T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KORUMA

OKAN KONDUL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. RECEP YUMURTACI

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KORUMA

Okan KONDUL tarafından hazırlanan tez çalışması 12.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Nurettin UMURKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR

Marmara Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Fosil enerji kaynaklarındaki azalma ve artan enerji talebi konvansiyonel elektrik şebeke yapısının tekrar ele alınmasını zorunlu kılmıştır. Enerji verimliliğinin artırılması amacıyla özellikle yenilenebilir enerjiye dayalı yerinde üretim kaynaklarının artması ve marketteki liberalleşme ile beraber şebeke yapısında çok önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Hibrit enerji dağıtım sistemi veya mikro şebeke olarak adlandırılan bu yeni sistemin kontrol, koruma ve kararlılığı elektrik güç mühendisliğinin günümüzdeki en önemli odak noktalarından birisidir.

Özellikle farklı karakteristikteki dağıtım üretim kaynaklarını da içeren hibrit enerji sistemlerinin koruma sisteminin standartlaştırılma süreci devam etmektedir.

Bu çalışmada bir hibrit enerji sistemini oluşturan bileşenler, ilgili standartlar, kısa devre ve klasik koruma sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Böylece konu hakkında geniş bir derleme yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca markette sıklıkla kullanılan ileri güç sistem analiz programları ile de mevcutta kullanılan koruma röleleri ile örnek modellemeler yapılmış, modeller arası sonuçlar karşılaştırılmış ve özetlenmiştir.

Tez çalışmam süresince başta yol göstericiliği ve sevgisi ile sürekli yanımda olan değerli hocam Doç. Dr. Recep Yumurtacı ’ya, manevi desteklerini üzerimden hiçbir zaman esirgemeyen değerli babam, annem ve kardeşime, gösterdiği sonsuz anlayış ve destek için sevgili eşime teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2018

Okan KONDUL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

ÇİZELGE LİSTESİ xiv

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Orijinal Katkı 4

BÖLÜM 2

DAĞITIK ