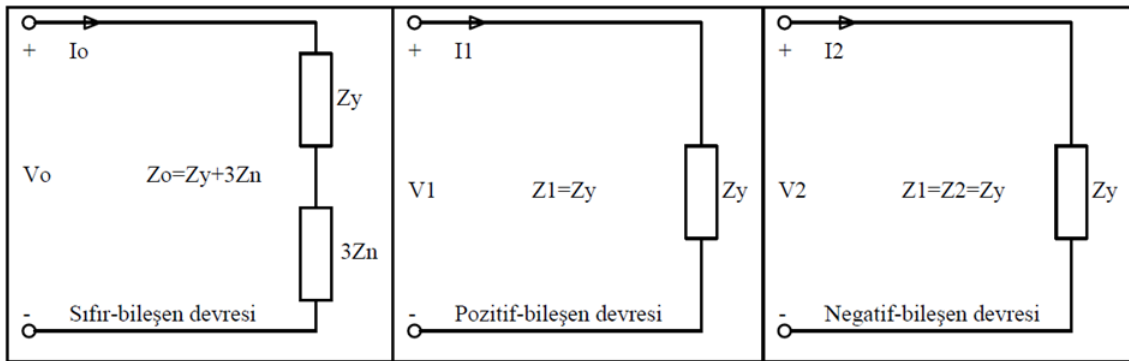
Denklem 3.46 ifadesinden üç fazlı dengede olan ve yıldız bağlı bir sistemin simetrik bileşenlerin devresinde empedans matrisi diyagonal bir matristir. Matrisin diyagonal olması, dengeli üç fazlı yıldız bağlı sistemin pozitif, negatif ve sıfır bileşen devreleri birbirlerinden bağımsız ve diğer iki devre ile ayrıdır. Dengeli üç fazlı yıldız bağlı olan yükün bileşen devrelerinin pozitif, negatif ve sıfır bileşen devrelerinin hat gerilimlerinin birbirinden bağımsız olarak ifade edilerek yazılabilir (Erim, 2015: 44).

$$V_0 = (Z_y + 3Z_n)I_0 = Z_0I_0 \quad (3.47)$$

$$V_1 = Z_yI_1 = Z_0I_0 \quad (3.48)$$

$$V_2 = Z_yI_2 = Z_2I_2 \quad (3.49)$$

Üç fazlı dengeli olan yüke ait bileşen devrelerinin hat gerilimleri bu eşitlikler ile ifade edilebilir. Bu eşitliklere ait eşdeğer devre modelleri ise Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



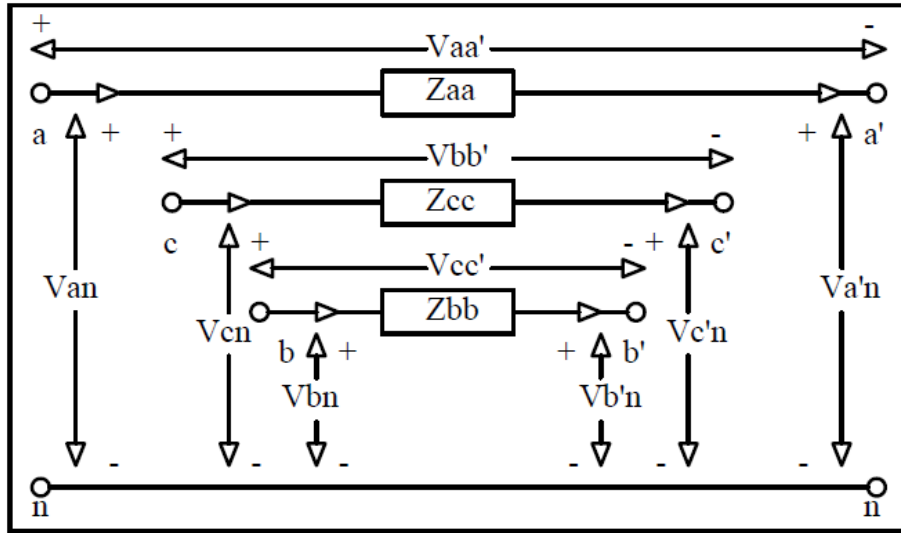
**Şekil 3.7.** Üç fazlı dengeli yıldız bağlı bir yükün bileşen devreleri

Yüke ait olan bileşen devreleri birbirlerinden bağımsızdırlar. Pozitif ve negatif bileşen devrelerinde nötr empedansı olmayıp, sadece sıfır bileşen devresinde mevcuttur. Bu ifade ile pozitif ve negatif devrelerine ait akımlarının nötr empedansından akmadığı ifade edilebilir.

Üç fazlı dengeli üçgen bağlı olan herhangi bir yükün nötr noktası olmadığından dolayı yıldız bağlı olan sıfır bileşen devresinin nötr noktası açık devre olur. Bu nedenle üçgen bağlı olan yükün sıfır bileşen devresine ait empedans  $Z_0 = \infty$  olur. Pozitif ve negatif bileşen devrelerine ait empedans değerleri ise yıldız bağlı olan yüke ait empedans değerinin  $Z_y = \frac{Z_{\Delta}}{3}$  üç katı olur (Glover vd., 2008: 433).

### 3.7. Seri Empedansların Bileşen Devreleri

Şekil 3.8’de verilen üç fazlı seri empedansların bileşenlerini göstermektedir. Genellikle bu empedanslar enerji nakil hatlarına ait olan simetrik bileşen devrelerini ait eş değer devre olarak gösterilir. Üç fazlı seri olan fazların kendine ait özgü empedansa sahiptirler. Şekil 3.8’de verilen diyagramda  $Z_{aa}$ ,  $Z_{cc}$  ve  $Z_{bb}$  olarak belirtilenler her faza özgü olan empedansları ifade eder. Ayrıca her fazın birbirleri arasında karşılıklı olarak empedans değeri de olabilir.



Şekil 3.8. Üç fazlı bir sistemin seri empedansları

Üç fazlı sistemin her faza ait özgü empedans değerine sahip olmasından dolayı seri olan her fazın empedans değerine bağlı olarak gerilim düşümü olacaktır. Bu gerilim düşümü ise Şekil 3.8. üzerinde belirtilen  $V_a$ ,  $V_{a'}$ ,  $V_c$ ,  $V_{c'}$  ve  $V_b$ ,  $V_{b'}$  olarak ifade edilmiştir. Her faza ait olan gerilim, akım ve empedans değerlerine bağlı olarak gerilim düşümü matematiksel olarak matrisel form şeklinde 3.49 eşitliği ile elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_{an} - V_{a'n} \\ V_{bn} - V_{b'n} \\ V_{cn} - V_{c'n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Her faza ait gerilim düşümleri arasındaki bağıntı olarak verilebilir.

Enerji nakil hatlarında kullanılan iletim hatları ile transformatörlere ait seri empedansları olduğundan bunlara ait eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_p - V_{p'} = Z_p I_p \quad (3.50)$$

$V_p$ : Bara abc parametreleri için faz-nötr gerilim vektörü

$V_{p'}$ : Bara a'b'c' parametreleri için faz-nötr gerilim vektörü

$I_p$ : Hat akım vektörü

$Z_p$ : Seri devrede 3×3 faz empedans matrisi

3.49'da verilen eşitlikte matris doğrultusunda, bileşen empedans matrisi  $Z_s$  alt kısımda tanımlanan şartlarda diyagonal matristir.

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$$

$$V_e$$

$$Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc}$$

$Z_p$  faz empedans empedans matrisinin elemanları birbirine eşit öz empedanslar ve birbirine eşit karşılıklı empedanslardan oluşan eşitlik;

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

olarak yazılır.

Eşitlik 3.51'de simetrik bileşen değerlerinin eşitliği ise;

$$Z_0 = Z_{aa} + 2Z_{ab}$$

$$V_e$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_{aa} - Z_{ab}$$

olur.

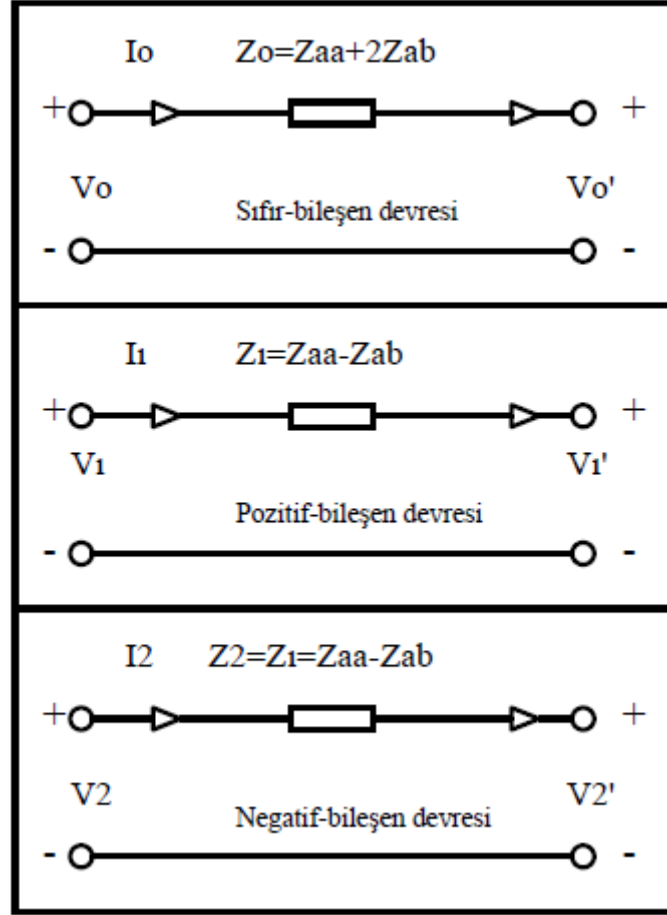
Üç fazlı simetrik olan seri empedansların bileşen devresindeki gerilim, akım ve empedansları arasındaki bağıntı ise eşitlik 3.50'de bağıntı ile birbirinden bağımsız olarak farklı üç eşitlik ile ifade edilerek yazılabilir.

$$V_0 - V_{0'} = Z_0 I_0 \quad (3.52)$$

$$V_1 - V_{1'} = Z_1 I_1 \quad (3.53)$$

$$V_2 - V_{2'} = Z_2 I_2 \quad (3.54)$$

eşitlik 3.52, 3.53 ve 3.54 verilen ifadelerin birbirinden bağımsız olan üç bileşen için ifadelerin seri empedans devresi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

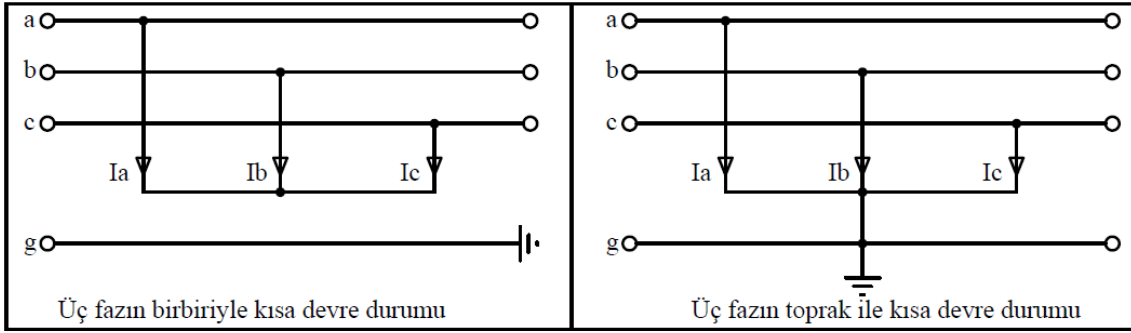


Şekil 3.9. Üç fazlı simetrik seri empedansların bileşen devreleri

Her bir sıfır-bileşen, pozitif-bileşen ve negatif-bileşenlerine ait gerilim düşümü meydana gelmektedir. Fakat sisteme ait seri empedanslar simetrik değilse  $Z_s$  diyagonal olmayacak ve bileşen devreleri ise birbirinden bağımsız olmayacaktır. Bu sebeple bileşen devrelerine ait gerilim düşümü ise her bir faza ait olan akımın değerine bağlı olacaktır.

### 3.8. Güç Sisteminde Üç Faz Kısa Devre Durumu

Güç sistemlerinde meydana gelen üç faz kısa devre durumu simetrik arıza türüdür. Arızanın toprak ile direkt temas etmesiyle veya direnç üzerinden akımın akmasında hata akımını etkilememektedir. Güç sisteminde ise hata akımının en yüksek olduğu durum olmasından dolayı sistemi korumak veya arıza esnasında sistem üzerinde kalıcı hasarların oluşumunu engellemek için koruyucu elemanlar ve kesici değerleri üç faz kısa devre durumuna göre seçilir.

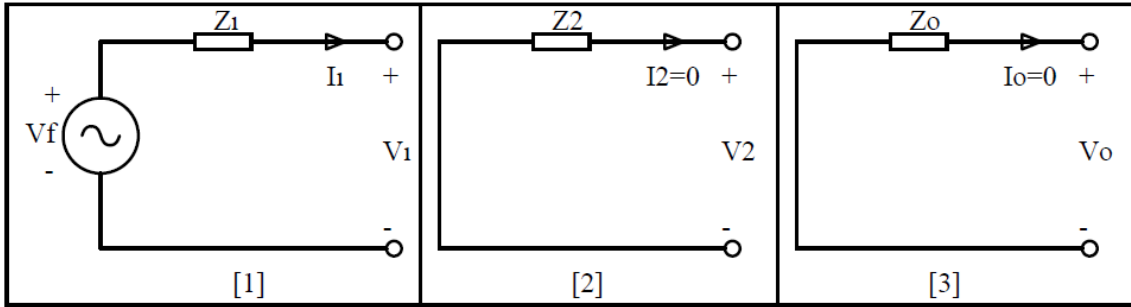


**Şekil 3.10.** Simetrik üç faz kısa devre durumları

Üç faz kısa devre simetrik arıza durumunda her bir faza ait gerilim değeri  $V_a = V_b = V_c = 0$  olacaktır. Her bir faza ait bileşen devrelerinin ait gerilim değerleri ise  $3 \times 3$  dönüşüm matrisinin tersi alınarak her bir bileşen devresine ait gerilim değerleri eşitlik 3.55 ile matrisel olarak yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Üç fazlı simetrik kısa devre analizin sıfır-bileşen, pozitif-bileşen ve negatif-bileşenlerine ait eşdeğer devre modelleri Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.11.** Bileşen devrelerinin Thevenin eşdeğer devreleri

Simetrik üç faz kısa devre durumunda sıfır-bileşen devresi ile negatif-bileşen devresinde akımları sıfırdır. Bu durumda her faza ait akım, gerilim ve empedansları arasındaki ilişki faz akım, gerilim ve empedans matrisleri ile eşitlik 3.56 ile matrisel olarak yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Simetrik üç faz kısa devre arıza durumunda sıfır-bileşen ile negatif-bileşen devresinde akım sıfır olacağından dolayı kısaca pozitif-bileşen devresine ait kısa devre akımı ise eşitlik 3.57 ile ifade edilebilir.

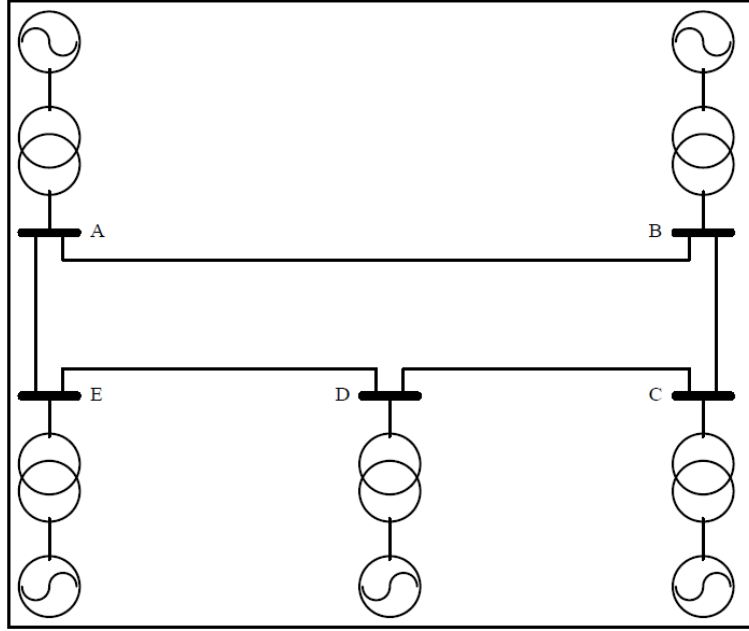
$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1} \quad (3.57)$$

$V_f$ : Anma gerilim

Güç sisteminde simetrik arıza türü olan üç faz kısa devre durumu genel anlamda bu şekilde ele alınabilir. Bu durumu örnek bir uygulama üzerinde analiz ederek ele alalım.

### Problem

Şekil 3.12’de sistemin anma gerilimi 154 kV’ tur. Tüm generatörler ve tüm transformatörler için 100 MVA güçteki reaktans değerleri, sırasıyla 0.5 pu ve 0.2 pu’dur. Hat parçalarının reaktansları ise 50 ohm’ dur. A barasında meydana gelecek simetrik kısa devrede, arıza akımını ve gücü hesaplayınız (Güney vd., 2001: 227).



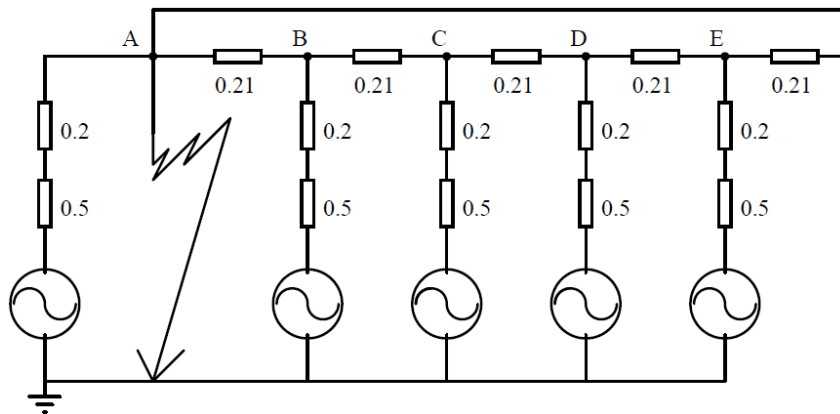
Şekil 3.12. Örnek güç sistemi

### Çözüm

P.u. türünden baz değere göre iletim hatlarına ait reaktanslar;

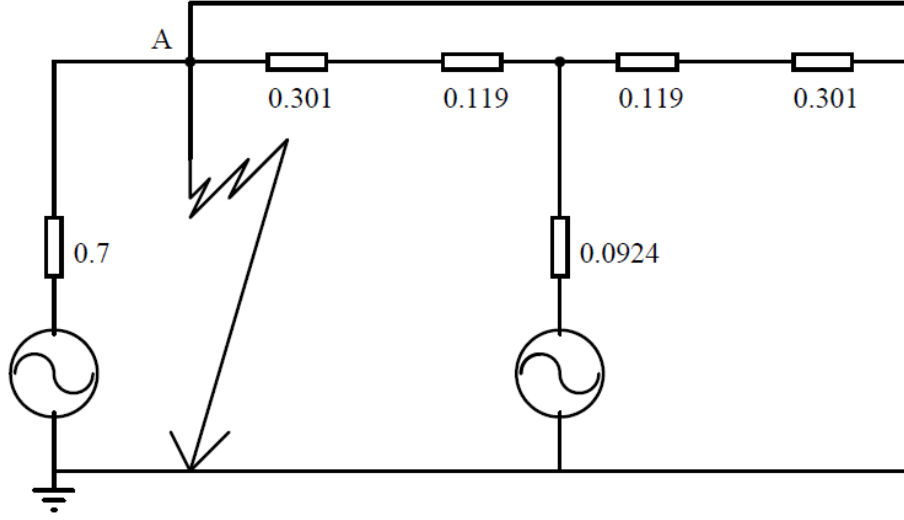
$$X_{\text{HAT}} = 50 \times \frac{100}{154^2} = 0.21 \text{ pu}$$

Hesapladıktan sonra, güç sistemine ait doğru bileşen eşdeğer devresi çıkarımı ise Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Örnek güç sisteminin reaktans devresi

Üçgen bağlantı oluşturan gözler, yıldız-üçgen dönüşümüyle yıldız bağlantıya dönüştürüldüğünde ve seri reaktansların toplanmasıyla reaktans devresinin sadeleştirilmesiyle;



Şekil 3.14. Örnek güç sisteminin reaktans devresinin sadeleştirilmesi

Reaktans devresinin sadeleştirme işlemim ara işlemler olarak yıldız üçgen dönüşüm işlemleri yapılarak; birinci göze ait yıldız bağlantı reaktansları 0.091, 0.091 ve 0.304 p.u'tir. İkinci göz için ise 0.119, 0.119 ve 0.0924 p.u'tir.

Arıza noktasından bakıldığında devreye ait eşdeğer reaktans değeri ise;

$$X_{eş} = \frac{0.7 \left( \frac{0.42}{2} + 0.0924 \right)}{0.7 + \left( \frac{0.42}{2} + 0.0924 \right)} = 0.211 \text{ pu bulunur.}$$

Arıza akımı;

$$I_{\text{kısa devre}} = \frac{1}{X_{eş}} = \frac{1}{0.211} = 4.739 \text{ pu}$$

Baz güç 100MVA alındığında baz akım;

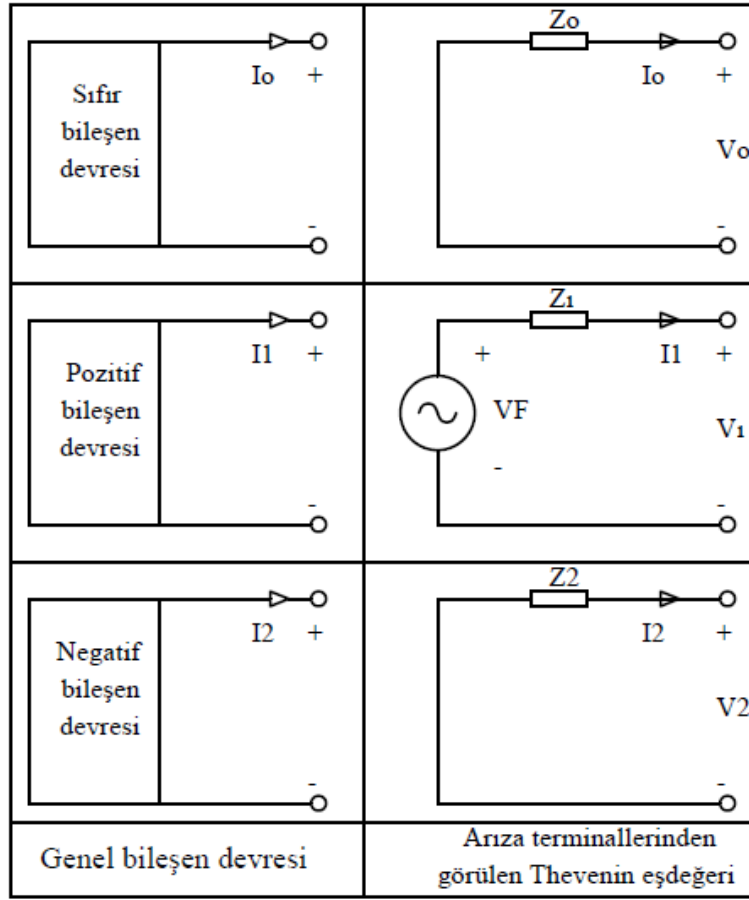
$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 154} = 375,4 \text{ A}$$

$$S_B = 4.739 \times 100 \cong 474 \text{ MVA}$$

Değerleri elde edilir. Üç faz kısa devre durumunda kesici değeri bu duruma göre seçilir. Kesici seçiminde ise atanacak olan kesici değeri, kısa devre akımından büyük olacak şekilde en yakın değer seçilir.



Güç sisteminin teorik olarak arıza analizi yapılırken sisteme ait herhangi bir faz-toprak, herhangi iki-fazın birbiri ile kısa devre veya üç fazın birbiri ile veya toprak ile kısa devre edilmesiyle güç sistemi arızasının tipine göre analiz edilir. Bu analiz ise güç sisteminde oluşabilecek arıza tipi senaryoları önceden hesaplanmasıyla sistem tasarımının nasıl olması ve sistemde kullanılacak olan teçhizatın değerlerinin seçilmesiyle sistemin model ve planlanması gerçekleştirilir. Daha sonra planlanan güç sistemi için sahada montaj işlemleri gerçekleştirilir. Güç sistemine ait olan arıza terminalleri uçlarında görülen genel bileşen devreleri ve Thevenin eşdeğer devreleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Dengeli bir sistemde genel üç fazlı bara bileşen devreleri

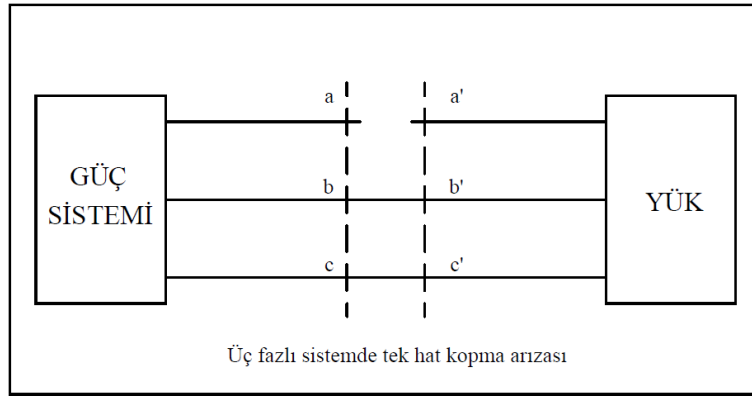
#### 4.1. Güç Sisteminde Hat Kopma Arıza Durumu

Güç sistemlerinde meydana gelen arızalardan bir diğer arıza türü ise hat kopma arızasıdır. Bu arıza türü ise daha çok mekanik darbeler ile iklim koşullardan kaynaklı oluşan arıza türüdür. Bu arıza türünde ise genellikle bir veya iki hattın kopması durumları meydana gelmektedir. Bu sebeple hat kopması arızası sistem üzerindeki yük akışından dolayı yük akımları ihmal edilemezler.

Güç sisteminde ise hat kopması arızasında hat üzerindeki yük akımları dengeli olarak kabul edilmesiyle güç sisteminin yük akışı ve analizi gerçekleştirilmektedir. Güç sisteminde ise üç faz dengeli sistem olmasından dolayı sistem üzerinde herhangi bir veya iki hattın kopması durumları oluşabilmektedir.

#### 4.1.1. Güç sisteminde tek hat kopma arıza durumu

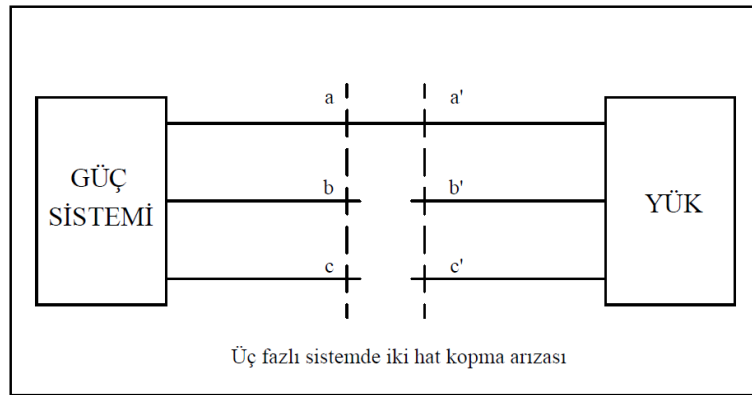
Güç sisteminin üç dengeli bir sistem olmasından dolayı herhangi bir hattın kopması söz konusu olabilir. Sisteme ait olan “a” fazının kopması durumunda gerilim ölçümü hat boyunca ölçülmesi gerekmektedir. Bu ölçüm ise hattın koptuğu nokta ile hat sonu (a-a’) noktaları boyunca ölçülür. Şekilde ifade edilen “a” fazına ait sınır şartları ise  $I_a = V_{ab} = V_{ac} = 0$  olur.



Şekil 4.3. Tek hat kopma arızası

#### 4.1.2. Güç sisteminde iki hat kopma arıza durumu

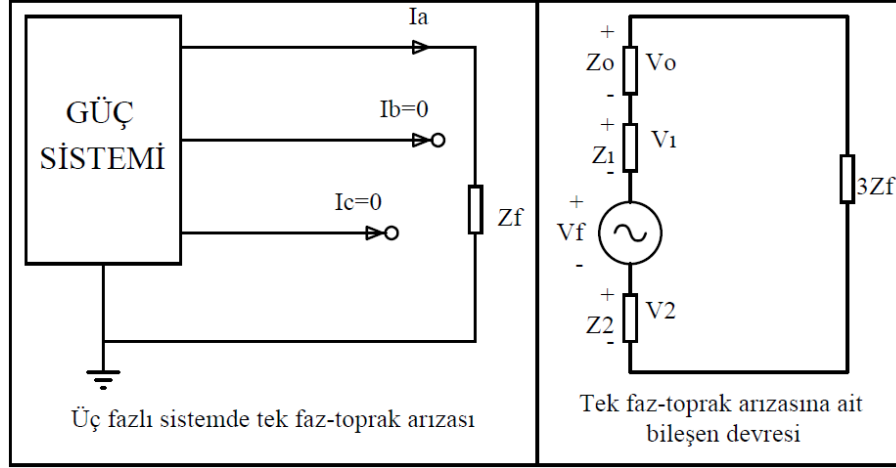
Tek hat kopmasında olduğu gibi güç sisteminin üç faz dengeli sistem olmasından dolayı sistemde herhangi iki hattın aynı anda kopması söz konusu olabilir. Bu sebeple şekilde ifade edilen “b” ve “c” hatların kopması durumunda enerjinin kesildiği tarafta hatlara ait sınır koşulları  $V_{ac} = V_{ab} = 0$  ve  $I_b = I_c = 0$  olacaktır. Aynı şekilde “b” ve “c” fazları ile nötr noktası ile gerilim değeri de sıfır eşit olacaktır.



Şekil 4.4. İki hat kopma arızası

## 4.2. Güç Sisteminde Tek Faz-Toprak Arıza Durumu

Genel üç fazlı bir sistemin dengeli veya dengede olmaması halinde tek faz-toprak arızasında üç bileşen devresi de birbirine seri bağlanır. Şekil 4.5'te verilen üç fazlı baranın "a" fazına ait tek faz-toprak arızası olduğu varsayımı yapılmıştır.



Şekil 4.5. Tek faz-toprak kısa devre arızası

Doğrudan kısa devre durumunda ise  $Z_f = 0$ , ark üzerinde ise kısa devre durumunda  $Z_f$  ark empedansına eşit olur. İletim hattı izolatörü üzerinden yüzeysel atlamada  $Z_f$  empedansı, ark empedansı ise topraklama direnci ve iletim direği empedansı ile hat toprağı arasındaki toplam empedansından oluşur. Ark empedansı o an için verilen gerilim ile geçen kısa devre akımı ile hesaplanır. Güç sisteminde tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde arıza koşulları;

$$V_{ag} = I_a Z_f \quad (4.1)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (4.2)$$

Eşitlikleri yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$V_a = V_0 + V_1 + V_2$  ve  $I_a = I_0 + I_1 + I_2$  bileşen devreleri arıza koşullarında;

$$V_f = Z_f I_a \quad (4.4)$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = Z_f (I_0 + I_1 + I_2) \quad (4.5)$$

Tek faz-toprak arızası için simetrik bileşen arıza koşulları Şekil 4.5'te tek faz-toprak arızasına ait bileşen devresinin analizinden arıza akımlarının bileşenleri eşitlik 4.6'daki gibi yazılabilirler.

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (4.6)$$

Faz akımına ait eşitlik yazılacak olursa;

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{3V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (4.7)$$

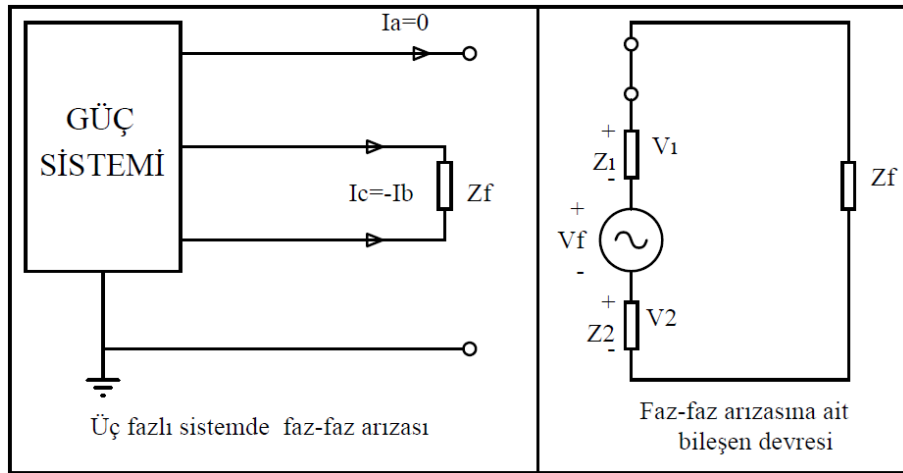
Güç sistemin arızanın meydana geldiği noktada tek faz-toprak arızasına ait gerilimlerine ait bileşenleri matrisel olarak eşitlik 4.7'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

İfadesi ile hesaplanabilir. Gerilimler faz bölgesine dönüştürülerek arıza noktasındaki faz-toprak gerilimleri elde edilir. Güç sisteminde "a" fazı faz-toprak arızası varsayımı ile ele alınarak işlemler yapılmıştır. Aynı şekilde bu işlemler "b" ve "c" fazlarına ait faz-toprak arızasını tekrarlayarak analiz yapılabilir.

### 4.3. Güç Sisteminde Faz-Faz Arıza Durumu

Üç fazlı bir sistemde herhangi iki fazın birbiri arasında veya ark empedansı ile direkt olarak kısa devre olmasıyla meydana gelen arıza türüdür. Üç fazlı sisteme ait faz-faz arıza durumları a-b, a-c ve b-c fazlarının birbirleri arasında faz-faz kısa devre durumu olabilir. Üç fazlı sisteme ait b fazı ile c fazının birbiri ile kısa devre olması varsayımı yapılarak analiz ele alınarak işlem yapılmıştır. Aynı şekilde bu analizler diğer fazlar arasında da yapılabilir.



Şekil 4.6. Faz-faz kısa devre arızası

Üç fazlı sistemde faz-faz arızası meydana geldiğinde arıza koşulları akım, gerilim ve empedans eşitlikleri arasındaki ilişkiler;

$$(I_a = 0), (I_0 = 0) \quad (4.9)$$

$$(I_c = -I_b), (I_2 = -I_1) \quad (4.10)$$

$$(V_{bg} - V_{cg} = Z_f I_b), (V_1 - V_2 = Z_f I_1) \quad (4.11)$$

Faz bölgesine ait eşitliklerin simetrik bileşenler türünden ifade edilirse;

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \\ \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Hat akımlarına ait verilen eşitliklerin benzer halleri gerilimler için de eşitlikler içinde yazılırsa;

$$(V_0 + a^2V_1 + aV_2) - (V_0 + aV_1 + a^2V_2) = Z_f(I_0 + a^2I_1 + aI_2) \quad (4.13)$$

$$V_{bg} - V_{cg} = Z_f(I_0 + a^2I_1 + aI_2) \quad (4.14)$$

$I_0 = 0$  ve  $I_1 = -I_2$ , olduğundan dolayı;

$$V_1 - V_2 = Z_f I_1, \text{ olur.}$$

Bu durumda, faz-faz arası arızası durumunda bileşenler türünden arıza koşulları;

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = -I_2$$

$$V_1 - V_2 = Z_f I_1, \text{ olacaktır.}$$

Şekil 4.4 verilen faz-faz kısa devresinden yararlanarak arıza akımlarının bileşenleri;

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f + Z_2}, \text{ olacaktır.}$$

Faz akımlarını ayacak olursak;

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (4.15)$$

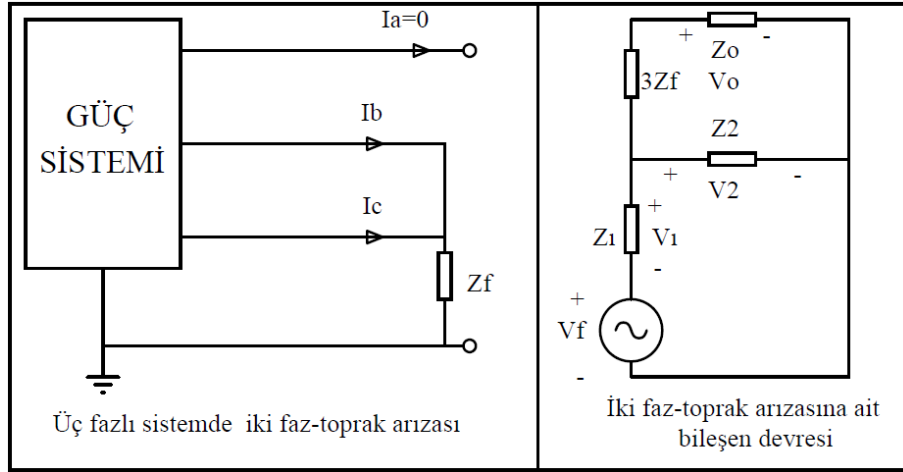
$$I_b = I_0 + a^2I_1 + aI_2 = (a^2 - a)I_1 = -j\sqrt{3}I_1 \quad (4.16)$$

$$I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2 = (a - a^2)I_1 = -I_b = j\sqrt{3}I_1 \quad (4.17)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

#### 4.4. Güç Sisteminde İki Faz-Toprak Arıza Durumu

Üç fazlı bir sistemde sisteme ait olan herhangi iki fazın birbiriyle ve toprak ile kısa devre oluşması sonucu oluşan arıza durumudur. “a” fazında arıza durumunun oluşmadığı, iletim hattında “b” ve “c” hattın birbiriyle ve toprak ile oluşan kısa devre durumu Şekil 4.7 gösterilmiştir. Üç fazlı sisteme ait b fazı ile c fazının birbiri ile kısa devre olması varsayımı yapılarak analiz ele alınarak işlem yapılmıştır. Aynı şekilde bu analizler diğer fazlar arasında da yapılabilir.



**Şekil 4.7.** İki faz-toprak kısa devre arızası

Üç fazlı sistemde faz-faz arızası meydana geldiğinde arıza koşulları akım, gerilim ve empedans eşitlikleri arasındaki ilişkiler;

$$V_{bg} = V_{cg} = Z_f(I_b + I_c) \quad (4.18)$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (4.19)$$

Oluşan bu durumun simetrik bileşenleri ele aldığımız oluşacak olan durum denklemleri eş değeri ifade edecek olursak...

$$V_0 + a^2V_1 + aV_2 = Z_f(I_0 + a^2I_1 + aI_2 + I_0 + aI_1 + a^2I_2) \quad (4.20)$$

$$V_0 - V_1 = 3Z_f I_0 \quad (4.21)$$

b ve c toprak ile olan kısa devre durumunda toprağa karşı oluşacak olan faz gerilimlerinde b ve c fazının gerilimleri eş olacaktır. Oluşan bu arıza tipinden iki faz- toprak kısa devre bileşen devresinde doğru, negatif ve sıfır bileşen akımlarını sonuçları elde edilebilir.

$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1 + \left[ \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \right]} \quad (4.22)$$

$$I_2 = (-I_1) \frac{Z_0 + 3Z_f}{Z_0 + 3Z_f + Z_2} \quad (4.23)$$

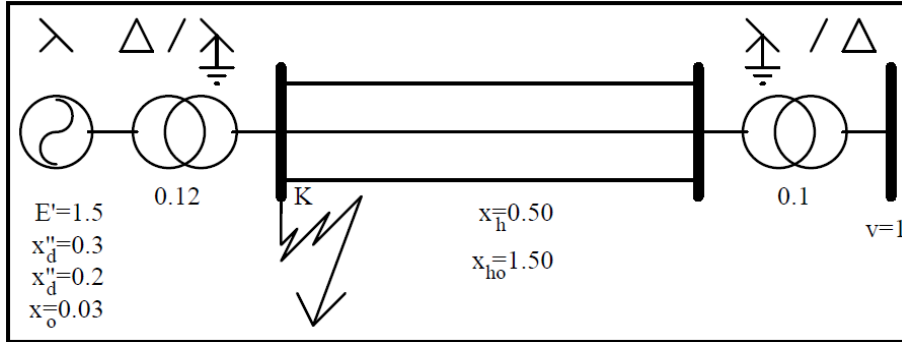
$$I_0 = (-I_1) \frac{Z_2}{Z_0 + 3Z_f + Z_2} \quad (4.24)$$

#### 4.5. Uygulamalı Güç Sistemi

Şekil 4.8'te verilen örnek güç sisteminde K noktasında oluşacak olan arıza durumları olan;

- Üç faz kısa devre durumu
- İki faz kısa devre durumu
- Faz-toprak kısa devre durumu
- İki faz-toprak kısa devre durumu

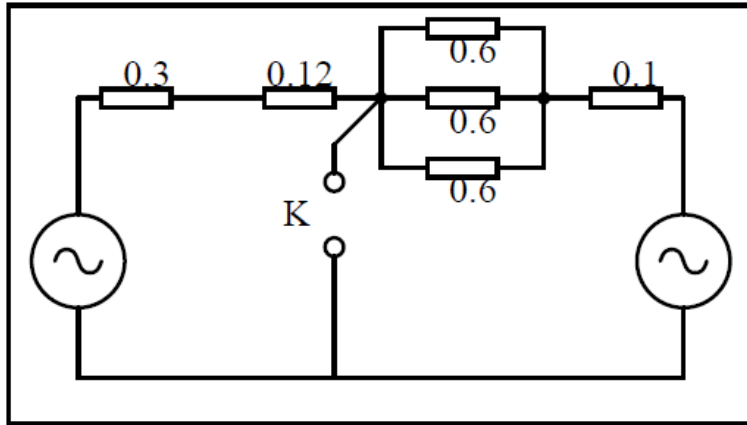
Kısa devre durumları için, geçici işletmede göz önüne alınması gereken güç-açı karakteristiğinin çizilmesi ve *analiz* yapılması (Güney vd., 2001: 261) ; Tüm büyüklükler pu cinsinden verilmiştir.



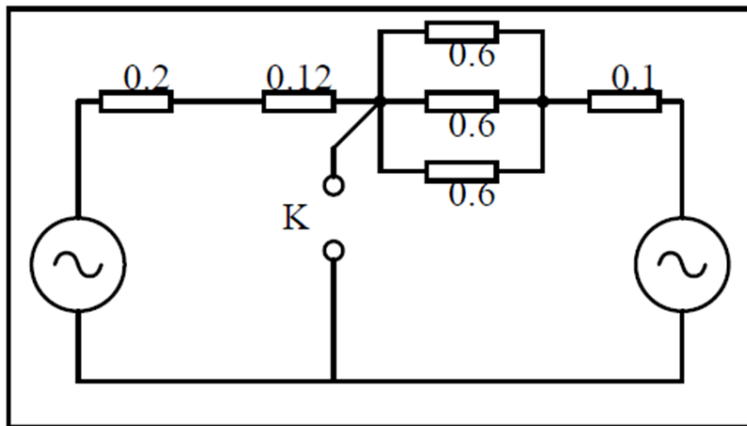
Şekil 4.8. Örnek güç sistemi

### Çözüm

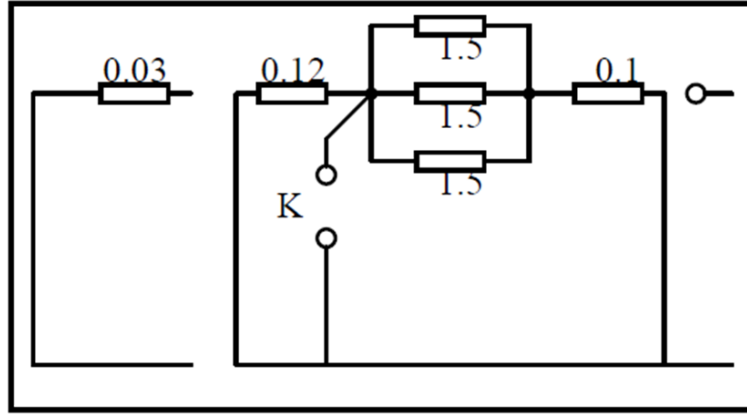
Önce arıza noktasından görülen doğru-ters-sıfır bileşen (eşdeğer) reaktanslarını hesaplamak gerekir.



Şekil 4.9. Doğru bileşen reaktansı



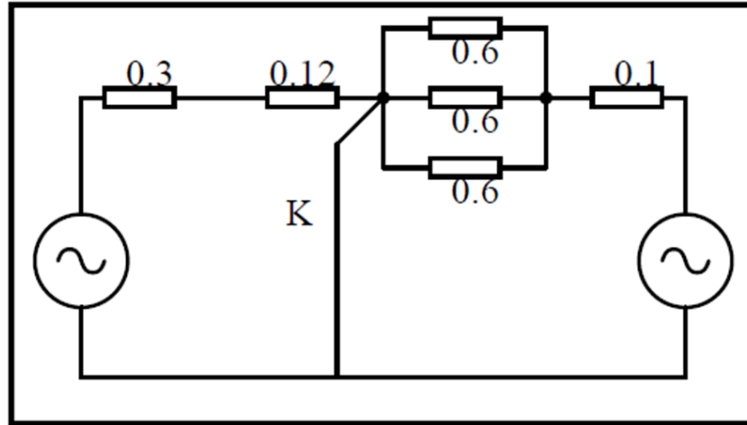
Şekil 4.10. Ters bileşen reaktansı



Şekil 4.11. Sıfır bileşen reaktansı

Dikkat edilirse, generatör ve transformatörlerin toprakla bağlantısı yalnızca sıfır bileşen eşdeğer devresinde göz önüne alınmıştır. Devamlı kısa devre incelemesi yapılmadığı için, doğru bileşen devresinde generatör için  $x_d$  değil,  $x'_d$  kullanılmıştır. Aynı nedenle generatör için  $E$  değil,  $E'$  emk değeri alınacaktır. Artık her arıza için  $x_{12}$  geçiş reaktansları hesap edilir.

a) üç faz arızasında, doğru bileşen eşdeğer devresinde arıza noktası ile toprak arasına bir kısa devre iletkeni bağlanır.



Şekil 4.12. Üç faz kısa devre

$x_d$  geçiş reaktansı, omik bileşenler ihmal edildiğinde göre;

$$x_{12} = x_a + x_b + \frac{x_a \cdot x_b}{x_c}$$

Şeklinde verilebilir.

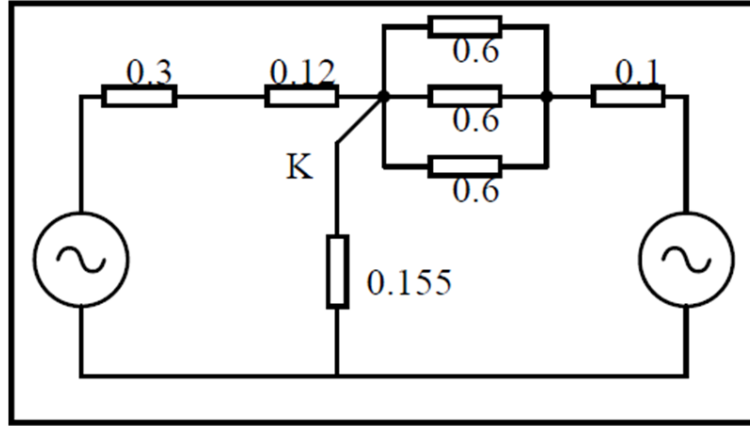
$$x_{12} = (0.3 + 0.12) + \left(\frac{0.6}{3} + 0.1\right) + \frac{0.42 \times 0.3}{0} = \infty$$

O halde;

$$p_{12} = \frac{1.5 \times 1}{\infty} = \sin \delta = 0$$

Bulunur ki, bu durumda güç iletiminin olmadığı anlaşılmaktadır.

b) İki faz arızasında, doğru bileşen eşdeğer devresinde, arıza noktası ile toprak arasına  $x_2$  reaktansı bağlanır.

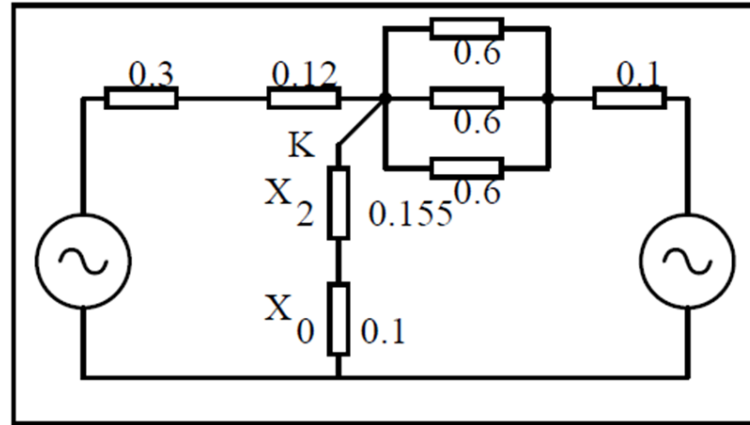


Şekil 4.13. İki faz kısa devre

$$x_{12} = 0.42 + 0.3 + \frac{0.42 \times 0.3}{0.155} = 1.533 \text{ pu}$$

$$p_{12} = \frac{1.5 \times 1}{1.533} \sin \delta = 0.978 \sin \delta \text{ pu}$$

c) Faz toprak arızasında, doğru bileşen eşdeğer devresinde, arıza noktası ile toprak arasında ( $x_0 + x_2$ ) reaktansı bağlanır.

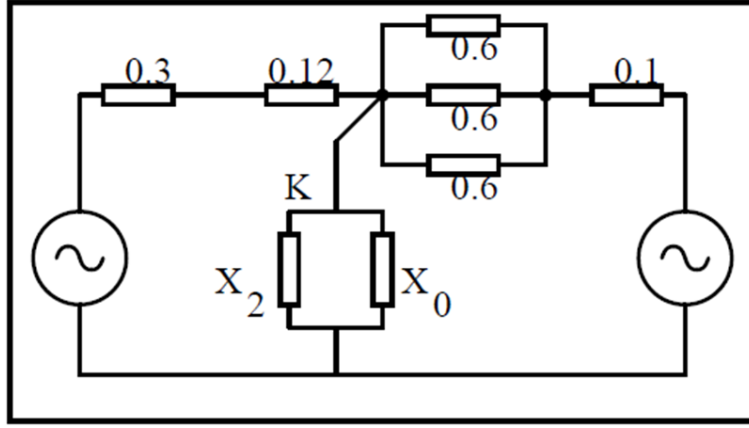


Şekil 4.14. Faz-toprak kısa devre

$$x_{12} = 0.42 + 0.3 + \frac{0.42 \times 0.3}{0.255} = 1.214 \text{ pu}$$

$$p_{12} = \frac{1.5 \times 1}{1.214} \sin \delta = 1.235 \sin \delta \text{ pu}$$

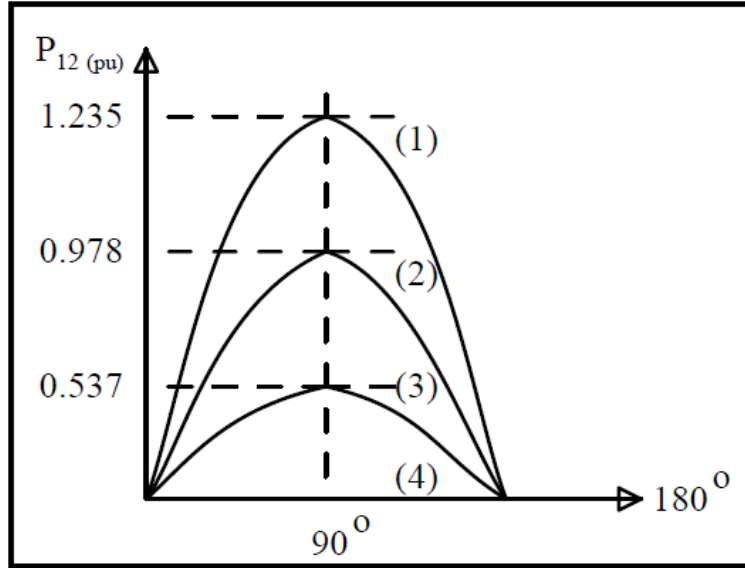
d) İki faz-toprak arızasında, doğru bileşen eşdeğer devresinde, arıza noktası ile toprak arasına ( $x_0 // x_2$ ) reaktansı bağlanır.



Şekil 4.15. İki faz-toprak kısa devre

$$x_{12} = 0.42 + 0.3 + \frac{0.42 \times 0.3}{0.0608} = 2.792 \text{ pu}$$

$$p_{12} = \frac{1.5 \times 1}{2.792} \sin \delta = 0.537 \sin \delta \text{ pu}$$



Şekil 4.16. Çeşitli arıza durumları için güç-açı karakteristikleri

(1): Faz-toprak arızası (2): İki faz arızası (3): İki faz-toprak arızası (4): Üç faz arızası

#### 4.6. Enerji İletim Sistemlerinde Arıza Oluşumuna Neden Olan Faktörler ve Etkenler

Enerji iletim sistemlerinde faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak, üç faz kısa devre ve hat kopması gibi arızaların oluşmasına neden olan bazı faktörler mevcuttur. Bu faktörlere bağlı olarak oluşan arızalar da enerji iletim sistemlerinde istenilmeyen olumsuz durumların meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu durum enerji sürekliliğinin zaman zaman veya belli zaman aralığında sekteye uğratmaktadır. Bu sebeple tüketiciler için enerjiye bağlı üretimin durmasına veya üretimin gecikmesine neden olmaktadır. Bu durum ekonomik kayıpların yaşanmasına neden olmaktadır. Ancak enerji iletim sistemlerinde oluşabilecek olan arızanın önceden

bilinmesi veya oluşabilecek olan arızayı hemen onarılarak yaşanan bu durumu minimize edilmesi önem arz etmektedir. Fakat arızaların oluşumunda birçok faktörün olması bu durumu engellemek çok zor ve maliyetli olabilmektedir. Ancak sistemde oluşabilecek olan arızanın nedenin ne olduğu buna sebep olabilecek etkenlerin neler olduğunu bilmek arıza oluşumuna çözümler sunmak, arızanın oluşmasına önlemek veya oluşabilecek arızanın hızlı müdahale edilmesiyle arıza sistemden izole edilerek enerji sürekliliği sağlanabilir.

#### **4.6.1. Elektriksel etkenlere bağlı olarak oluşan arızalar**

- Statik aşırı gerilim kaynaklı arızalar
- Geçici aşırı gerilim kaynaklı arızalar
- Gerilim değişiminden kaynaklı arızalar
- Yıldırım ve atmosferik deşarj kaynaklı arızalar
- Aşırı yükler ve ısınma etkilerden kaynaklı arızalar
- Sistem frekansının değişmesinden kaynaklı arızalar

#### **4.6.2. Mekanik etkenlere bağlı olarak oluşan arızalar**

- Eğilme, bükülme, kopmalara bağlı arızalar
- Salınım ve titreşime bağlı arızalar
- Kırılma ve delinmelere bağlı arızalar

#### **4.6.3. Çevre ve iklim koşullarına bağlı olarak oluşan arızalar**

- Kar, yağmur, fırtına, dolu, buzlanma bağlı oluşan arızalar
- Deprem, çığ, erozyon, deniz ve nehir taşmasına bağlı oluşan arızalar
- Nem ve sıcaklığa bağlı oluşan arızalar
- Kirlenmeye (kuş göçü, tozlanma, baca dumanları vb.) bağlı oluşan arızalar
- Ağaç devrilmesine bağlı oluşan arızalar (Ertuğrul, 2010: 24)

#### **4.6.4. Malzeme ve montaj kaynaklı oluşan arızalar**

- İletkenlerinin izolasyonun bozulmasına bağlı oluşan arızalar
- İzolatörlerinin zarar görmesi veya delinmesine bağlı oluşan arızalar
- İletkenlerin veya baraların oksitlenmesine bağlı oluşan arızalar
- Teknik elemanın malzeme veya iletken bağlantısının doğru yapmamasından kaynaklı oluşan arızalar
- Koruma (rölelerden kaynaklı) teçhizatlarına bağlı oluşan arızalar
- Malzeme veya teknik uygulamanın uygun yapılmamasından kaynaklı oluşan arızalar

- Ekipman imalat hatası
- Malzeme ve teçhizatın eskimesi

#### **4.6.5. İnsan ve canlı kaynaklı oluşan arızalar**

- Araç sürücülerinin veya iş makinelerinin çarpması sonucunda teçhizatlara zarar vermesi sonucu oluşan arızalar
- Enerji iletim hat yolunda ateş yakılması sonucu ortaya çıkan arızalar
- Yapılan kazı çalışmaları sonucunda ortaya çıkan arızalar
- Operatör tarafından yanlış yapılan manevralar sonucu oluşan arızalar
- Yanlış planlamadan kaynaklı oluşan arızalar
- Periyodik bakımların düzenli ve doğru yapılmamasından kaynaklı oluşan arızalar
- Diğer canlıların neden olduğu arızalar

Enerji iletim sistemleri de arıza sebep olan bu durumlar değişkenlik arz etmektedir. Bu durumların arızaların bilinmesi ve arızanın raporlanması önemli bir husustur. Bu nedenle oluşabilecek arızanın izole edilmesi ve onarılması enerji sürekliliği için ekonomik anlamda büyük bir kazanım sağlamaktadır. Aynı zamanda sistemin modellenmesinde veya enerji iletim sistemlerinin planlanması için ön analiz işlemleri yapılarak oluşabilecek veya daha önceden oluşan arızalara çözümlerin sunulması, oluşacak olan herhangi bir arıza durumunda uzun süre kalıcı olmaması ve sistemde büyük hasarların oluşmasını engellemek için tasarımı yapılacak olan teçhizat ve koruma elemanlarının dizayn aşamasında bu durumlar ele alınarak tasarımlarının ve planlamanın yapılması arızaların çözülmesine ve minimize edilmesine olanak sağlanabilir.

#### **4.6.6. Enerji iletim sistemlerinde misal teşkil eden arızalar**

Kapsam içerisinde daha önceden meydana gelmiş olan birkaç arıza ele alınmıştır. Oluşan bu arızaların daha önceden yetkili kişilerin görsel ve yazılı olarak oluşan arızanın ne olduğu, arızanın oluşumuna neyin neden olduğu, arızanın analizi sonucu işlemin tamamlanması gibi durumların misal teşkil etmesi ve enerji iletim sistemlerinde arızalara neden olan sebeplerin yazılı ve görsel olarak birkaç arıza türü misal olarak eklenmiştir.

İzolatör kontrol ve değişimi;

170 kV şalt sahasında yapılan termal kamera ölçümlerinde 170 kV ana bara A faz izolatör dizininde diğer fazlarla karşılaştırıldığında yaklaşık 15 derece ısı farkı olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.17.** Termal kamera ölçümlerinde A, B, C fazlarına ait izolatör görüntüleri

**Kaynak:** (Teiaş Staj Raporları 2021: 3)

Yukarıda paylaşılan A-B-C fazlara ait izolatör dizinleri termal resimleri incelendiği zaman B-C faz izolatör dizinleri ısı değerlerinin birbirine yakın ve ortam sıcaklığı ile hemen hemen aynı olduğu ancak A faz ile diğer fazlar arasında ısı farkı olduğu görülmüştür. A faz izolatör dizini resimleri incelendiği zaman izolatör dizini boyunca kendi içerisinde 2 kata yakın ısı farkı olduğu ve A fazın aynı zamanda topbaşına yakın olan izolatöründe B-C fazlarına kıyasla yaklaşık 15 derece ısı farkı olduğu gözlemlenmiştir.

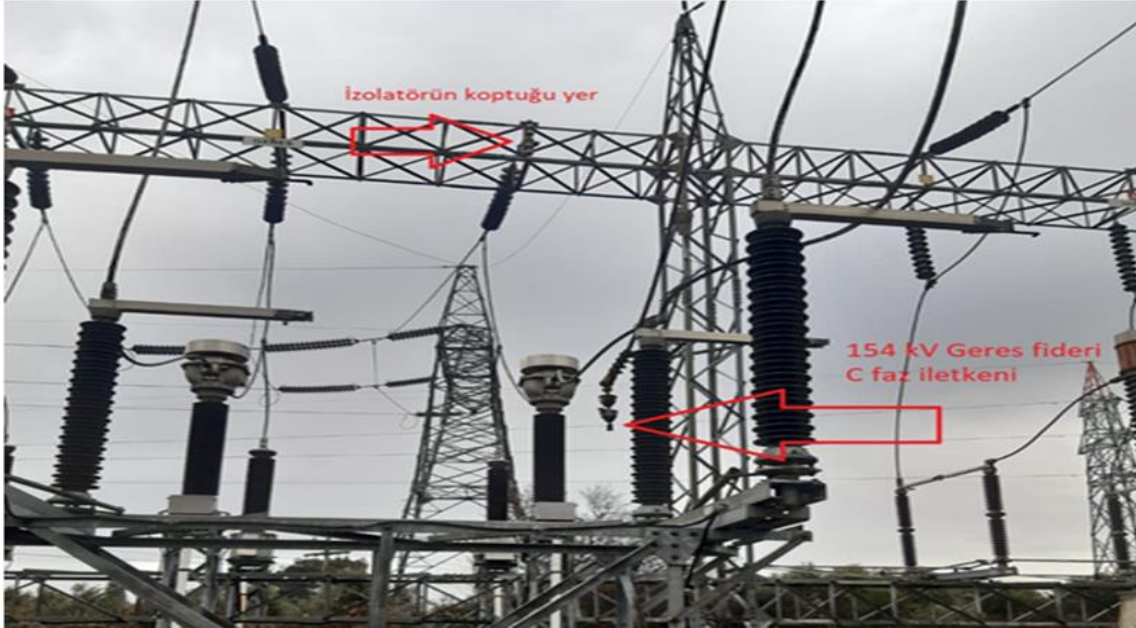


**Şekil 4.18.** A fazına ait arızalı izolatör

**Kaynak:** (Teiaş Staj Raporları 2021: 3)

Trafo açması ve bara boşalması arızası;

154 kV fideri C faz gergi izolatörünün kopması nedeniyle iletken Ana Baranın üzerine düşmüştür. İzolatörlerin kullanım ömrünü doldurması, olumsuz hava şartları doldurması, kirlilik ve malzeme mukavemeti ortaya çıkması durumunda arıza meydana gelmiştir.



**Şekil 4.19.** Şalt sahasında arıza durumu

**Kaynak:** (Teiaş Staj Raporları 2021: 4)

Şalt sahasında iletkenin kompası üzerine düşen hattın diğer iletkenleri üzerine düşmesi düşen iletken üzerinde devresin tamamlayarak şalt sahasında faz-toprak, ya da faz- faz kısa devre durumun oluşmasına neden olacaktır.



**Şekil 4.20.** Gergi izolatörünün patlaması

**Kaynak:** (Teiaş Staj Raporları 2021: 2)

Sistemin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için gerekli bakımların zamanında yapılması ve sistemde ekonomik ömrünü tamamlayan teçhizatların belirlenip değiştirilmesi sistem güvenliği ve enerjinin sürekliliği için önem arz etmektedir.

Kesici gaz düşük basınç arızası;

Yapılan kontrollerde; anonsiyetöre hiçbir sinyal düşmemiş olup saha kontrolleri sonrasında Kesici SF6 gaz göstergesinde gaz basıncının düştüğü gözlenmiştir. Arıza sırasında kesiciye ait herhangi bir sinyal çıkmamıştır. Yapılan incelemede Trafo 'ya ait röle panosunda bulunan DBy (Düşük basınç sinyal) ve BKy (Kesici blokaj) yardımcı rölelerinin arızalandığı ve bu sebeple sinyal çıkmadığı tespit edilmiştir.



**Şekil 4.21.** Sf6 gaz manometre, Sf6 gaz yoğunluğu göstergesi

**Kaynak:** (Teiaş Staj Raporları 2021: 5)

Kesicide farklı bir problem olduğu düşünülerek gaz ilavesi yapılmış akabinde kesiciye kapama verildiğinde kesicinin taşıyıcı izolatörünün, çelik mesnette bağlantı yapan kısımdan gaz kaçağı gözlenmiştir.

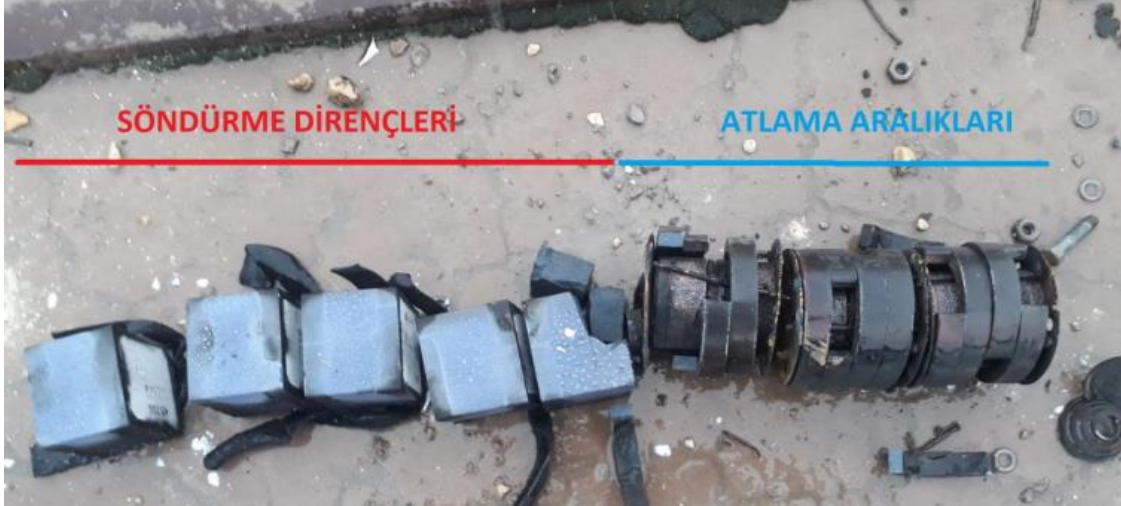


**Şekil 4.22.** Kesicide oluşmuş gövde delinme arıza durumu

**Kaynak:** (Teiaş Staj Raporları 2021: 5)

154 kV trafo merkezinde 144 kV parafudr hasarlanması;

Arıza öncesi TM'de 154 kV, bölgede hava yağmurlu ve yıldırımlıdır. Meteoroloji verilerine göre açmanın yaşandığı saatlerde TM'nin 10 km'lik etrafında yıldırım hareketliliği görülmektedir. Arızanın yaşandığı saatlerde 154 kV hattın yakınlarına (direk hatta da düşmüş olabilir) yıldırım düştüğü görülmektedir. Arıza sonrası yapılan kontrollerde C faz parafudrun infilak ettiği görülmüş ve arızanın parafudr çalışması ile başlayan ve parafudrun infilak etmesi ile son bulan bir arıza olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.23.** Hasarlanan C faz parafudr içi

**Kaynak:** (Teiaş Staj Raporları 2021: 3)

Hava atlama aralıklı parafudruların iç yapısındaki devre elemanlarının eski imali olmaları ve işletmede şu ana kadar yaşamış oldukları deşarjlar düşünüldüğünde bu parafudruların; deşarj esnasında atlama aralıklarında karbonlaşma oluşmakta, manyetik üfleme ile arkı söndüren bobinler zamanla bozulmakta ve diğer devre elemanlarında kalıcı hasarlanmalar meydana gelmektedir. Bu durumlar bu tipli parafudrun her deşarjının riskli olduğunu göstermektedir.

Enerji iletim sistemlerinde arızanın oluşmasına neden olan birkaç durumun ele alınması;

Enerji iletim sistemlerinde meydana gelen arıza çeşidi ve türü çok fazla olmasından dolayı bütün arızaları detaylı olarak ele almak zor ve zahmetlidir. Bu nedenle oluşan arızayı önceden rapor edilmesi gelecekte yapılacak olan çalışmalar için önem arz etmektedir. Enerji iletim sistemlerinde meydana gelen arızaları görsel olarak ifade edilebilir.



**Şekil 4.24.** Fırtına ve kar nedeniyle hat kopması

**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 8)



**Şekil 4.25.** Rüzgâr nedeniyle oluşan arızalar

**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 8)



**Şekil 4.26.** Şarjlı havalarda yıldırım kaynaklı oluşan arızalar

**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 9)



**Şekil 4.27.** Araç kazalarında oluşan arızalar

**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 9)



**Şekil 4.28.** Hayvan kaynaklı oluşan arızalar  
**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 10)



**Şekil 4.29.** Anızların yakılması ile ağaç direklerin zarar görmesi sonucu oluşan arızalar  
**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 10)



**Şekil 4.30.** Ağaç devrilmesi sonucu oluşan arızalar

**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 11)



**Şekil 4.31.** Kazı çalışmalarından kaynaklı arızalar

**Kaynak:** (Çifçi vd, 2017: 11)



**Şekil 4.32.** Kar yağışından bağlı olarak hat kopma arızaları

Enerji iletim sistemlerinde çevresel faktörler, mekanik faktörler, elektriksel faktörler ve diğer faktörlerden kaynaklı oluşan arızalara neden olan durumların bilinmesi enerji iletimi ve dağıtımını için önem arz etmektedir. Bu durumda arızalara neden olan etkileri minimize ederek enerji sürekliliği sağlanabilir. Meydana gelen arızaları minimize edebilmek için aşağıda verilen işlemler yapılabilir (Çifçi vd., 2017: 12).

- Enerji iletim sistemlerinin bakım ve onarımları planlı ve düzenli bir şekilde yapılarak sistemde kullanım ömrü tamamlamış veya performans açısından yetersiz olan teçhizatlarının değiştirilmesi veya yenilenmesi gerekir.
- Çevresel faktörlerden kaynaklı oluşan arızalar için daha uygun planlama ve teçhizatların doğru yerlere ve kullanım yerine ve amacına göre standartlara uygun teçhizat kullanılması gerekir.
- Enerji iletim yolunun geçtiği güzergahta potansiyel olarak arıza oluşumuna neden olabilecek olan nesnelere veya diğer cisimlerin (ağaç vb.) kaldırılması.
- Montaj yapacak olan veya operatör tarafından yapılacak olan işlemlerden kaynaklı oluşabilecek arızaların meydana gelmemesi için personelin eğitilmesi gerekir.
- Hayvanlardan kaynaklı oluşan arızalar için ulaşmasını engellemek amacıyla koruyucu veya engelleyici önlemlerin alınması gerekir.
- Bölgenin iklim şartları göz önünde bulundurularak (kar, fırtına, yağmur, sıcaklık vb.) planlama yapılmalıdır.

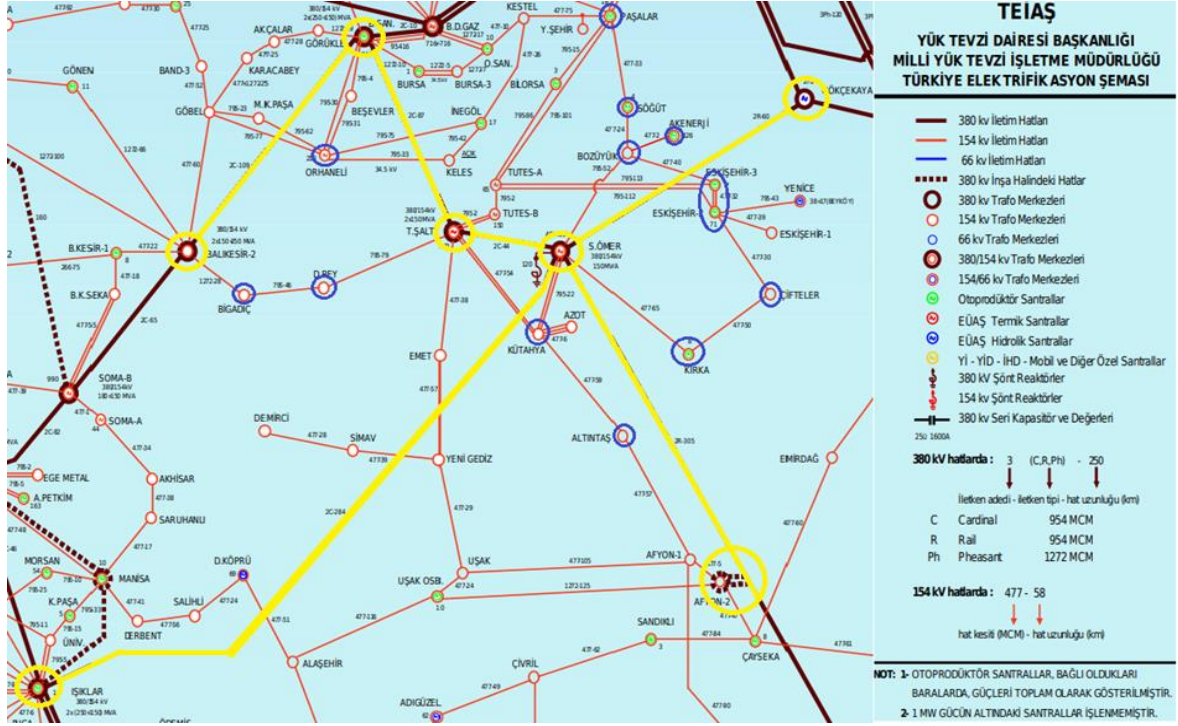
Genel olarak bu durumlar ele alındığından enerji iletim sistemlerinde oluşan arıza asgari düzeyde tutularak çok sık yaşanabilecek olan enerji kesintilerin önüne geçilerek enerji sürekliliği için önem arz edecektir. Aynı zamanda tüketicilerin elektrik enerjisi kesintilerinden kaynaklı oluşan üretim ve imalat aksamaları da minimize edilebilir. Arıza oluşumunu bütün, bütün ortadan kaldırmak zor ve maliyetli bir işlemdir.

## 5. İÇ BATI ANADOLU BÖLGESİNİN ENERJİ İLETİM ŞEBEKESİNDE ARIZA ANALİZİ

İç Batı Anadolu bölümü olarak adlandırılan kısım, Ege bölgesi içerisinde doğu yarı bölümünü oluşturmaktadır. Bu bölüm ise Ege bölgesi ile İç Anadolu bölgesinin sınır kısımlarını teşkil etmektedir. Afyon, Uşak ve Kütahya il merkezler bu bölüm içerisinde yer almaktadır. Bu bölgeye sınırı olan diğer iller ise Balıkesir, Bursa, Bilecik ve Eskişehir illeri yer almaktadır.

Türkiye’de ise üretilen ve diğer ülkelerden alınan veya satılan elektrik enerjisinin iletilmesine yönelik işletme, araştırma ve geliştirme faaliyetlerini gösteren ve yürütmekte olan yetkili kurulu Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirkettir (TEİAŞ). Türkiye elektrik iletim sistemi ise enterkonnekte örgü bağlantısı ile birbirine bağlanmasıyla işletilmektedir. Bu bağlantı tipi sayesinde elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımını, diğer bölgeler ile diğer ülkeler arasında elektrik iletim ve dağıtım alışveriş işlemleri gerçekleştirilmektedir. Ayrıca enterkonnekte bağlantı sayesinde, elektrik iletiminde ve dağıtımında enerjinin sürekliliğinin sağlanması, sistemin yüksek verimliliğe sahip olması ve ekonomik olması yönünde avantaj sağlamaktadır. Fakat sistem içerisinde yüksek akımlardan dolayı sistemi kararlı bir şekilde işletilmesi zor olması gibi bazı olumsuz durumlar mevcuttur.

Uygulama çalışması kapsamında Şekil 5.1’de Türkiye (Enterkonnekte) Elektrik İletim Sistemi Haritası (güncel olmayan) üzerinde kesiti alınmış olan Enterkonnekte sistemine ait olan kısımda, üretim tesisleri, trafo merkezleri ve iletim hatları gösterilmiştir. Harita üzerinde alınan kesitte Afyon, Uşak, Kütahya, Balıkesir, Eskişehir, Bilecik, Bursa ve Manisa illerine ait üretim tesisleri, trafo merkezleri ve iletim hatlarını içeren bazı kısımlar alınmıştır.

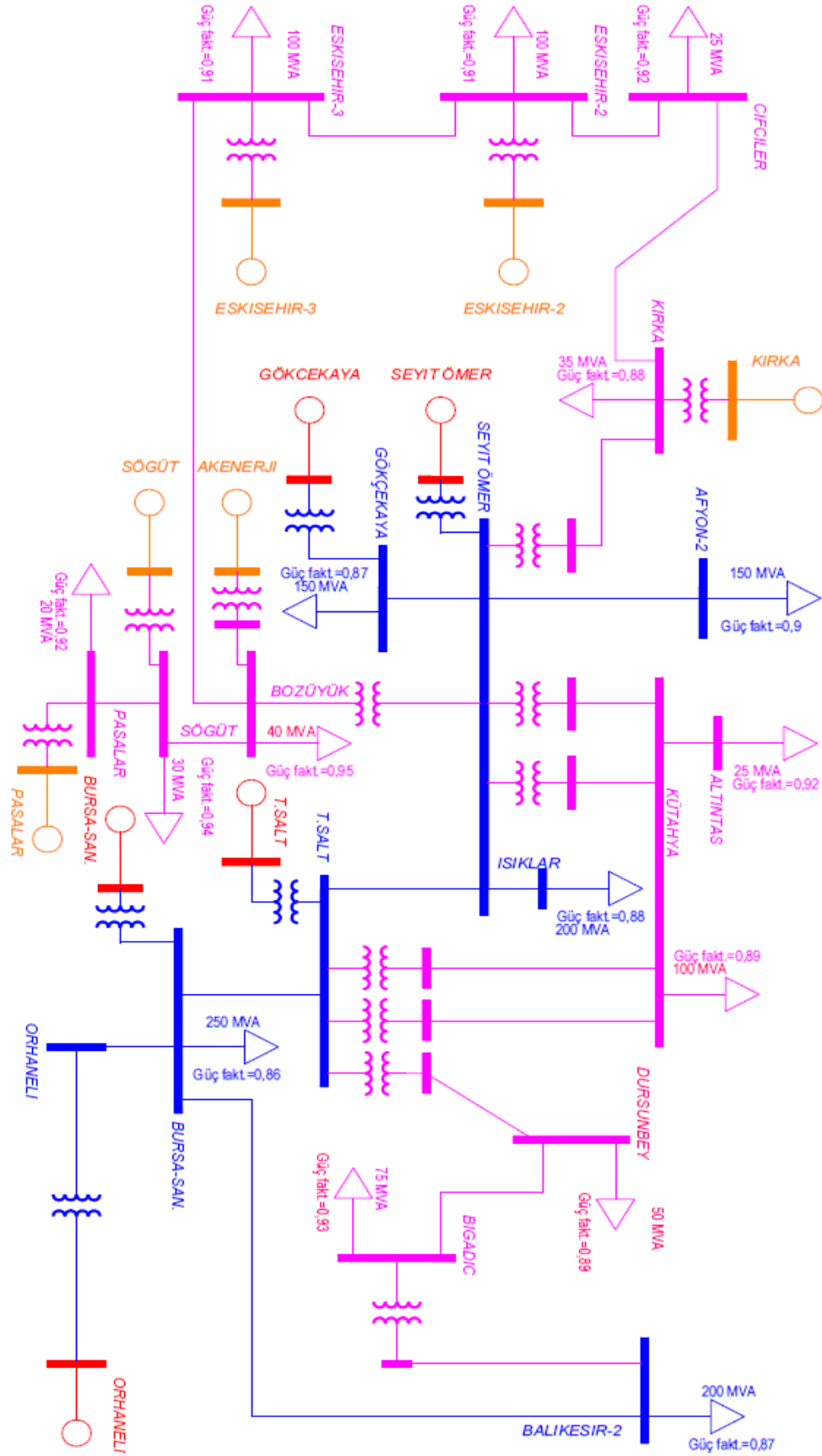


Şekil 5.1. Türkiye elektrik (Enterkonnekte) iletim sisteminden alınan kesit parça\*

Kaynak: (Hökelek, 2004: 15)

(\*Şekil 5.1, alınan kaynaktaki görselin tamamı olmayıp görselin bir kısmının kırılmasıyla ve görsel üzerinde belirtmek amacıyla farklı çizimler yapılarak çalışmaya dâhil edilmiştir.)

Şekil 5.1’de verilen Elektrik İletim Sistemi haritasının kısmında Seyit Ömer üretim santralinin “select” bara referans olarak alınmasıyla sarı renk ile belirtilmiş olan 380 kV hatlar ile mavi renk ile belirtilmiş olan 154 kV’ luk üretim santralleri, trafo merkezleri ve iletim hatlarına ait kısımlar uygulama çalışması kapsamında dahil edilmesiyle analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de Elektrik İletim Sisteminin daha sade ve anlaşılır olması bakımından üretim tesisleri, trafo merkezleri ve iletim hatları arasındaki bağlantı tek hat şeklinde ifade edilmiştir. Ayrıca iki merkez arasında enerji sürekliliği ve güvenliği için birden fazla bağlantının mevcut olduğu görülmüştür. Hatların gerilim seviyeleri ve her bir üretim sisteminin santralinin tipi ifade edilmek üzere Şekil 5.1’de elektrifikasyon şeması dahil edilmiştir. Şekil 5.2’de ise Şekil 5.1 ait güç sistemi çıkarımı PSSE program ile çizilip, güç sisteminde farklı gerilim seviyelerini ifade etmek için şema, farklı renkler ile çizilmiştir. Bu renkler ile 380 kV gerilim seviyesini ifade etmek için mavi, 154 kV gerilim seviyesini ifade etmek için Pembe, 14.4 kV üretim yapan generatörlere ait gerilim seviyesi için kırmızı ve 6.3kV üretim yapan generatörlere ait gerilim seviyesi ise turuncu renkler ile güç sisteminin çizimi ifade edilmiştir.



Şekil 5.2. Türkiye elektrik (Enterkonnekte) iletim sisteminden alınan kesit parçanın şematik gösterimi

Genel olarak güç sisteminde 11 adet üretim tesisi, 11 adet yükseltici trafo, 9 adet düşürücü ve 22 adet iletim hattının dahil edilmesi ile güç sistemi modellenmiştir. Güç sistemi içerisindeki en kısa iletim hattı olan 21,6 km uzunluğundaki Kütahya- Seyit Ömer hattı olup, en uzun iletim hattı ise 284,3 km uzunluğundaki Işıklar- Seyit Ömer hattıdır. Bazı merkezlerde enerji sürekliliğinin sağlanması için aynı güzergâh üzerinden paralel olarak ilave hatlar eklenmiştir. Ayrıca iki merkez arasında da enerji sürekliliği için çift yönlü hatların oluşumu ile belli başlı merkezlerde kapalı ve göz şebekelerde oluşturulmuş.

### **5.1. Güç Sistemlerinde Arıza Analizinde Kullanılan Programlar**

Güç sistemleri ağını oluşturan iletim hatları, elektrik makineleri (transformatör, generatörler, motorlar vd.) ve sistemi korumak için kullanılan teçhizatların oluşturduğu enerji nakil ağının karmaşık olmasından dolayı planlaması ve işletilmesi, oldukça maliyetli ve güç bir durumdur. Bu sebeple güç sisteminin birçok parametreye bağlı olmasından dolayı sistemi bir bütün olarak ele alınıp analiz edilmelidir.

Enerji üretim, iletim ve dağıtım şebekelerinin birbirleri ile bağlantılı olmasından ve enerji ihtiyacının artmasına bağlı olarak büyüyen güç sisteminin daha büyük coğrafi alana yayılması ile güç sistemlerinin planlanması, optimizasyona dayalı olarak işletilmesi ve kontrol edilmesi maliyetli ve güç olmasından dolayı bilişim sistemlerinin ve farklı algoritmaların bir arada kullanılması güç sisteminin işletilmesi için kolaylık sağlayacaktır. Bu sebeple güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesi için bilgisayar destekli ve grafik tabanlı programların tasarımı ve gelişimi hız kazanması ile gelişim göstererek ticarileştirilmiştir (Çakar, 2019:1). Günümüzde ise güç sistemlerinin modelleme, planlama ve analiz için geliştirilmiş olan grafik tabanlı ve ticari olarak satılan, Power World, PSCAD, NEPLAN, EMTP, ETAP, CYME, ERACS, IPSA, DIGSILENT Power Factory ve PSSE vb. gibi simülink programları mevcuttur.

Bilgisayar destekli simülink programları sayesinde güç sistemlerinin modellenmesi, planlanması ve analizi daha kolay, hızlı ve ekonomik bir hal almasıyla kullanıcılara kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca bilişim sistemleri ile farklı algoritma ve yöntemlerin bir arada kullanılmasıyla güç sisteminin yük akışı analizi hızlı ve etkin kullanılmasına fayda sağlamaktadır (İçel vd., 2013:2). Aynı zamanda hazır paket programları sayesinde modellenen güç sistemine ait yapılacak olan analizlerin önceden oluşabilecek fark durumların analiz edilmesi ve analiz sonuçlarının rapor halinde çıktı üretmesi kullanıcılara maliyet ve zaman açısından büyük katkı sağlamaktadır.

Güç sistemlerinin analiz için piyasada hali hazırda kullanılan ve ticari olarak satılan farklı ülkelerin ve farklı firmalara ait olan bilgisayar destekli simülasyon programları kendi web sitelerinde programlara ait verilen bilgiler doğrultusunda alınan özellikleri ile ele alınmıştır. Bu programlarının ticari olarak kullanılmasından dolayı programlara ait özellikler çok detaylandırılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada ele alınan güç sistemleri analiz programları ait özellikler firmalar tarafından daha sonraki süreçlerde daha güncel versiyonları olacağını düşünerek her bir firmaya ait olan programın güncel özelliklerinin firmanın web sisteminden takip edilmesi okuyucu için daha sağlıklı olacaktır.

**Powerworld** simülâtör programı tasarımı 1990'lı yıllarda Illinois üniversitesi Prof. Thomas OVERBYE ve doktora öğrencileri tarafından tasarlanmaya başlanmıştır. Güç sistemlerinin analizinin manuel yöntem ile yapılmasından dolayı karmaşık ve bara sayının artmasından dolayı yapılan matematiksel analizlerin çözümlenmesi zor hale gelmesinden dolayı güç sistemlerinin anlaşılması ve işlenebilmesi için kolay ve daha sade bir hal alması gerektiğinden dolayı bu programın tasarımına kararlaştırılacak çalışmalara başlanır.

Powerworld simülâtör programı ile enerji iletim hatlarına ait bir veya birden fazla baraya sahip olan güç sisteminin güç akışını analiz etmek için kullanılmaktadır. Simülâtör programı sayesinde her bir iletim hattına ait olan aktif ve reaktif güçlerin kayıpları hesaplanabilir. Ayrıca simülâtör sayesinde güç sistemine ilave olarak generatör, iletim hattı ve yükler eklenip çıkarılarak farklı senaryolar oluşturularak analizler gerçekleştirilebilir. Bu sayede karmaşık ve bara sayısının çok fazla olduğu güç sistemlerinin daha kolay ve daha hızlı analiz edilerek zaman ve maliyet açısından önem arz etmektedir.

Powerworld simülâtör programının farklı güçlere sahip yüklerin, farklı gerilim seviyelerin karşılaştırılması, karmaşık olan matematiksel denklemleri ve baz değerlerinin hesaplanması için Kirchoff düğüm akımlarının toplamının sıfır olması eşitliği ve Newton-Raphson yöntemleri ile yaklaşık 250.000 kadar baraya sahip güç sistemlerini işleyebilir. Powerworld simülâtör programı Embarcadero Delphi XE görsel ve nesne yönelimli windows geliştirme dili ile yazılmıştır (Powerworld, 2001).

**PSCAD** simülâtör programı 1981 yılından beri enerji sektöründe faaliyet gösteren Manitoba Hydro International Ltd. (MHI) firması tarafından güç sistemlerinin elektromanyetik geçici durumu, herhangi bir arızanın oluşumu veya arıza durumunda devre kesicinin aktif hale gelip gelmediğini arızadan önce güç sistemine ait olan ağ sisteminin dinamik davranışı simüle

etmek amacıyla geliştirilmiştir. Yani sistemin kısa süre zarfı içerisinde ve kademeli bir şekilde güç sisteminin kararlılık durumunu analiz eder. Bu analiz işlemi ise güç sisteminde arıza oluşumundan önce sistem içerisinde bulunan baralara ait gerilim, akım, faz açıları ve baradaki aktif, reaktif güç akışlarını uygun koşulların optimizasyonun yapılmasına olanak sağlar. Ayrıca sistemin güç akışı için denklemlerinin çözümlenmesi ve sistem içerisinde mevcut olan generatörlerin parametrelerinin ayarlanmasına olanak sağlar.

PSCAD simülasyon programında ise güç sisteminin tasarımı ve modellenmesi, bloklar şeklinde oluşturulmuş bileşenlerin modül yapıda tasarlayarak kullanıcının hazır bloklarının birbiri ile bağlanmasıyla güç sistemi modellenmektedir. Bu blokların oluşturulmasında ise farklı yöntem ve metotların kullanılması ile inşa edilmiştir. PSCAD programında oluşturulmuş tam köprü hücresi Thévenin eşdeğer devre metodu ile inşa edilmiştir. Bir diğer blok olan transformatör bloğu ise dualite ilkesine dayanarak inşa edilmiş bir bloktur. Diğer bloklar ise farklı yöntem ve metotlar kullanılarak güç sisteminde kullanılan elemanlar tek blok halinde inşa edilerek kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. PSCAD programı ise özel yapım olan Python diline ait olan komut dosyalarının kullanılması ile tasarlanmıştır. Genel anlamda PSCAD simülasyon programında alt kısımda örnek olarak belirtilmiş olan karmaşık ve benzer yapıdaki güç sistemlerinin analizinin yapılabilir.

- Modüler yapıdaki çok seviyeli dönüştürücü uygulamaları
- Yüksek gerilim doğru akım güç sisteminin analizi
- Rüzgâr türbinine ait güç sisteminin analizi
- Fotovoltaik sistemlerinin analizi
- Yıldırım çarpası anındaki parafudr test analizi
- Elektrik enerjisinin dağıtım analizi
- Harmonik gerilim bozulmalarının analizi
- Bir veya üç fazlı sistemlere ait akü gruplarının analizi
- Alternatif akım şebekesi ile yüksek gerilimli doğru akım güç sistemlerinin birbirine bağlanması

Ele alınan bu örnekler kullanıcının oluşturmak istediği farklı veya benzer şekildeki güç sistemleri program içerisinde blok halinde inşa edilmiş olan bileşenleri doğru konfigürasyonlar ile birbirine bağlayarak inşa etmek istediği güç sistemini önceden analiz ederek karşılaşılabilecek olumsuz durumlar simüle ederek sistemin kararlılık analizi yapmasına olanak sağlayacağında zaman ve ekonomik açıdan katkı sağlayacaktır (Pscad, 1981).

**NEPLAN** AG 1988 yılında kurulmuş olan elektrik, doğalgaz, su ve bölge bazlı olarak ısıtma şebekeleri için yazılım geliştiren ve özel hizmetler sunan İsviçre firmasıdır. Firma tarafından tasarlanan NEPLAN programı ise elektrik enerjisinin üretim, iletim, dağıtım ve bunların yanı sıra endüstriyel, yenilenebilir enerji sistemleri ve akıllı şebekelere ait uygulamaları için geliştirilmiş güç sistem analiz programıdır.

NEPLAN Electricity ile enerji sistemleri için planlama, optimizasyon ve analizleri simüle etmek için kullanılan görsel simülasyon programıdır. Genel olarak program sisteme ait olan koruma cihazları, ağ bileşenlerini ve kontrol devrelerini grafik ara yüzü ile analiz eder.

Program kapsamında alt kısımda belirtilmiş olan;

- Enerji üretim, iletim ve dağıtım planlaması
- Güç kalitesinin analizi
- Optimizasyon
- Sistem koruma ayarları ve değerlendirme
- Sistemin dinamik simüle edilmesi
- AC ve DC şebekeler için bir, iki ve üç fazlı analizler

Konular kapsamında kullanıcının simüle etmek istediği güç sistemini doğru konfigürasyonlar ile tasarlayarak yapmak istediği işlemleri görsel olarak analizler gerçekleştirebilir. Program tarafından yaklaşık 500.000 baralıklı bir sistem tasarlanabilir.

NEPLAN simülasyon programı bilişim teknolojisinde kullanılan teknik ve algoritmaları yöneterek uygulanabilmektedir. Programa ait kitaplık ise C/C++ VE API ile oluşturulmuştur. Ara yüzü olarak GIS, SCADA, SQL, ASCII ve MATLAB SIMULINK kullanılmıştır. Program kapsamında Newton-Raphson, Düğüm gerilimler yöntemleri ve ETSO (load flow based, MW generation shift) yük akışı tabanlı, MW üretimi vardiya metodolojisi kullanılmaktadır (Neplan, 2021).

**EMTP** simülasyon programı 1966 yılında Hermann Dommel tarafından tasarlanmaya başlamıştır. Bu programın tasarım amacı ise elektromanyetik geçişleri, sabit parametrelili olan iletim hat modellerine ait devreleri düğüm yöntemi ile analiz ve simüle etmek için tasarlanmıştır. Programın devre modellerini analiz etmek için yamuk entegrasyon yöntemi kullanılmıştır.

EMTP simülasyon programı ile güç sistemlerinin elektromekanik geçişlerini ve kararlı hal koşullarını incelemek ve analiz etmek için kullanılabilir. Program kapsamında alt kısımda belirtilmiş olan güç sistemlerine ait olan konular analiz edilebilir.

- Sisteme ait elektromanyetik ve elektromekanik geçişlerine ait analizler gerçekleştirilmesi.
- Kararlılık durum analizi ve geçişi olan olayların incelenmesi
- Koruma ve kontrol sistemlerinin içeren kütüphane desteği ile modelleme yapılabilmesi
- Yenilenebilir enerji kaynağı olan fotovoltaik ile rüzgâr enerji sistemlerini modellenebilmesi

EMTP simülasyon programının grafik tabanlı ve işleyişi ise Newton tabanlı yinelemeli yöntemin uygulanması ile doğrusal olmayan sistemlere çözüm sunar. Sisteme ait olan kontrol kısımlarının bileşen modül yapıdaki blokların cebirsel döngüler ile kullanıcının müdahalesi olmadan blokların birleştirilmesi ile analiz yapılabilmektedir. Ayrıca EMTP ile MATLAB simülink birbiri ile bağlanabilmektedir (Emtp, 2004).

**ETAP** 1986 yılında kurulmuş olan firmanın elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtım sistemlerinin model tasarımının gerçekleştirilmesi ile sistemin analiz edilmesi ve optimizasyona dayalı olarak işletilmesi için çözüm sağlayabilmektedir. Ayrıca sistemin izlenmesi ve kontrol edilmesi için çözüm sağlayan grafik tabanlı görsel bir programdır. Program kapsamında yapılabilecek uygulamalar ise;

- Güç sistemine ait yük ve güç akışının çalışmasının analizi
- Sistem içerisinde oluşabilecek kısa devre veya arızaların analiz edilmesi
- Sistemin koruması için korucu cihazların koordinesi, ayırım ve seçicilik
- Geçici kararlılık hal analizi
- Güç sistemine ait transformatörlerin analiz edilmesi
- Harmoniklerin ve güç kalitesinin analiz edilmesi

Genel anlamda ETAP simülasyon programı ile güç sistemine ait kısımlarının tasarımı, modellenmesi ve analizi için kullanılan bilen grafik tabanlı görsel simülasyon programıdır (Etap, 1986).

**CYME** simülasyon programı enerji iletim, dağıtım ve endüstriyel güç sistemlerini analiz etmek için tasarlanmış grafik tabanlı yazılım programıdır. CYME simülasyon programı güç sistemleri ağının planlanması ve işletmeye dayalı aşamaları ve karmaşık olan sistemler için çözüm sağlamak için kullanılabilir. CYME programı kapsamında analiz edilebilecek kısımlar ise;

- Şebeke ağının modellenmesi
- Sisteme ait arıza analizi

- Güç sistemlerinin güç akış ve optimum analizleri
- Harmoniklerin analizi
- Kararlılık analizleri (Geçici ve Gerilim)

Genel anlamda güç sistemleri ve endüstriyel güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesi için görsel olarak analizin yapılabileceği ve karmaşık olan sistemleri sade bir biçimde tasarlamak için kullanılabilecek simülasyon programıdır (Cyme, 1986).

**ERACS** simülasyon programı güç sistemlerine ait ağları analiz etmek için kullanılan görsel tabanlı yazılım uygulamasıdır. Uygulama ile yapılan güç sistemlerini kolay ve hızlı çözüm sağlayabilmek için ERACS kullanılarak güç sistemini görsel simülasyon ile analiz gerçekleştirilebilir. Program kapsamında ise;

- Güç sistemine ait yük akışı analizi
- Hata algılama ve ayıklama
- Harmoniklerin analizi
- Sistemin ait korumanın sağlanması
- Genel güç sisteminin koordinasyonun sağlanması

ERACS programı tarafından güç sistem modellenmesi için yaklaşık olarak 1500 adet baralı bir sistemin modellenmesi ve analizinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca ERACS'e ait grafik ara yüzü ile Python komut dosyası ile yük akışı, hata algılama ve harmonikleri hesaplamak için otonom komut ile sağlanabilmektedir (Eracs, 1990).

**Ipsa** uygulaması elektrik şebeke ağının tasarlanması, planlanması ve işletebilmek için güç sistemlerine ait kısımları içeren kapsamlı olan bir görsel tasarım ve analiz programıdır. Program kapsamında istenilen güç sistemine modellenmesi ile sistemin analizi yapılabilir.

Ipsa görsel tasarım programı ile güç sistemlerine aşağıda belirtilmiş olan kısımlar analiz edilebilmektedir.

- Güç sistemi ağı oluşturma
- Analiz edilen güç sistemine ait tablo oluşturma
- Güç sistemin yük akışını analiz edebilme ve raporlama
- Sistem içerisinde meydana gelen hataları algılama ve ayıklayarak arızaya ait grafik oluşturma
- Harmoniklerin analizi
- Güç sistemine ait aşırı akım koruma analizi için ön gösterim
- Kararlılık analizi

Ipsa tarafından güç sistemine ait analizin gerçekleştirilmesi esnasında sisteme ait çıktı sonuçlarının tablo ve rapor halinde çıktı üretmesi kullanıcıya zaman kazanımı için yarar sağlamaktadır (Ipsa, 2016).

**DIGSILENT** power factory programı güç sistemlerini görsel yazılım olarak modellenmesi ve planlaması ile analiz yapmak için kullanılan grafik tabanlı simülasyon programıdır. Kendi içerisinde barındıran algoritmalar ile sisteme ait ağ topolojisini analiz ederek sonuçlar üretir. Güç sistemine ait oluşabilecek senaryoları kısa süre içerisinde analiz edilerek kullanıcı için kolaylık sağlamaktadır. Program kapsamında analiz edilebilecek kısımlar ise;

- Karmaşık ve çok baralı güç sistemlerinin modellenmesi ve analizi
- Kararlılık analizleri
- Elektromanyetik geçici olayların analizi
- Güç kalitesi ve harmoniklerin analizi
- Aktif, reaktif ve gerilim eğrisi hesaplamaları
- Optimizasyona dayalı güç akışı
- Birden fazla güç sistemi gruplarının modellenmesi
- Güç sisteminin transfer kapasitesinin incelenmesi
- Sisteme ait acil durum senaryolarının analizi

DIGSILENT power factory simülasyon programı güç sistemine ait olan kısımların tasarımı, planlaması, analiz ve inceleme senaryolarını Newton-Raphson tekniği ile işlem yapmaktadır. Dengeli veya dengesiz olan güç sistemine ait yük akışının hesaplanmasına olanak sağlar. Program kapsamında uygulanan Newton-Raphson tekniği ise güç sistemine ait olan iletim kısımlarındaki 1 kVA'ın altında kalan güç değerini yuvarlamasıyla veri çıktısı üretir (Digsilent, 2018).

**MATLAB**, MathWorks'ün kurucuları olan Jack Little ve Cleve Moler tarafından mühendislik alanındaki karmaşık ve uzun olan matematiksel işlemlerin daha kısa sürede çözülmesi gerektiğini düşünerek bilişim teknikleri ve algoritmaları bir arada kullanılması ile hızlı ve yüksek performans gösteren bilgilerin işlenebildiği MATLAB işlem ortamını geliştirerek kapsamlı olarak matematiksel problemleri ve grafik işlevlerini bir arada barındırması sayesinde yüksek merteben yazı dillini ortaya koymuşlardır.

MATLAB programı kapsamında tanımlanan matematiksel kod satırları ile tanımlanan fonksiyonlar sayesinde kodu işleme esnasında atanan değişkenler sayesinde girilen değerlere bağlı olarak hızlı ve doğru çıktılar üretmesi sayesinde kullanıcıya büyük kolaylık

sağlamaktadır. Ayrıca MATLAB simülink ile bloklar şeklinde oluşturulmuş bileşenlerin modül yapıda tasarlayarak kullanıcının bloklarının birbiri ile bağlanmasıyla analiz etmek istediği sistemi modelleyerek analiz edebilmektedir. MATLAB kapsamında kullanıcının çalışmasına olanak sağladığı kısımlar ise alt kısımda belirtilen maddeler özet olarak geçilebilir.

- Yeni model veya tasarım esnasında sistemin optimizasyonu ve testi için farklı değişkenler için farklı senaryolarının simüle edilebilmesi
- Ortaya konulmak istenilen yeni bir sistemin donanım kısmına geçmeden önce program tarafından ayrıntılı olarak yapılacak test ve analizler sayesinde zaman ve ekonomik anlamda kazanım sağlanması
- Analiz ve test için paket olarak sunulan simülasyon programları aksine kullanıcının yapmak istediği sistemi baştan sona kendisini modelleyerek programa dahil olmasına olanak sağladığından kullanıcıyı sınırlamaması
- Otonom komut satırları sayesinde test ve analiz sonuçlarının tablo, grafik ve rapor halinde çıktı üretmesine imkân sağlanması

MATLAB simülink ise konumuz kapsamında olan güç sistemlerinde ise modellemek istediğimiz güç sistemine ait eleman ve teçhizatlara ait blok bileşenlerinin tasarımı ile farklı yöntem ve metotlar ile sistemin modellenmesi ve analizinin gerçekleştirilmesi kullanıcıyı sınırlamamaktadır (Matlab, 1994).

MATLAB simülink ortamında güç sistemlerini analiz etmek için program kapsamında blok olarak tanımlanan matematiksel işlemler ve görsel olarak tasarlanmış güç sistemi bazı yöntemler ile analiz edilmiştir. Bu yöntemler ise;

- GUI tabanlı arıza analizi
- Bulanık mantık yöntemi ile arıza analizi
- Kısa devre arıza analizi
- Yürüyen dalga ile arıza analizi
- Modüler yapay sinir ağları ve dalgacık dönüşümü ile arıza analizi
- Örüntü tanıma yaklaşımı ile arıza analizi

Güç sistemlerinde arıza analizi için kullanılan yöntem ve metotların farklı olması nihai olan güç sisteminde oluşan hatayı en hızlı ve en doğru bir biçimde algılamaktır. Bu nedenle MATLAB programının kullanıcıyı metot ve yöntem bakımından sınırlamadığından dolayı kullanıcının farklı yöntemlerin geliştirmesine ve güç sistemini optimize edebilmesine olanak sağlamaktadır.

**PSSE** simülink programı SIEMENS tarafından tasarlanmış, elektrik güç sistemlerinin güç akışı, kısa devre durumları, dinamik yük akışı, kararlılık ve optimum güç akışını analiz etmek için kullanılmaktadır. Program kapsamında ise yaklaşık olarak 200.000 baraya kadar güç sistemine ait ağ modeli tasarlanabilmektedir. PSSE simülink programı görsel olarak modellenen güç sistemi ağının analizini Newton Raphson veya Gauss Seidel yöntemleri ile güç akışını çözümler. Program kapsamında analiz edilebilecek kısımlar ise;

- Güç sisteminde beklenmedik durumlar için senaryo analizleri (üç faz kısa devre, iki faz kısa devre, faz-faz kısa devre, faz-toprak kısa devre)
- Transformatörlere ait topolojilerinin modellenmesini detaylandırılması
- Güç sistemini ait otonom olarak PV/QV grafiklerinin oluşturulması
- Dengeli ve dengesiz güç sisteminin analizi
- Rüzgâr türbinlerine ait sistemler için dinamik yük akış analizleri
- Kullanıcı tarafından kod tabanlı olarak yeni model oluşturma

Genel olarak PSSE simülink programı tarafından ele alınan kısımların analiz edilmesi ve karmaşık olan güç sistemlerinin modellenmesi ile çok kısa sürede güç sistemine ait parametre değerlerini çıktı olarak alınması kullanıcı açısından kolaylık sağlamaktadır. (Siemens, 1996).

## **5.2. İç Batı Anadolu Bölgesinin Enerji İletim Şebekesinde Güç Akışı Analizi**

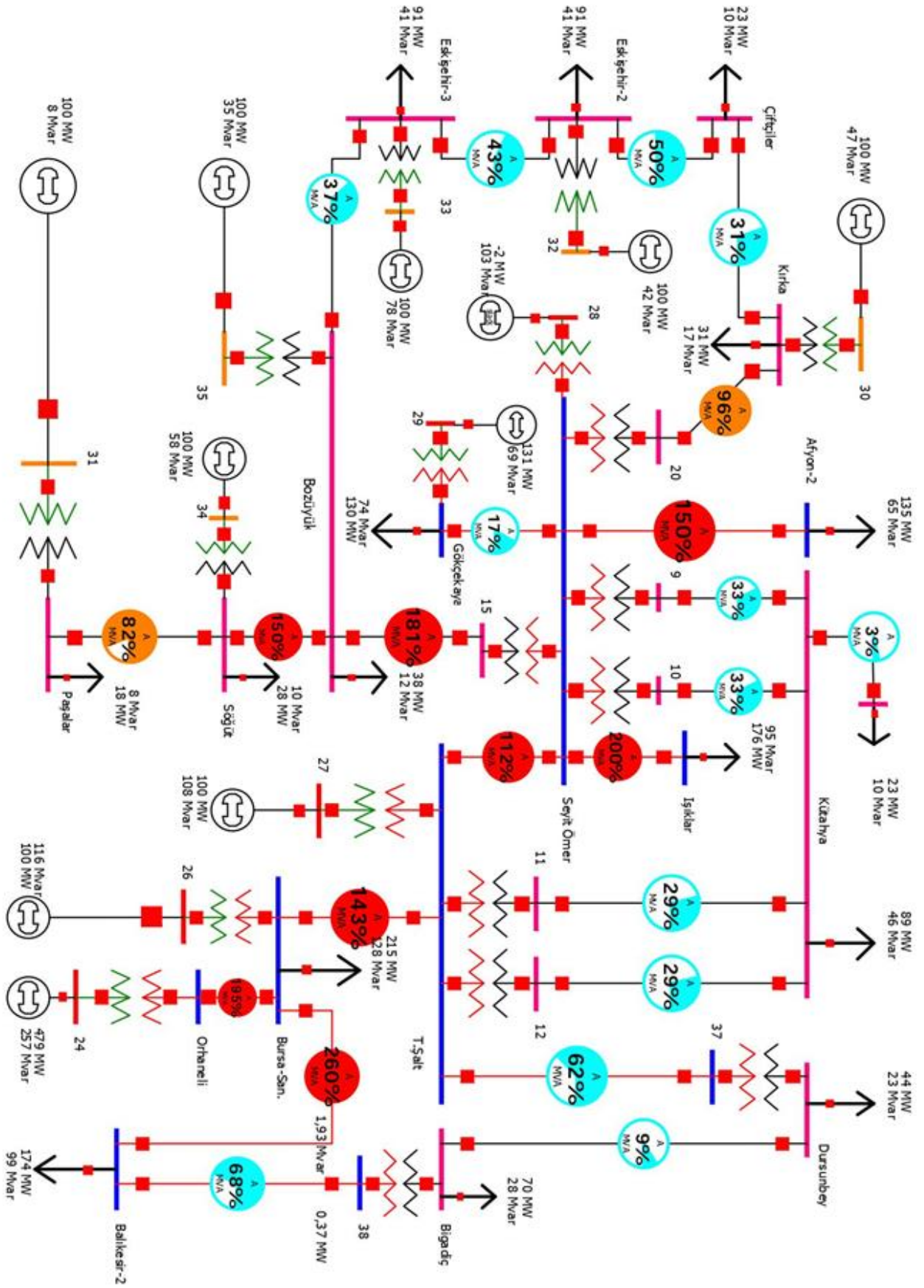
Enerji iletim ağlarında güç akışının analiz edilmesi, sistem içerisinde meydana gelebilecek olumsuz durumların veya arızaların sistem üzerindeki etkinin büyüklüğünü ölçülmesiyle, güç sisteminin enerji sürekliliğini ve kararlı bir formda işletilmesinde hayli bir öneme sahiptir. Bu sebeple enerji üretim santrallerinde üretimin aksamasına neden olabilecek faktörlerin birden fazla oluşundan dolayı, enerji süreksizliği ve belirsizliğinden dolayı güç sistemi içerisinde mevcut olan üretim santrallerinden bir veya birden fazla santral veya tesisin açmasıyla güç sistemindeki büyüklüğünü ve etkilerinin incelenmesi ve analizi enerji sürekliliği için önem arz etmektedir. Güç sistemi içerisinde bulunan üretim santralleri ve tesislerinin, üretime bağlı olarak oluşan güç değişimleri, sistem üzerindeki etkilerini ve sistem içerisinde bulunan elemanların çalışması işletme sınır şartları içerisinde tutulması gerekmektedir (Doğanay vd., 2022:5).

Üretime bağlı, yük açma-kapama durumlarında veya diğer etkenlerden dolayı ani yük değişimleri oluşabilmektedir. Bu değişimlerin enerji sürekliliğinin sağlanması için, sistem içerisinde anlık olarak değişim gösteren güç akışının sistem üzerindeki büyüklüğünü incelemek

ve analiz etmek önleyici tedbirlerinin planlanması ve uygulanması için etkili bir şekilde sistemin kesintisiz olarak işleyebilmesi için uygun mühendislik çözümleri sağlanmalıdır.

Elektrik enerjisine olan talebin artış göstermesinden dolayı güç sistemlerinin giderek büyümesi daha karmaşık bir yapıya dönüşmektedir. Bu sebeple sistem içerisinde oluşabilecek olumsuz durumlarının birden çok olması ihtimalinden dolayı ortaya konulacak çözümlerin bilgisayar destekli yazılımları ve simülasyon uygulamaları ile güç sisteminin incelenmesi ve analizlerin yapılması, mühendislerin hızlı ve ekonomik çözümlerin ortaya konulmasında büyük katkı sağlayacaktır.

Şekil 5.3'te İç Batı Anadolu Bölgesinin Enerji İletim Şebekesine ait güç sistemi Power World simülasyon programında modellenmiştir. Güç sistemi ait değerler ise 100 MVA ve 154 kV baz değerleri simülasyon kapsamında ve ölçüm için kullanılan göstergeler ise 100 MVA baz değerleri ile yük akış analizi yapılmıştır. Her hattaki göstergeler hattın çekilen görünür gücün yüzdeleri (MVA) olarak gösterimi alınmıştır. Göstergelerdeki yüzdeleri değerler güç sistemde tüm santrallerin, iletim hatlarının ve yüklerin aktif olduğu normal işletme koşullarındaki değerleri ifade etmektedir.



Şekil 5.3. Güç sisteminin Power World simülöründe modellenmesi

Tablo 5.1’de hat karakteristik değerleri 100 MVA ve 154 kV baz değerlerinin seçilmesiyle pozitif, negatif ve sıfır bileşenlerine ait hat karakteristikleri hesaplanmıştır. Tabloda hat karakteristik değerleri hattın toplam km uzunluğuna çarpılmasıyla tabloya dahil edilmiştir. Bu değerler hattın toplam uzunluğuna bölünmesiyle km başına değer elde edilebilir.

**Tablo 5. 1.** İletim hatlarına ait karakteristikler

Hattın Adı	Mesafe (km)	Pozitif (+) ve Negatif (-) Bileşen Hat Empedansları p.u. (toplam)			Sıfır Bileşen Hat Empedansları p.u. (toplam)			Kesit
		R	X	Y	R <sub>0</sub>	X <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	
Seyit Ömer-Tutes Şalt	43,6	0,00151	0,0096	0,22052	0,008	0,031	0,14562	C2*954 MCM
Işıklar-Seyit Ömer	284,3	0,00686	0,0626	1,416	0,0578	0,207	0,941	C2*954 MCM
Seyit Ömer-Afyon2	110,5	0,0026	0,024	0,55	0,022	0,08	0,365	R2*954 MCM
Seyit Ömer-Gökçekaya	117	0,0028	0,026	0,55	0,059	0,087	0,367	R2*954 MCM
Bursa San.-Tunçbilek Şalt	87,8	0,002	0,019	0,443	0,017	0,064	0,291	C2*954 MCM
Balıkesir2-Bursa San.	111	0,0027	0,024	0,548	0,022	0,081	0,219	C2*954 MCM
Kütahya-Seyit Ömer (Hat-1 ve Hat-2)	21,6	0,0075	0,035	0,015	0,026	0,119	0,0078	2*795 MCM
Tunçbilek Şalt-Kütahya (Hat-1 ve Hat-2)	54,5	0,03	0,091	0,036	0,079	0,306	0,019	2*477 MCM
Kütahya-Altıntaş TM	51,3	0,029	0,091	0,0321	0,087	0,265	0,0238	477 MCM
Tunçbilek Şalt-Dursunbey	78	0,027	0,135	0,0517	0,122	0,401	0,038	795 MCM
Bigadiç-Dursunbey	45,6	0,015	0,078	0,03	0,07	0,232	0,022	795 MCM
Bursa San.-Orhaneli	33,4	0,011	0,054	0,023	0,041	0,185	0,012	795 MCM
Seyit Ömer-Bozüyük	82,3	0,018	0,089	0,034	0,081	0,267	0,025	795 MCM
Söğüt-Bozüyük	22,5	0,012	0,04	0,014	0,039	0,11	0,01	477 MCM
Söğüt-Paşalar	33,2	0,019	0,06	0,02	0,058	0,17	0,016	477 MCM
Kırka-Seyit Ömer	64,9	0,036	0,11	0,04	0,114	0,33	0,031	477 MCM
Çifteler-Kırka	49	0,02	0,0889	0,030484	0,086	0,25	0,02378	477 MCM
Çifteler-Eskişehir2	70,6	0,04	0,128	0,043	0,124	0,36	0,034	477 MCM
Eskişehir2-Eskişehir3	44,3	0,015361	0,0728	0,0307	0,0548	0,24	0,016	795 MCM
Eskişehir3-Bozüyük	42	0,023	0,076	0,026	0,074	0,214	0,02	477 MCM
Balıkesir2-Bigadiç	27,5	0,006	0,051	0,016	0,036	0,036	0,13	1272 MCM

Gerçek güç sistemlerinde sistem içerisinde anlık değişimlerine bağlı olarak devreye giren ve çıkan yükler değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple simülasyon kapsamında yapılacak olan analizlerde sisteme dahil edilecek olan santraller ve yükler sabit kabul edilerek işlemler gerçekleştirilebilir. Ayrıca sistem içerisindeki kesiciler sayesinde her bir santralin, hattın ve yükün sonuna eklenen kesiciler sayesinde güç sisteminin simülasyon ortamındaki kesicilerin devreye alınıp çıkarılmasıyla hatlardaki yüklenme durumları izlenebilmektedir. Bu sebeple Tablo 5.2’de sisteme dahil edilen güç faktörü ve görünür güç değerleri tahmini olarak alınmıştır. Bu değerler manuel olarak değiştirilebilir veya sisteme yeni yüklerde dahil edilebilir.

**Tablo 5.2.** Güç sistemine dahil edilen yüklerin güç faktörü ve görünür güç değerleri

<b>Baranın Adı</b>	<b>Güç Faktörü</b>	<b>Görünür Güç (MVA)</b>
Seyit Ömer	Referans barası	
Afyon2	0,9	150
Işıklar	0,88	200
Tunçbilek Şalt	Üretim tesisine ait bara	
Bursa San.	0,86	250
Balıkesir2	0,87	200
Gökçekaya	0,87	150
Kütahya	0,89	100
Altıntaş	0,92	25
Dursunbey	0,89	50
Bigadiç	0,93	75
Orhaneli	Üretim tesisine ait bara	
Bozüyük	0,95	40
Kırka	0,88	35
Çifteler	0,92	25
Eskişehir2	0,91	100
Eskişehir3	0,91	100
Söğüt	0,94	30
Akenerji	Üretim tesisine ait bara	
Paşalar	0,92	20

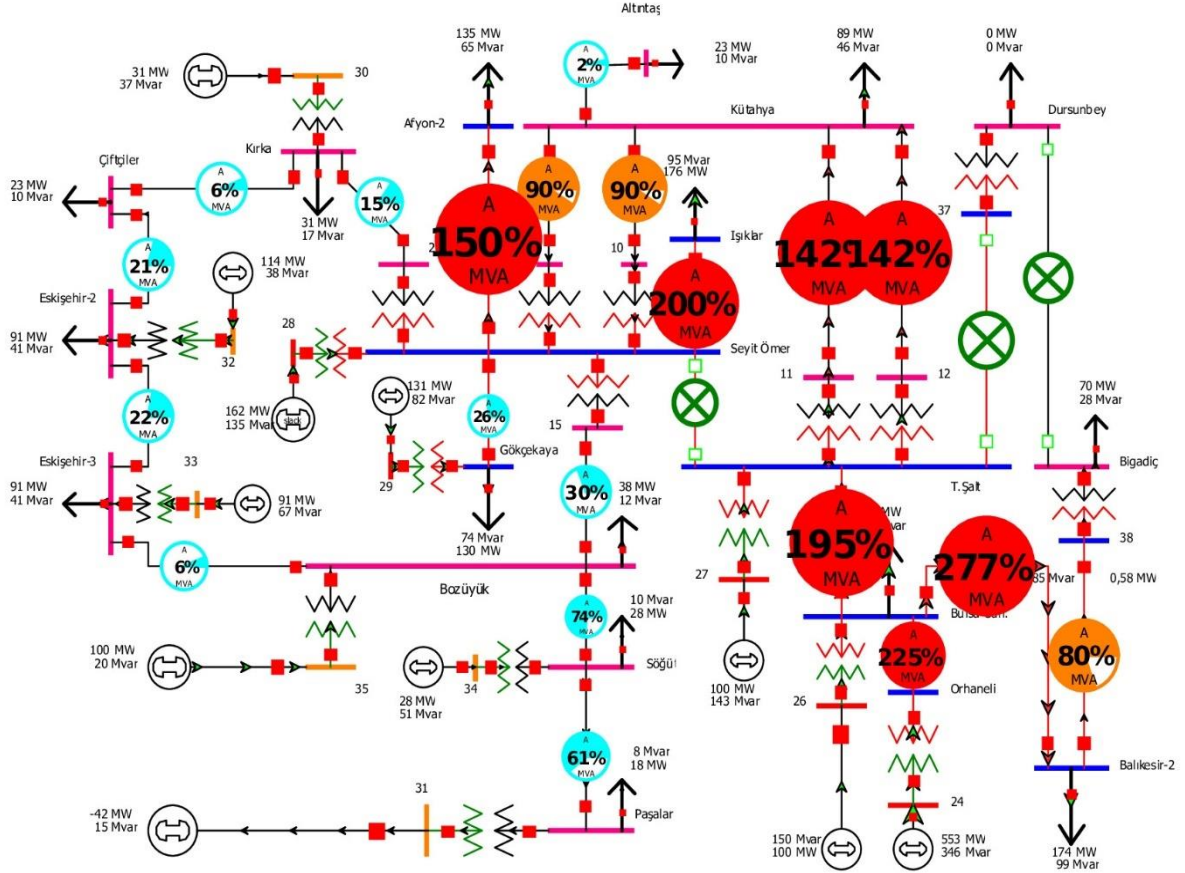
Şekil 5.3'te İç Batı Anadolu Bölgesine ait güç sistemin Power World simülasyon programı kapsamında modellenerek, sistem içerisinde dahil edilen sanal jeneratörler ile sistem tam yük kapasitesi ile çalışması ve muhtemel olumsuz senaryoların (bir veya birden fazla tesisin ve hataların devreden çıkması) oluşması durumunda sistem içerisindeki üretim santralleri veya tesislerinin, hatların ve yüklerin devreye alınıp çıkarılmasıyla oluşabilecek senaryolar sayesinde her bir bara da ki ve hattaki akım, gerilim, faz açıları, aktif ve reaktif güç kayıpları hesaplanmıştır. Sistem içerisinde meydana gelebilecek olası durumların çok sayıda olmasından dolayı, tüm senaryolar çalışmaya dahil edilmemiştir. Bu kapsamda sistem üzerinde oluşabilecek olumsuz senaryolarda sistemi büyük ölçüde etkileyebilecek senaryolar dahil edilmiştir (Doğanay vd., 2022:6). Güç sisteminde yük akışı analizinde sistem içerisinde arıza ve hata sonucu açma ihtimali olan santral, hat veya yüklerin devre dışı kalması sonucunda sistemdeki muhtemel senaryolar;







**Senaryo 4:** Güç sistemi içerisinde Seyit Ömer-T.Şalt ve T.Şalt-Dursunbey ve Dursunbey-Bigadiç hatlarının eş zamanlı olarak açması durumunda paralel yönde bağlı olan Kütahya-T.Şalt hatlarının aşırı yüklendiği ve Kütahya-T.Şalt hatlarında çekilen güç, sınır işletme koşullarına vardığı, Orhaneli-Bursa.San ve T.Şalt-Bursa San. ve Bursa San.-Balıkesir2 hatlarından çekilen gücün aşırı arttığı görülmüştür. Bu hatlardaki aşırı yüklenmeden dolayı sistemin kararlı olarak çalışmaya devam ettiği görülmüştür. Oluşturulan arıza senaryosuna ait güç sistemi görünümü Şekil 5.7’de verilmiştir.

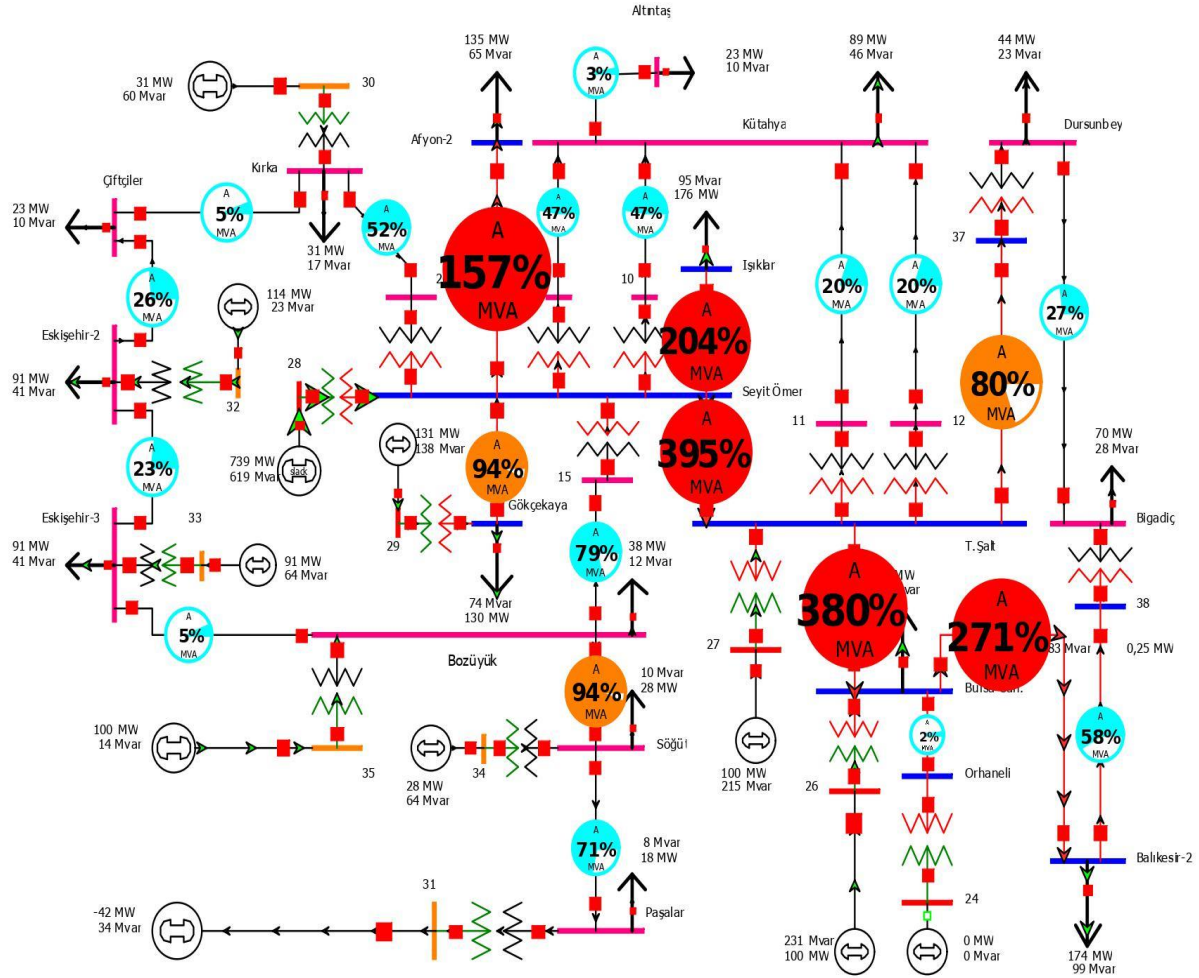


**Şekil 5.7.** 4 nolu arıza senaryo durumu

Bu senaryo durumunda T.Şalt-Dursunbey paralel bağlı olan hatların eş zamanlı olarak herhangi bir nedenden dolayı iletim sağlamaması durumunda Kütahya-T.Şalt hatlarında çekilen güç, sınır işletme koşullarına vardığı, buna rağmen sistem kararlı bir şekilde çalışmaya devam ettiği görülmüştür. Bu senaryo kapsamında işletme sınır koşullarını zorlamak adına T.Şalt-Dursunbey paralel bağlı olan hatların eş zamanlı olarak açık bırakılarak sistem üzerinde Seyit Ömer-T.Şalt hattının da arıza oluşması durumundaki analizde hattın kararlı bir şekilde çalışmaya devam edildiği görülmüştür. Fakat o bölgedeki diğer hatlarda aşırı yüklenmeden dolayı o bölgedeki aşırı yüklenmeyi engellemek için ilave olarak alternatif hatlar eklenebilir.



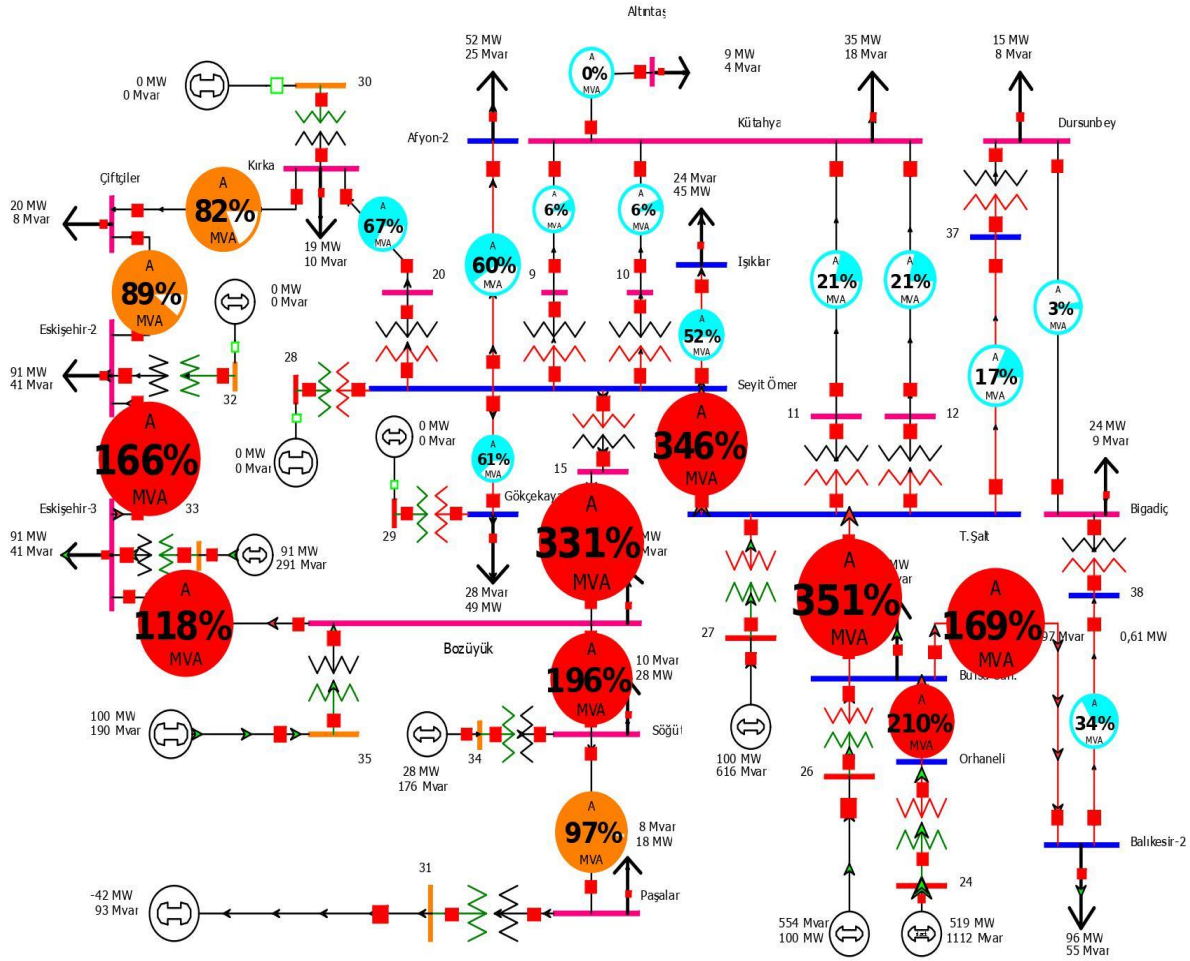
**Senaryo 6:** Güç sistemi içerisinde bulunan sanal jeneratörlerden, Orhaneli barasına bağlı olan jeneratörün devreden çıkması durumunda T.Şalt-Bursa San., Bursa San.-Balıkesir2 ve Seyit Ömer-T.Şalt hatlarından çekilen gücün aşırı artmasından dolayı sistemi kararsızlığa götürdüğü görülmüştür. Oluşturulan arıza senaryosuna ait güç sistemi görünümü Şekil 5.9'da verilmiştir.



**Şekil 5.9.** 6 nolu arıza senaryo durumu

Orhaneli barasının bulunduğu bölgede baralara bağlı olan yüklerin yüksek olmasından dolayı üretim yapan Orhaneli jeneratörünün devre dışı kalması durumunda o bölgede bulunan yükleri besleyebilmek için diğer hatlar üzerinde güç akışı sağlanmaya başlayacağından dolayı hatlarda oluşan aşırı yüklenmeden dolayı hatların açılmasıyla sistemde gerilim çökmesine neden olacağından dolayı sistem kararsızlığa gidecektir.

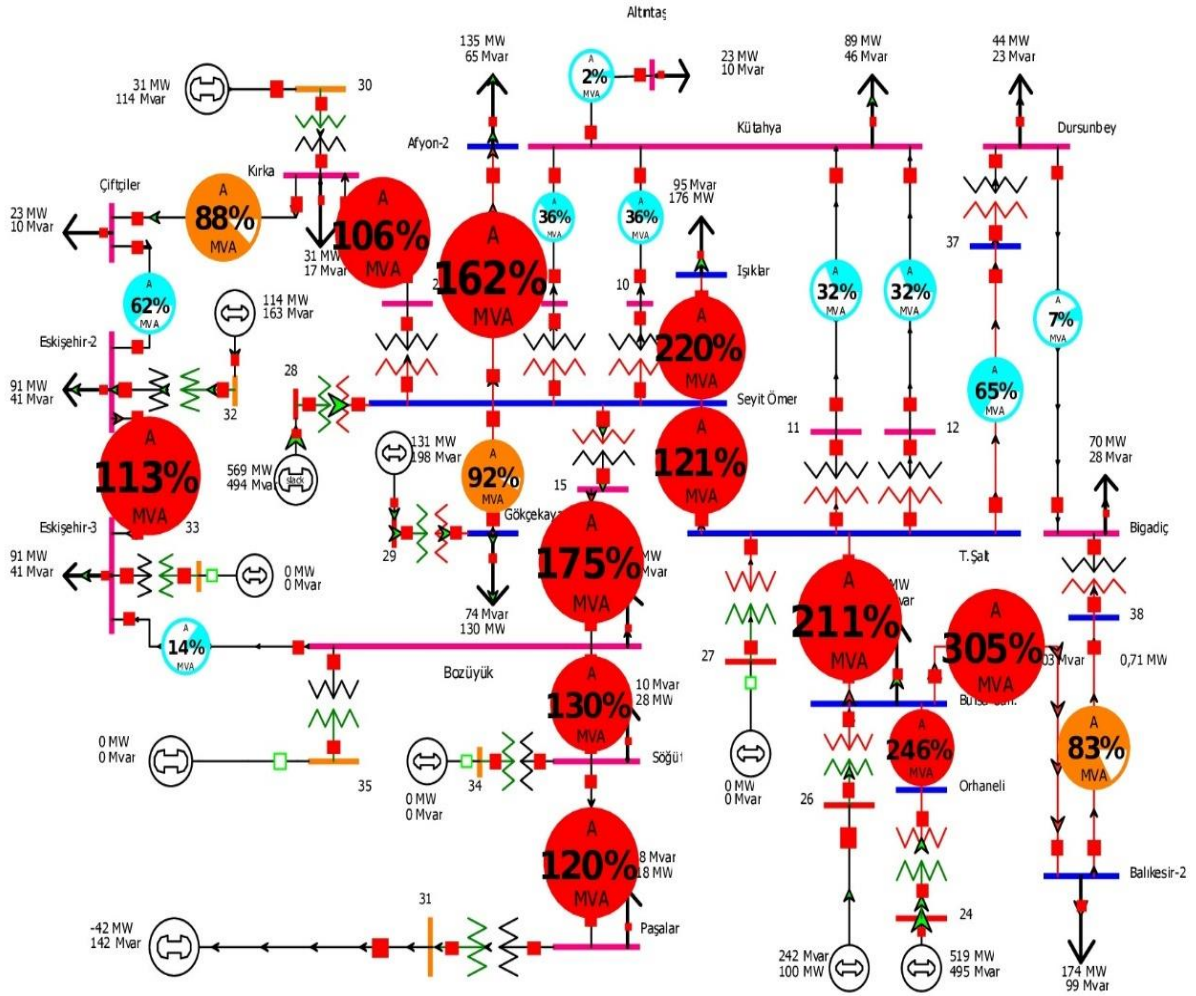
**Senaryo 7:** Güç sistemi içerisinde bulunan sanal jeneratörlerden, Kırka, Eskişehir2, Seyit Ömer ve Gökçekaya baralarına bağlı olan jeneratörlerin eş zamanlı olarak devreden çıkması durumunda, Eskişehir2-Eskişehir3, Eskişehir3-Bozüyük, Bozüyük-Sögüt ve Seyit Ömer-Bozüyük hatlarından çekilen gücün aşırı artmasından dolayı sistemi kararsızlığa götürdüğü görülmüştür. Oluşturulan arıza senaryosuna ait güç sistemi görünümü Şekil 5.10'da verilmiştir.



**Şekil 5.10.** 7 nolu arıza senaryo durumu

Göz şebekesi içerisinde bulunan Kırka, Eskişehir2, Seyit Ömer ve Gökçekaya baralarına bağlı olan jeneratörlerin eş zamanlı olarak devreden çıkması durumunda, göz şebekenin güç akışı çift yönlü besleme sağlayan hatlar üzerinde güç akışı sağlayacağından dolayı ve bu jeneratörlere bağlı diğer yüklerin sistemden çekilen güç artmasından dolayı üretilen gücün tüketilen gücü karşılamayacağından dolayı sistemde aşırı yüklenmeden dolayı sistem kararsızlığa götürecektir. Bu sebeple sisteme dahil edilecek olan yeni üretim tesisleri ile enerji sürekliliği sağlanabilir.

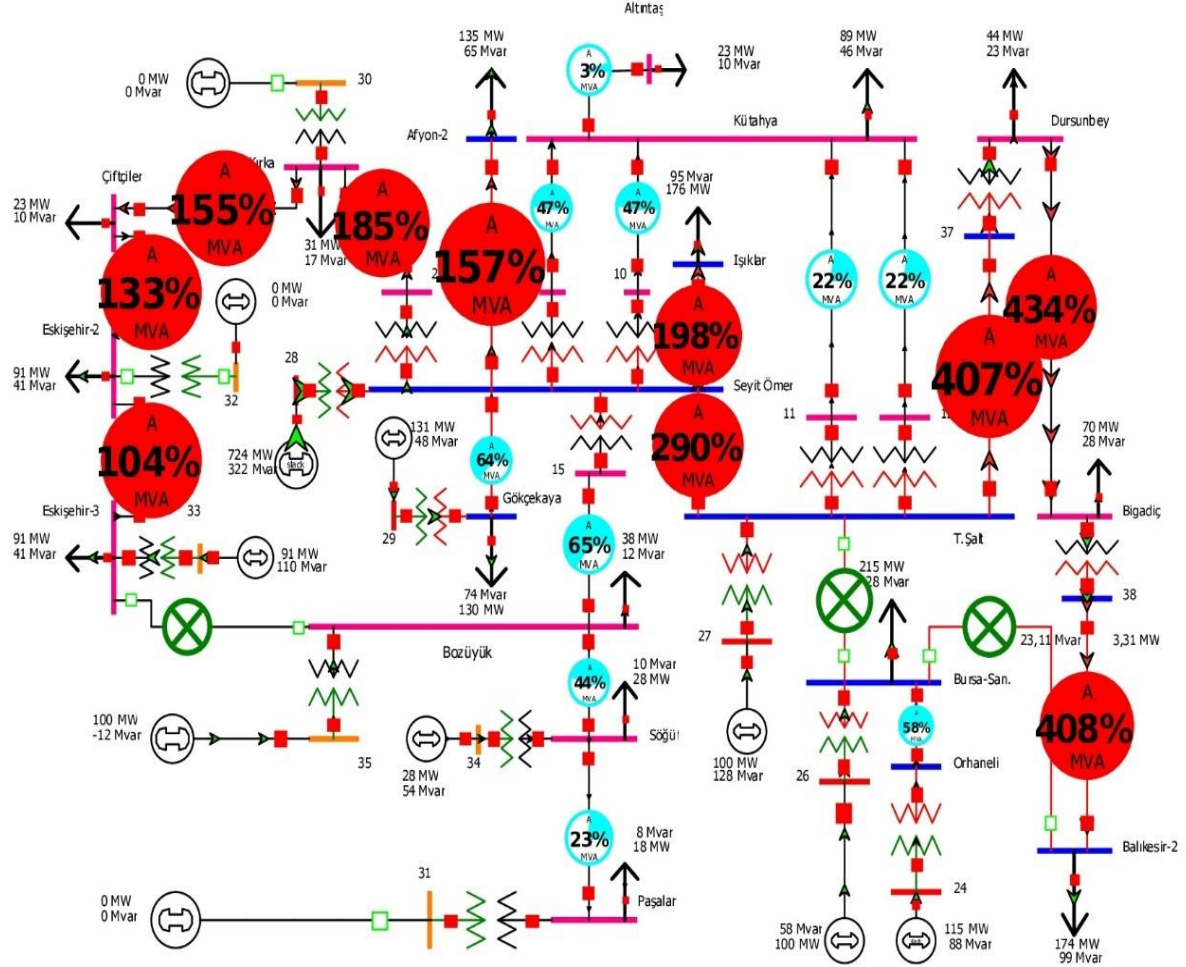
**Senaryo 8:** Güç sistemi içerisinde bulunan sanal jeneratörlerden, Söğüt, Eskişehir3, Bozüyük ve T.Şalt baralarına bağlı olan jeneratörlerin eş zamanlı olarak devreden çıkması durumunda, Eskişehir2-Eskişehir3, Kırka-Seyit Ömer, Bozüyük-Söğüt, Seyit Ömer-Bozüyük ve Söğüt-Paşalar hatlarından çekilen gücün aşırı artmasından dolayı sistemi kararsızlığa götürdüğü görülmüştür. Oluşturulan arıza senaryosuna ait güç sistemi görünümü Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11. 8 nolu arıza senaryo durumu

Söğüt, Eskişehir3, Bozüyük ve T.Şalt baralarına bağlı olan jeneratörlerin eş zamanlı olarak devreden çıkması durumunda, sistemden çekilen gücün diğer jeneratörler tarafından karşılanmamasından dolayı sistem bulunan hatlardaki aşırı yüklenmelerden dolayı her bir barada oluşacak olan gerilim düşümünden dolayı sistemi kararsızlığa götürmektedir.

**Senaryo 9:** Güç sistemi içerisinde bulunan sanal jeneratörlerden, Paşalar, Eskişehir2, ve Kırka baralarına bağlı olan jeneratörlerin devreden çıkması ile Eskişehir-Bozüyük, T.Şalt-Bursa San. ve Bursa San.-Balıkesir2 hatları eş zamanlı olarak açması durumunda sistemde çekilen gücün aşırı artmasından dolayı sistemi kararsızlığa götürdüğü görülmüştür. Oluşturulan arıza senaryosuna ait güç sistemi görünümü Şekil 5.12’de verilmiştir.



**Şekil 5.12.** 9 nolu arıza senaryo durumu

Bu senaryo durumunda ise sistemin işletme sınır koşullarını zorlamak için öncelikli olarak belli başlı bölgedeki jeneratörler devre dışı bırakılıp daha sonra aynı bölgede bulunan hatların açılması sistemin güç akışının sağlandığı görüldü. Daha sonra sistem üzerinde devre bırakılmış olan jeneratörler ile hatlar eş zamanlı olarak açık olması durumunda ilave olarak devre dışı bırakılan jeneratörler ile hatların devre dışı bırakılmasıyla sistemin en kötü arıza senaryo durumdaki sistemin işletme sınır şartları için güç akışı sağlatılmaya çalışılmıştır. Fakat belli bir süre sonra sistemin kararsızlığa gittiği gözlemlenmiştir.



### 5.3. İç Batı Anadolu Bölgesinin Enerji İletim Şebekesinde Simetrik ve Simetrik Olmayan Kısa Devre Analizleri

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre akımları, işletmenin normal koşullar altında çekilen akımdan çok daha büyük akım çekmektedir. Kısa devre anında çekilen akım işletmenin sınır koşullarını aşmaktadır. Bu sebeple kısa devre oluşumunun devam ettirilmesi, sistem içerisinde bulunan elemanların ve teçhizatların ısınmaya bağlı hasarların oluşmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda kısa devre esnasında iletkenler ve baralar da oluşan aşırı manyetik kuvvet etkisinden dolayı sistem içerisinde mekanik ve izolasyon hasarlarının oluşmasına neden olabilir. Bu hasarların sistem içerisinde meydana gelen kısa devre arızalarını, sisteme zarar vermesine önlemek ve engellemek için arızayı en kısa sürede tespit ederek sistemden izole edilmelidir.

Güç sistemlerinde kısa devre oluşumuna etki eden yıldırım çarpmaları, hat güzergahı üzerine ağaç devrilmesi, rüzgârın esmesi, aşırı buzlanma, taşıyıcı direklerin devrilmesi, izolasyon (izolatörler, parafudrlar, kauçuk vb.) malzemelerinin hasar görmesi ve delinmesi vb. faktörlere bağlı olarak kısa devre oluşumlarına neden olmaktadır. Olayın oluşumuna bağlı olarak meydana gelen kısa devre türleri ise;

- Tek faz-toprak kısa devre arızası
- Faz-faz kısa devre arızası
- İki-faz toprak kısa devre arızası
- Üç faz kısa devre arızası

Bu kapsamda sistem üzerinde en büyük hasar ve etkiyi oluşturan arıza türü ise üç faz kısa devre arızasıdır. Bu sebeple güç ağı içerisinde meydana gelebilecek üç faz kısa devre arıza durumunda sistemin korunması ve hasar görmesini önlemek için sisteme dahil edilecek olan koruyucu ve ölçme (röleler, kesiciler, ölçü trafoları vb.) elemanların seçimi bu tür arıza durumuna göre hesaplanıp seçilmelidir (Doğanay vd., 2022:8).

Bu kapsamda Şekil 5.3'teki güç sisteminin normal koşullar altında çalışması esnasında oluşabilecek olası arızalar sonucunda sistem içerisinde bulunan her bir hatta ve baraya ait faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak ve üç faz kısa devre arıza hesaplamaları yapılmıştır.

Tablo 5.3'te yer alan veriler güç sisteminde yer alan her bir hatta ait kısa devre hesaplamalarıdır. Hatlara ait kısa devre hesaplamaların simülatörde hattın %50'lik kısmında kısa devre olması durumuna göre kısa devre hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar da hattın kaçınıcı kilometresinde arazı olduğu değer değiştirilerek hesaplamalar tekrar yapılabilir. Ayrıca her bir hatta oluşan aktif ve reaktif güç kayıpları da hesaplanmıştır. Hatlardaki kısa devre

ve hat kayıpları yüklerin sabit olması kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır. Gerçek güç sistemlerin de yükler statik olmadığından dolayı hatlardan çekilen güç veya akım değerine bağlı olarak, kısa devre akımları ile güç kayıplar da farklılık gösterebilmektedir.

**Tablo 5.3.** Şekil 5.3'teki güç sistemine ait hatların simetrik ve simetrik olmayan kısa devre arıza hesaplamaları

Hattın Adı	Faz Adı	Faz-Toprak Kısa Devre Arızası	Faz-Faz Kısa Devre Arızası	İki faz- Toprak Kısa Devre Arızası	Üç faz Kısa Devre Arızası	Hattaki Aktif Kayıp Güç (MW)	Hattaki Reaktif Kayıp Güç (Mvar)
Seyit Ömer-Tutes Şalt	A	1297,550 (8,540 p.u.) $\angle 82^\circ$ A	0 A	0 A	3611,500 (23,770 p.u.) $\angle -63,60^\circ$ A	0,22	17,79
	B	0 A	3105,270 (20,438 p.u.) $\angle -153,35^\circ$ A	3254,700 (21,422 p.u.) $\angle -149^\circ$ A	3611,500 (23,770 p.u.) $\angle 176,40^\circ$ A		
	C	0 A	3105,270 (20,438 p.u.) $\angle 26,65^\circ$ A	2973,990 (19,574 p.u.) $\angle -21,93^\circ$ A	3611,500 (23,770 p.u.) $\angle 56,40^\circ$ A		
Işıklar-Seyit Ömer	A	1423,490 (9,369 p.u.) $\angle 80,41^\circ$ A	0 A	0 A	2033,690 (13,385 p.u.) $\angle -70,66^\circ$ A	2,87	90,51
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	1755,230 (11,553 p.u.) $\angle -160,49^\circ$ A	1911,840 (12,583 p.u.) $\angle -152,72^\circ$ A	2033,690 (13,385 p.u.) $\angle 169,34^\circ$ A		
	C	0 A	1755,230 (11,553 p.u.) $\angle 19,51^\circ$ A	1635,950 (10,767 p.u.) $\angle 10,48^\circ$ A	2033,690 (13,385 p.u.) $\angle 49,34^\circ$ A		
Seyit Ömer-Afyon2	A	1464,950 (9,642 p.u.) $\angle 76,81^\circ$ A	0 A	0 A	2809 (18,488 p.u.) $\angle -67,66^\circ$ A	0,62	41,31
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	2420,050 (15,928 p.u.) $\angle -157,44^\circ$ A	2578,190 (16,669 p.u.) $\angle -151,54^\circ$ A	2809 (18,488 p.u.) $\angle 172,34^\circ$ A		
	C	0 A	2420,050 (15,928 p.u.) $\angle 22,56^\circ$ A	2289,770 (15,071 p.u.) $\angle 15,97^\circ$ A	2809 (18,488 p.u.) $\angle 52,34^\circ$ A		
Seyit Ömer-Gökçekaya	A	1519 (9,998 p.u.) $\angle 73,73^\circ$ A	0 A	0 A	2989,9 (9,30 p.u.) $\angle -67,67^\circ$ A	0	47,7
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	2573,710 (16,940 p.u.) $\angle -157,45^\circ$ A	2751,190 (18,108 p.u.) $\angle -151,80^\circ$ A	2989,9 (9,679 p.u.) $\angle 172,33^\circ$ A		
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	2573,710 (16,940 p.u.) $\angle 22,55^\circ$ A	2423,350 (15,95 p.u.) $\angle 16,20^\circ$ A	2989,9 (9,679 p.u.) $\angle 52,33^\circ$ A		
Bursa San.-Tunçbilek Şalt	A	1423,490 (9,369 p.u.) $\angle 80,11^\circ$ A	0 A	0 A	3334,94 (21,95 p.u.) $\angle -62,79^\circ$ A	0,42	34,26
	B	0 A	2868,47 (18,88 p.u.) $\angle -152,155^\circ$ A	3487 (19,98 p.u.) $\angle -147,6^\circ$ A	3334,94 (21,95 p.u.) $\angle 177,21^\circ$ A		
	C	0 A	2868,47 (18,88 p.u.) $\angle 27,45^\circ$ A	2723,73 (17,927 p.u.) $\angle 21,99^\circ$ A	3334,94 (21,95 p.u.) $\angle 57,21^\circ$ A		
Balıkesir2-Bursa San.	A	1816,44 (11,955 p.u.) $\angle 68,39^\circ$ A	0 A	0 A	2589,4 (17,043 p.u.) $\angle -64,19^\circ$ A	2,32	24,32
	B	0 $\angle 180^\circ$ A	2230,94 (14,684 p.u.) $\angle -153,98^\circ$ A	2460,01 (16,191 p.u.) $\angle -147,13^\circ$ A	2589,4 (17,043 p.u.) $\angle 175,81^\circ$ A		
	C	0 A	2230,94 (14,684 p.u.) $\angle 26,02^\circ$ A	2039,46 (13,423 p.u.) $\angle 17,82^\circ$ A	2589,4 (17,043 p.u.) $\angle 55,81^\circ$ A		
Kütahya-Seyit Ömer (Hat-1 ve Hat-2)	A	52,488 (0,140 p.u.) $\angle 87,29^\circ$ A	0 A	0 A	3983,85 (10,626 p.u.) $\angle -74,66^\circ$ A	2*(0,1)	2*(0,78)
	B	0 A	3441,3 (9,179 p.u.) $\angle -164,51^\circ$ A	3445,4 (9,190 p.u.) $\angle -164,31^\circ$ A	3983,85 (10,626 p.u.) $\angle 165,34^\circ$ A		
	C	0 A	3441,3 (9,179 p.u.) $\angle 15,49^\circ$ A	3437 (9,168 p.u.) $\angle 15,28^\circ$ A	3983,85 (10,626 p.u.) $\angle 45,34^\circ$ A		
Tunçbilek Şalt-Kütahya (Hat-1 ve Hat-2)	A	52,875 (0,141 p.u.) $\angle 87,77^\circ$ A	0 A	0 A	3406,69 (9,087 p.u.) $\angle -74,16^\circ$ A	2*(0,3)	2*(2,1)
	B	0 A	2943,67 (7,852 p.u.) $\angle -164,04^\circ$ A	2947,79 (7,863 p.u.) $\angle -163,79^\circ$ A	3406,69 (9,087 p.u.) $\angle 165,84^\circ$ A		
	C	0 A	2943,67 (7,852 p.u.) $\angle 15,96^\circ$ A	2939,58 (7,841 p.u.) $\angle 15,72^\circ$ A	3406,69 (9,087 p.u.) $\angle 45,84^\circ$ A		
Kütahya-Altıntaş TM	A	76,978 (0,205 p.u.) $\angle 86,58^\circ$ A	0 A	0 A	2626,25 (7,005 p.u.) $\angle -73,78^\circ$ A	0	2,94
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	2270,5 (6,056 p.u.) $\angle -163,68^\circ$ A	2276,93 (6,073 p.u.) $\angle -163,23^\circ$ A	2626,25 (7,005 p.u.) $\angle 166,22^\circ$ A		
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	2270,5 (6,056 p.u.) $\angle 16,32^\circ$ A	2264,2 (6,039 p.u.) $\angle 15,87^\circ$ A	2626,25 (7,005 p.u.) $\angle 46,22^\circ$ A		
Tunçbilek Şalt-Dursunbey	A	2852,57 (18,775 p.u.) $\angle 4,01^\circ$ A	0 A	0 A	1428,3 (9,401 p.u.) $\angle -72,66^\circ$ A	1,33	2,44
	B	0 A	1234,02 (8,122 p.u.) $\angle -162,53^\circ$ A	1795,22 (11,816 p.u.) $\angle -151,04^\circ$ A	1428,3 (9,401 p.u.) $\angle 167,34^\circ$ A		
	C	0 A	1234,02 (8,122 p.u.) $\angle 17,47^\circ$ A	793,203 (5,221 p.u.) $\angle -9,14^\circ$ A	1428,3 (9,401 p.u.) $\angle 47,34^\circ$ A		
Bigadiç-Dursunbey	A	19,224 (0,051 p.u.) $\angle 81,25^\circ$ A	0 A	0 A	2255,75 (6,017 p.u.) $\angle -78,77^\circ$ A	0,02	1,95
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	1951,57 (5,206 p.u.) $\angle -168,67^\circ$ A	1953,22 (9,30 p.u.) $\angle -168,54^\circ$ A	2255,75 (6,017 p.u.) $\angle 161,23^\circ$ A		
	C	0 $\angle 180^\circ$ A	1951,57 (5,206 p.u.) $\angle 11,33^\circ$ A	1949,92 (5,201 p.u.) $\angle 11,2^\circ$ A	2255,75 (6,017 p.u.) $\angle 41,23^\circ$ A		
Bursa San.-Orhaneli	A	1307,89 (8,608 p.u.) $\angle 23,04^\circ$ A	0 A	0 A	1922,07 (12,651 p.u.) $\angle -66,99^\circ$ A	4,91	22,05
	B	0 $\angle 26,57^\circ$ A	1658,19 (10,914 p.u.) $\angle -156,82^\circ$ A	1955,68 (12,872 p.u.) $\angle -153,9^\circ$ A	1922,07 (12,651 p.u.) $\angle 173,01^\circ$ A		
	C	0 $\angle 63,43^\circ$ A	1658,19 (10,914 p.u.) $\angle 23,18^\circ$ A	1367,32 (8,999 p.u.) $\angle 19,06^\circ$ A	1922,07 (12,651 p.u.) $\angle 53,01^\circ$ A		
Seyit Ömer-Bozüyük	A	200,019 (0,534 p.u.) $\angle 108,86^\circ$ A	0 A	0 A	4510,03 (12,03 p.u.) $\angle -59,49^\circ$ A	6,33	28,3
	B	0 A	3887,02 (10,368 p.u.) $\angle -149,43^\circ$ A	3897,02 (10,395 p.u.) $\angle -148,72^\circ$ A	4510,03 (12,03 p.u.) $\angle -179,49^\circ$ A		
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	3887,02 (10,368 p.u.) $\angle 30,157^\circ$ A	3877,36 (10,342 p.u.) $\angle 29,86^\circ$ A	4510,03 (12,03 p.u.) $\angle 60,51^\circ$ A		
Söğüt-Bozüyük	A	206,932 (0,552 p.u.) $\angle 115,78^\circ$ A	0 A	0 A	5567,09 (14,849 p.u.) $\angle -52,66^\circ$ A	2,88	8,26
	B	0 $\angle 180^\circ$ A	4780,44 (12,751 p.u.) $\angle -142,59^\circ$ A	4790,67 (12,778 p.u.) $\angle -141,98^\circ$ A	5567,09 (14,849 p.u.) $\angle -172,66^\circ$ A		
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	4780,44 (12,751 p.u.) $\angle 37,41^\circ$ A	4770,26 (12,724 p.u.) $\angle 36,81^\circ$ A	5567,09 (14,849 p.u.) $\angle 67,34^\circ$ A		
Söğüt-Paşalar	A	218,04 (0,587 p.u.) $\angle 118,34^\circ$ A	0 A	0 A	4278,07 (11,411 p.u.) $\angle -49,3^\circ$ A	1,29	2,11
	B	0 A	3674,26 (9,801 p.u.) $\angle -139,25^\circ$ A	3685,68 (9,831 p.u.) $\angle -138,43^\circ$ A	4278,07 (11,411 p.u.) $\angle -169,31^\circ$ A		
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	3674,26 (9,801 p.u.) $\angle 40,75^\circ$ A	3663,09 (9,771 p.u.) $\angle 39,94^\circ$ A	4278,07 (11,411 p.u.) $\angle 70,70^\circ$ A		
Kırka-Seyit Ömer	A	204,77 (0,546 p.u.) $\angle 99,6^\circ$ A	0 A	0 A	3187,73 (8,503 p.u.) $\angle -66,27^\circ$ A	3,67	7,73
	B	0 $\angle 180^\circ$ A	2749,02 (7,333 p.u.) $\angle -156,2^\circ$ A	2761,25 (7,365 p.u.) $\angle -155,19^\circ$ A	3187,73 (8,503 p.u.) $\angle 173,73^\circ$ A		
	C	0 $\angle 180^\circ$ A	2749,02 (7,333 p.u.) $\angle 23,8^\circ$ A	2737,42 (7,302 p.u.) $\angle 22,79^\circ$ A	3187,73 (8,503 p.u.) $\angle 53,73^\circ$ A		
Çifteler-Kırka	A	200,765 (0,536 p.u.) $\angle 104,84^\circ$ A	0 A	0 A	3136,64 (8,367 p.u.) $\angle -60,49^\circ$ A	0,21	1,81
	B	0 A	2702,73 (7,209 p.u.) $\angle -150,41^\circ$ A	2715,16 (7,242 p.u.) $\angle -149,41^\circ$ A	3136,64 (8,367 p.u.) $\angle 179,51^\circ$ A		
	C	0 A	2702,73 (7,209 p.u.) $\angle 29,59^\circ$ A	2690,88 (7,178 p.u.) $\angle 28,58^\circ$ A	3136,64 (8,367 p.u.) $\angle 59,51^\circ$ A		
Çifteler-Eskişehir2	A	198,727 (0,53 p.u.) $\angle 108,2^\circ$ A	0 A	0 A	3253,14 (8,677 p.u.) $\angle -55,58^\circ$ A	1,15	0,2
	B	0 $\angle 116,57^\circ$ A	2803,79 (7,479 p.u.) $\angle -145,51^\circ$ A	2817,32 (7,515 p.u.) $\angle 144,56^\circ$ A	3253,14 (8,677 p.u.) $\angle -175,58^\circ$ A		
	C	0 $\angle 153,43^\circ$ A	2803,79 (7,479 p.u.) $\angle 34,49^\circ$ A	2790,79 (7,444 p.u.) $\angle 33,53^\circ$ A	3253,14 (8,677 p.u.) $\angle 64,43^\circ$ A		
Eskişehir2-Eskişehir3	A	200,717 (0,535 p.u.) $\angle 111,46^\circ$ A	0 A	0 A	4525,74 (12,072 p.u.) $\angle -53,83^\circ$ A	0,3	1,35
	B	0 $\angle 180^\circ$ A	3892,78 (10,383 p.u.) $\angle -143,74^\circ$ A	3905,35 (10,417 p.u.) $\angle -143,04^\circ$ A	4525,74 (12,072 p.u.) $\angle -173,84^\circ$ A		
	C	0 $\angle 180^\circ$ A	3892,78 (10,383 p.u.) $\angle 36,26^\circ$ A	3880,46 (10,351 p.u.) $\angle 35,55^\circ$ A	4525,74 (12,072 p.u.) $\angle 66,17^\circ$ A		
Eskişehir3-Bozüyük	A	202,31 (0,54 p.u.) $\angle 113,26^\circ$ A	0 A	0 A	5200,51 (13,872 p.u.) $\angle -52,85^\circ$ A	0,32	1,36
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	4472,26 (11,929 p.u.) $\angle -142,78^\circ$ A	4484,22 (11,961 p.u.) $\angle -142,16^\circ$ A	5200,51 (13,872 p.u.) $\angle -172,85^\circ$ A		
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	4472,26 (11,929 p.u.) $\angle 37,22^\circ$ A	4460,44 (11,898 p.u.) $\angle 36,59^\circ$ A	5200,51 (13,872 p.u.) $\angle 67,15^\circ$ A		
Balıkesir2-Bigadiç	A	2808,96 (18,488 p.u.) $\angle 12,76^\circ$ A	0 A	0 A	1615,62 (10,634 p.u.) $\angle -71,21^\circ$ A	0,37	1,93
	B	0 A	1395,59 (9,186 p.u.) $\angle -161,06^\circ$ A	1873,53 (12,331 p.u.) $\angle -150,53^\circ$ A	1615,62 (10,634 p.u.) $\angle 168,79^\circ$ A		
	C	0 A	1395,59 (9,186 p.u.) $\angle 18,94^\circ$ A	1008,5 (6,638 p.u.) $\angle -0,74^\circ$ A	1615,62 (10,634 p.u.) $\angle 48,79^\circ$ A		

Tablo 5,4'te ise yer alan veriler güç sisteminde yer alan her bir baraya ait kısa devre hesaplamalarıdır. Ayrıca her bir baradaki gerilim düşümü hesaplamaları yapılmıştır. Gerilim düşümü değerleri yüksek gerilim tarafı olan 380 kV gerilim değeri ve alçak gerilim tarafı ise 154 kV gerilim değerlerinin baz alınması ile ölçümler alınmıştır. Baralardaki kısa devre ve gerilim düşümü, yüklerin sabit olması kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır. Gerçek güç sistemlerin de yükler statik olmadığından dolayı hatlardan çekilen güç veya akım değerine bağlı olarak, kısa devre akımları ile gerilim düşümü değerleri farklılık gösterebilmektedir.

**Tablo 5.4.** Şekil 5.3'teki güç sistemine ait baraların simetrik ve simetrik olmayan kısa devre arıza hesaplamaları

Baranın Adı	Faz Adı	Faz-Toprak Kısa Devre Arızası	Faz-Faz Kısa Devre Arızası	İki faz- Toprak Kısa Devre Arızası	Üç faz Kısa Devre Arızası	Bara gerilim düşümü
Seyit Ömer	A	1373,58 (9,041 p.u.) $\angle 81,88^\circ$ A	0 A	0 A	3707,5 (24,402 p.u.) $\angle -65,79^\circ$ A	354,31 (0,9324 p.u.) $\angle 0,15^\circ$ kV
	B	0 $\angle 180^\circ$ A	3184,77 (20,961 p.u.) $\angle -155,53^\circ$ A	3333,74 (21,942 p.u.) $\angle -150,93^\circ$ A	3707,5 (24,402 p.u.) $\angle 174,51^\circ$ A	
	C	0 A	3184,77 (20,961 p.u.) $\angle 24,17^\circ$ A	3055,85 (20,113 p.u.) $\angle 19,55^\circ$ A	3707,5 (24,402 p.u.) $\angle 54,51^\circ$ A	
Afyon2	A	1922,54 (12,654 p.u.) $\angle 68,51^\circ$ A	0 A	0 A	2329,06 (15,329 p.u.) $\angle -71,48^\circ$ A	348,41 (0,9169 p.u.) $\angle -1,95^\circ$ kV
	B	0 $\angle 180^\circ$ A	2007,72 (13,214 p.u.) $\angle -161,29^\circ$ A	2203,66 (14,504 p.u.) $\angle -153,05^\circ$ A	2329,06 (15,329 p.u.) $\angle 168,51^\circ$ A	
	C	0 $\angle 180^\circ$ A	2007,72 (13,214 p.u.) $\angle 18,71^\circ$ A	1860,13 (12,243 p.u.) $\angle 9,01^\circ$ A	2329,06 (15,329 p.u.) $\angle 48,52^\circ$ A	
Işıklar	A	2163,8 (14,242 p.u.) $\angle 49,16^\circ$ A	0 A	0 A	1461,79 (9,621 p.u.) $\angle -74,42^\circ$ A	335,33 (0,8825 p.u.) $\angle -7,35^\circ$ kV
	B	0 $\angle 159,44^\circ$ A	1262,84 (8,312 p.u.) $\angle -164,27^\circ$ A	1484,41 (9,77 p.u.) $\angle -152,76^\circ$ A	1461,79 (9,621 p.u.) $\angle 165,58^\circ$ A	
	C	0 $\angle 180^\circ$ A	1262,84 (8,312 p.u.) $\angle 15,73^\circ$ A	1110,73 (7,311 p.u.) $\angle 0,33^\circ$ A	1461,79 (9,621 p.u.) $\angle 45,58^\circ$ A	
Tunçbük Salt	A	1457,41 (9,592 p.u.) $\angle 81,19^\circ$ A	0 A	0 A	3681,22 (24,229 p.u.) $\angle -65,62^\circ$ A	354,94 (0,934 p.u.) $\angle 0,86^\circ$ kV
	B	0 $\angle -90^\circ$ A	3161,64 (20,809 p.u.) $\angle -155,36^\circ$ A	3321,07 (21,859 p.u.) $\angle -150,56^\circ$ A	3681,22 (24,229 p.u.) $\angle 174,38^\circ$ A	
	C	0 $\angle -90^\circ$ A	3161,64 (20,809 p.u.) $\angle 24,64^\circ$ A	3024,46 (19,906 p.u.) $\angle 19,44^\circ$ A	3681,22 (24,229 p.u.) $\angle 54,38^\circ$ A	
Bursa San.	A	1686,24 (11,099 p.u.) $\angle 77,71^\circ$ A	0 A	0 A	3353,59 (22,073 p.u.) $\angle -64,27^\circ$ A	351,36 (0,9246 p.u.) $\angle 2,46^\circ$ kV
	B	0 A	2880,55 (18,959 p.u.) $\angle -154,02^\circ$ A	3075,85 (19,98 p.u.) $\angle -148,35^\circ$ A	3353,59 (22,073 p.u.) $\angle 175,53^\circ$ A	
	C	0 A	2880,55 (18,959 p.u.) $\angle 25,98^\circ$ A	2714,83 (17,868 p.u.) $\angle 19,15^\circ$ A	3353,59 (22,073 p.u.) $\angle 55,73^\circ$ A	
Balıkesir2	A	2479,71 (16,321 p.u.) $\angle 51,55^\circ$ A	0 A	0 A	2282,51 (15,023 p.u.) $\angle -68,37^\circ$ A	336,57 (0,8857 p.u.) $\angle -1,28^\circ$ kV
	B	0 $\angle -90^\circ$ A	1967,04 (12,947 p.u.) $\angle -158,17^\circ$ A	2289,49 (15,069 p.u.) $\angle -149,29^\circ$ A	2282,51 (15,023 p.u.) $\angle 171,63^\circ$ A	
	C	0 A	1967,04 (12,947 p.u.) $\angle 21,83^\circ$ A	1707,53 (11,209 p.u.) $\angle 9,99^\circ$ A	2282,51 (15,023 p.u.) $\angle 51,63^\circ$ A	
Gökçekaya	A	1973,36 (12,988 p.u.) $\angle 60,31^\circ$ A	0 A	0 A	2613,37 (17,201 p.u.) $\angle -71,19^\circ$ A	353,54 (0,9304 p.u.) $\angle 0,17^\circ$ kV
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	2249,1 (14,823 p.u.) $\angle -160,98^\circ$ A	2496,09 (16,429 p.u.) $\angle -153,75^\circ$ A	2613,37 (17,201 p.u.) $\angle 168,81^\circ$ A	
	C	0 A	2249,1 (14,823 p.u.) $\angle 19,02^\circ$ A	2044,52 (13,457 p.u.) $\angle 10,26^\circ$ A	2613,37 (17,201 p.u.) $\angle 48,81^\circ$ A	
Kütahya	A	79,816 (0,213 p.u.) $\angle 86,91^\circ$ A	0 A	0 A	4454,44 (11,882 p.u.) $\angle -74,48^\circ$ A	139,19 (0,9038 p.u.) $\angle -2,83^\circ$ kV
	B	0 A	3844,72 (10,255 p.u.) $\angle -164,31^\circ$ A	3851,13 (10,272 p.u.) $\angle -164,03^\circ$ A	4454,44 (11,882 p.u.) $\angle 165,52^\circ$ A	
	C	0 A	3844,72 (10,255 p.u.) $\angle 15,69^\circ$ A	3838,35 (10,238 p.u.) $\angle 15,41^\circ$ A	4454,44 (11,882 p.u.) $\angle 45,53^\circ$ A	
Atıntaş TM	A	82,849 (0,221 p.u.) $\angle 86,18^\circ$ A	0 A	0 A	1969,9 (5,254 p.u.) $\angle -74,52^\circ$ A	139,42 (0,9053 p.u.) $\angle -2,86^\circ$ kV
	B	0 A	1703,42 (4,544 p.u.) $\angle -164,45^\circ$ A	1710,15 (4,562 p.u.) $\angle -163,80^\circ$ A	1969,9 (5,254 p.u.) $\angle 165,48^\circ$ A	
	C	0 A	1703,42 (4,544 p.u.) $\angle 15,55^\circ$ A	1696,87 (4,526 p.u.) $\angle 14,91^\circ$ A	1969,9 (5,254 p.u.) $\angle 45,48^\circ$ A	
Dursunbey	A	20,645 (0,055 p.u.) $\angle 81,08^\circ$ A	0 A	0 A	2122,58 (5,662 p.u.) $\angle -79,37^\circ$ A	127,71 (0,8293 p.u.) $\angle -8,8^\circ$ kV
	B	0 $\angle -90^\circ$ A	1835,97 (4,897 p.u.) $\angle -169,27^\circ$ A	1837,7 (4,902 p.u.) $\angle -169,12^\circ$ A	2122,58 (5,662 p.u.) $\angle 160,63^\circ$ A	
	C	0 A	1835,97 (4,897 p.u.) $\angle 10,73^\circ$ A	1834,24 (4,893 p.u.) $\angle 10,58^\circ$ A	2122,58 (5,662 p.u.) $\angle 40,63^\circ$ A	
Bigadiç	A	20,625 (0,055 p.u.) $\angle 80,44^\circ$ A	0 A	0 A	2248,2 (5,997 p.u.) $\angle -79,27^\circ$ A	126,93 (0,8246 p.u.) $\angle -9,35^\circ$ kV
	B	0 $\angle -90^\circ$ A	1944,51 (5,187 p.u.) $\angle -169,17^\circ$ A	1946,31 (5,192 p.u.) $\angle -169,03^\circ$ A	2248,2 (5,997 p.u.) $\angle 160,43^\circ$ A	
	C	0 $\angle -90^\circ$ A	1944,51 (5,187 p.u.) $\angle 10,83^\circ$ A	1942,73 (5,182 p.u.) $\angle 10,69^\circ$ A	2248,2 (5,997 p.u.) $\angle 40,43^\circ$ A	
Orhaneli	A	920,308 (6,07 p.u.) $\angle 7,5^\circ$ A	0 A	0 A	1897,13 (12,487 p.u.) $\angle -66,36^\circ$ A	367,15 (0,9662 p.u.) $\angle 0,9067^\circ$ kV
	B	0 $\angle 26,57^\circ$ A	1633,8 (10,753 p.u.) $\angle -156,19^\circ$ A	1874,93 (12,340 p.u.) $\angle -156,47^\circ$ A	1897,13 (12,487 p.u.) $\angle 173,64^\circ$ A	
	C	0 $\angle 63,43^\circ$ A	1633,8 (10,753 p.u.) $\angle 23,81^\circ$ A	1393,61 (9,172 p.u.) $\angle 24,25^\circ$ A	1897,13 (12,487 p.u.) $\angle 53,64^\circ$ A	
Bozüyük	A	203,651 (0,543 p.u.) $\angle 112,87^\circ$ A	0 A	0 A	6224,71 (16,604 p.u.) $\angle -55,97^\circ$ A	148,68 (0,9654 p.u.) $\angle 24,01^\circ$ kV
	B	0 A	5343,89 (14,254 p.u.) $\angle -145,89^\circ$ A	5353,64 (14,28 p.u.) $\angle -145,35^\circ$ A	6224,71 (16,604 p.u.) $\angle 175,97^\circ$ A	
	C	0 $\angle -90^\circ$ A	5343,89 (14,254 p.u.) $\angle 34,11^\circ$ A	5334,11 (14,288 p.u.) $\angle 33,58^\circ$ A	6224,71 (16,604 p.u.) $\angle 64,03^\circ$ A	
Kırka	A	206,513 (0,551 p.u.) $\angle 102,74^\circ$ A	0 A	0 A	3613,32 (9,638 p.u.) $\angle -64,23^\circ$ A	146,48 (0,9512 p.u.) $\angle 14,46^\circ$ kV
	B	0 $\angle 90^\circ$ A	3108,41 (8,291 p.u.) $\angle -154,13^\circ$ A	3119,87 (8,322 p.u.) $\angle -153,23^\circ$ A	3613,32 (9,638 p.u.) $\angle -175,77^\circ$ A	
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	3108,41 (8,291 p.u.) $\angle 25,87^\circ$ A	3097,37 (8,322 p.u.) $\angle 24,96^\circ$ A	3613,32 (9,638 p.u.) $\angle 55,77^\circ$ A	
Çifteler	A	199,696 (0,533 p.u.) $\angle 104,9^\circ$ A	0 A	0 A	3034,78 (8,095 p.u.) $\angle -59,21^\circ$ A	145,25 (0,9432 p.u.) $\angle 16,16^\circ$ kV
	B	0 $\angle -90^\circ$ A	2616,28 (6,979 p.u.) $\angle -149,15^\circ$ A	2629,59 (7,014 p.u.) $\angle -148,12^\circ$ A	3034,78 (8,095 p.u.) $\angle 179,21^\circ$ A	
	C	0 $\angle -90^\circ$ A	2616,28 (6,979 p.u.) $\angle 30,85^\circ$ A	2603,58 (6,945 p.u.) $\angle 29,83^\circ$ A	3034,78 (8,095 p.u.) $\angle 60,79^\circ$ A	
Eskişehir2	A	199,922 (0,533 p.u.) $\angle 109,41^\circ$ A	0 A	0 A	4423,73 (11,8 p.u.) $\angle -55,63^\circ$ A	147,32 (0,9566 p.u.) $\angle 20,43^\circ$ kV
	B	0 $\angle 63,43^\circ$ A	3802,74 (10,143 p.u.) $\angle -145,52^\circ$ A	3815,46 (10,177 p.u.) $\angle -144,81^\circ$ A	4423,73 (11,8 p.u.) $\angle -175,63^\circ$ A	
	C	0 $\angle 90^\circ$ A	3802,74 (10,143 p.u.) $\angle 34,48^\circ$ A	3790,23 (10,110 p.u.) $\angle 33,76^\circ$ A	4423,73 (11,8 p.u.) $\angle 64,37^\circ$ A	
Eskişehir3	A	203,237 (0,542 p.u.) $\angle 111,18^\circ$ A	0 A	0 A	5243,18 (13,985 p.u.) $\angle -54,25^\circ$ A	149,09 (0,9631 p.u.) $\angle 22,25^\circ$ kV
	B	0 $\angle -63,43^\circ$ A	4505 (12,016 p.u.) $\angle -144,15^\circ$ A	4517,63 (12,05 p.u.) $\angle -143,53^\circ$ A	5243,18 (13,985 p.u.) $\angle -174,25^\circ$ A	
	C	0 $\angle -90^\circ$ A	4505 (12,016 p.u.) $\angle 35,85^\circ$ A	4492,48 (11,983 p.u.) $\angle 35,23^\circ$ A	5243,18 (13,985 p.u.) $\angle 65,75^\circ$ A	
Sığıt	A	213,4 (0,569 p.u.) $\angle 115,96^\circ$ A	0 A	0 A	5316,9 (14,182 p.u.) $\angle -52,92^\circ$ A	152,48 (0,9901 p.u.) $\angle 27,51^\circ$ kV
	B	0 A	4562,19 (12,169 p.u.) $\angle -142,85^\circ$ A	4572,33 (12,196 p.u.) $\angle -142,2^\circ$ A	5316,9 (14,182 p.u.) $\angle -172,92^\circ$ A	
	C	0 $\angle -90^\circ$ A	4562,19 (12,169 p.u.) $\angle 37,15^\circ$ A	4552,1 (12,142 p.u.) $\angle 36,50^\circ$ A	5316,9 (14,182 p.u.) $\angle 67,08^\circ$ A	
Paşalar	A	224,775 (0,6 p.u.) $\angle 118,05^\circ$ A	0 A	0 A	3762,33 (10,035 p.u.) $\angle -49,54^\circ$ A	153,65 (0,9977 p.u.) $\angle 30,48^\circ$ kV
	B	0 $\angle 180^\circ$ A	3230,4 (8,617 p.u.) $\angle -139,47^\circ$ A	3242,21 (8,648 p.u.) $\angle -138,52^\circ$ A	3762,33 (10,035 p.u.) $\angle -169,54^\circ$ A	
	C	0 $\angle 156,37^\circ$ A	3230,4 (8,617 p.u.) $\angle 40,53^\circ$ A	3218,98 (8,586 p.u.) $\angle 39,57^\circ$ A	3762,33 (10,035 p.u.) $\angle 70,46^\circ$ A	

Güç sistemi içerisinde oluşan faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak ve üç faz kısa devre arızalarının sistem üzerinde en büyük etki ve hasarı bırakan üç faz simetrik arıza durumudur. Sistem içerisinde oluşabilecek üç faz simetrik arızanın sistem üzerinde büyük ve kalıcı hasarların oluşmasını önlemek için koruma ve akımı sınırlamak için, hızlı tepkin veren ve simetrik arızayı kesebilecek olan devre elemanı olan kesici kullanılmalıdır. Sisteme dahil edilmek için seçilen kesicinin gücü ( $S_a$ ), simetrik kısa devre arıza gücünü açması gerekir.

Uygulama kapsamında güç akış analizi ve arıza analizi yapılan, Bölgeye ait baraların üç faz simetrik kısa devre hesaplamaları Tablo 5.4'te verilmiştir. Bu kapsamda üç faz kısa devre arıza akımlarının elde edilmesiyle sisteme dahil edilecek olan kesici güçleri, simetrik kısa devre arıza gücüne göre tayin edilebilir. Kesici seçimi için basitleştirilmiş kısa devre akımı;

$$I_s = \frac{E}{X} \text{ (A)} \quad (5.1)$$

ile hesaplanabilir.

$I_s$ : Kısa devre akımı

E: Faz başına gerilim değeri

X: Faz başına reaktans değeri

$$\text{KDG (Kısa devre gücü)} = I_s \times E \quad (5.2)$$

Sistemin kısa devre arızalarında aşırı akımlara karşı korumak için seçilecek olan kesici, en büyük kısa devre akımını güvenli bir biçimde kesecek değerde olması, hasar görmemiş düzgün çalışan, aşırı akımlara karşı koruma düzeneği ve arıza esnasında aşırı akıma maruz kalan iletim hatlarının akımı kesecek biçimde sisteme dâhil edilmesi gerekir. Seçilecek olan kesici TS ve IEC standartlarına uygun olarak seçilmelidir (Doğanay vd., 2022:8).

## 6. SONUÇLAR

Enterkonnekte yapıdaki güç sistemlerinin ağ topolojisi içerisinde bulunan üretim tesisleri, transformatörler, hatlar ve yük sayısının birden fazla olmasından dolayı güç sistemini analiz etmek ve matematiksel hesaplamalar yapmak güç ve zor olmaktadır. Ayrıca enterkonnekte sisteminde farklı gerilim seviyesinde ki jeneratörlerin, transformatörlerin, hatların ve yüklerin birbirine bağlanmasında ötürü sistemi daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu sebeple karmaşık yapıdaki güç sistem ağ topolojisini bilgisayar destekli grafik tabanlı görsel simülasyon programları ile desteklenerek analiz edilmesi karmaşık ve farklı gerilim seviyelerine sahip olan güç ağını analiz etmek ve matematiksel hesapların yapılmasını da mühendislik bakımından zaman ve ekonomik anlamında kolaylık sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında Türkiye enterkonnekte sistemine ait olan ve kesit parçası alınmış olan tek hat şemalı güç sisteminin şematik gösteriminin Power World bilgisayar destekli grafik tabanlı görsel simülasyon programında modellenen ve güç sistemine ait karakteristik değerlerinin belirlenmesiyle, enterkonnekte güç sistemine ait güç akışı ve simetrik (üç faz kısa devre) ve simetrik olmayan (faz-toprak, faz-faz, iki faz- toprak ve hat kopma) arıza analizleri sıralı olarak analizlerini gerçekleştirilmesi, olası arıza senaryolarında sistemin bütüncül olarak analiz edilmesiyle, sistemi etkileyebilecek arızaların ön görülmesiyle sistemin işletme sınır koşulları ve enerji sürekliliğinin sağlanması için önleyici ve çözüm odaklı yöntemlerin geliştirilmesine, sistem içerisinde oluşabilecek arıza durumlarında sistemi korumak için dahil edilecek olan kesici güçleri ve kesici yerleşim yerlerini belirleyerek enterkonnekte sistem üzerinden herhangi bir bölgenin belirlenmesiyle işlem basamaklarının sıralı olarak uygulanmasıyla, enterkonnekte sisteminden alınacak olan herhangi bir kesit veya bölgeye ait parçanın kolay bir biçimde tekrar analizlerinin gerçekleştirilmesinde yönelik önemli ölçüde bilgi kazanımları elde edilmiştir. Ayrıca analiz kapsamında güç sistemlerinin analiz edilmesinde kullanılacak yeni yöntem ve metotların (Gauss-Seidel, Newton-raphson ve Fast Decoupled vb.) bilgisayar destekli (PSCAD, NEPLAN, EMTP, ETAP, CYME, ERACS, IPSA, DIGSILENT Power Factory, PSSE vb.) güç sistemlerinin analiz edilmesinde yeni programların ve güç sistemlerinde şalt sahalarında ve donanım kısımlarında arızalara neden olan etken ve faktörlerin neler olduğu ve bu arızalar için ne tür çözümler getirilmesinde yönelik güç sistemleri alanında önemli ölçüde bilgi kazanımları elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri.** Enerji Nakil Hatları [Erişim:09.06.2021, [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/169175/mod\\_resource/content/1/2.%20HAFTA](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/169175/mod_resource/content/1/2.%20HAFTA)]
- Affetmez, O.** (2021). Enerji İletim Hatları Ders Notları[Erişim:13.03.2021, [https://www.academia.edu/17070304/ENERJİ\\_ILETİM\\_hatları\\_DERS\\_NOTU](https://www.academia.edu/17070304/ENERJİ_ILETİM_hatları_DERS_NOTU)]
- Cyme International T & D Inc.** (1986). CYME Power Engineering Software [Erişim:21.01.2022, <https://www.cyme.com>]
- Çifçi, A. & Altundağ E. & Bulut, Ö. & Uysal, H. H.** (2017). Burdur İli Elektrik Dağıtım Şebekesinde Meydana Gelen. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1-12.
- DİgSILENT GmbH.** (2018). DİgSILENT: Power System Solutions [Erişim:21.01.2022, <https://www.digsilent.de/en/>]
- EMTP Alliance.** (2004). EMTP [Erişim:12.02.2022, <https://www.emtp.com/about-us/emtp-history>]
- Yasin İçel, B. B.** (2013). Yenilenebilir Kaynakları İçeren Güç Sistemlerinin PowerWorld Programı ile. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK2013. MALATYA [Erişim:02.18.2022, <https://www.researchgate.net/profile/Burhan-Baran>]
- Etap Powering Success.** (1986). etap [Erişim:17.02.2022, <https://etap.com/packages/etap-base-package>]
- Holding Company RINA S.p.A.** (1990). RINA ERACS [Erişim:20.02.2022, <https://www.eracs.co.uk/>]
- İrfan GÜNEY,** (2001). Çözümlü Enerji İletim Hatları Problemleri 2.Baskı. İstanbul: Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi.
- Labcenter Electronics Ltd.** (1988). Proteus [Erişim:01.12.2021, <https://www.labcenter.com/about/>]
- Grainger, S.** (1994). Power System Analysis. Avrupa: McGraw Hill Education.
- Manitoba Hydro International Ltd.** (1981). Pscad [Erişim:25.02.2022, <https://www.pscad.com/software/pscad/v5-features>]
- Glover, J. S.** (2008). Power System Analysis & Design. U.S.A: Nobel.
- TNEI Services Ltd.** (2016). ipsa-power [Erişim:28.02.2022, <https://www.ipsa-power.com/>]
- Doğanay, M. M., & Kurban, M.** (2022). Güç sistemlerinde yük akışı ve simetrik arıza analizi-Mardin bölgesi uygulaması. 2nd international symposium of scientific research and innovative studies (s. 150-161).

- MathWorks.** (1994). MathWorks-MATLAB-Simülink [Erişim:29.02.2022, [https://www.mathworks.com/products.html?s\\_tid=gn\\_ps](https://www.mathworks.com/products.html?s_tid=gn_ps)]
- NEPLAN AG.** (2021). NEPLAN Smarter Tools. neplan.ch [Erişim:07.03.2022, <https://www.neplan.ch/>]
- PowerWorld Corporation.** (2001). Powerworld [Erişim:10.03.2022, <https://www.powerworld.com/products/simulator>]
- Çakar, H. & Gençoğlu, M. T.** (2020). GSAP: Güç Sistem Analizi Uygulaması için Matlab Tabanlı Grafik Paketi . Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32 (1) , 179-188. DOI: 10.35234/fumbd.622077
- Schneider Electric.** (2017). Orta Gerilim Teknik Kılavuzu [Erişim:07.06.2021, [https://download.schneiderelectric.com/files?p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=OG+Teknik+Rehberi.pdf&p\\_Doc\\_Ref=OG\\_Teknik\\_Rehberi](https://download.schneiderelectric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=OG+Teknik+Rehberi.pdf&p_Doc_Ref=OG_Teknik_Rehberi)]
- Erim, B.** (2015). 154 kV Bir İletim Şebekesinin Kapalı (Ring) Sisteme Dönüşmesiyle Çift Taraflı Beslenen Trafo Merkezlerinde Bara Kısa Devre İncelenmesi. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Siemens Power Technologies International.** (1996). Siemens [Erişim:17.03.2022, <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/pss-software/pss-e.html>]
- Ertuğrul, Ö. F.** (2010). Sınır Ağları ve Dalgacık Dönüşümü İle Arıza Analizi. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye.
- Teiaş.** (2021). Staj Raporları
- Elektrolojik.** (2018). Yeraltı şebekeleri için arıza akımı gösterge düzeneği kullanım kılavuzu [Erişim:05.05.2021, [http://www.elektrolojik.com.tr/ESI\\_Kullanma\\_Klavuzu.pdf](http://www.elektrolojik.com.tr/ESI_Kullanma_Klavuzu.pdf)]
- Lucas, J. R.** (2005). Power System Analysis: Faults. EE423 [Erişim:14.04.2022]
- Çakır, D. M.** (1986). Elektrik Güç Sistemleri Analizi. İstanbul Nesil Matbaacılık Yayıncılık San. Tic. A.Ş.
- Hökelek, M. Y.** (2004). 11. İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürü [Erişim:14.12.2021, [https://www.emo.org.tr/ekler/4546d484e137a6c\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/4546d484e137a6c_ek.pdf)]
- Tür, M. R.** (2010). Enerji İletim Hatlarında Oluşan Arızaların Bulanık Mantık Yöntemi İle Belirlenmesi. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.



Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Bus 15	Bus 16	Bus 17	Bus 18	Bus 19	Bus 20	Bus 21	Bus 22	Bus 23	Bus 24	Bus 25	Bus 26	Bus 27	Bus 28	Bus 29	Bus 30	Bus 31	Bus 32	Bus 33	Bus 34	Bus 35	Bus 36	Bus 37	Bus 38	
1	Scipione	2x27	2x26	4x46	4x11	4x0	3x1	1x7	1x5	1x5	0x0	0x5																												
2	Alfonso	4x6	4x1	4x15	4x13																																			
3	Carlo	4x9	3x0																																					
4	Roberto	1x7	1x5																																					
5	Sal	1x9	1x16																																					
6	Barbara																																							
7	Roberto																																							
8	Roberto																																							
9																																								
10																																								
11																																								
12																																								
13	Domenico																																							
14	Roberto																																							
15																																								
16	Roberto																																							
17	Roberto																																							
18	Roberto																																							
19	Roberto																																							
20																																								
21	Roberto																																							
22	Roberto																																							
23	Roberto																																							
24																																								
25	Roberto																																							
26																																								
27																																								
28																																								
29																																								
30																																								
31																																								
32																																								
33																																								
34																																								
35																																								
36	Roberto																																							
37																																								
38																																								

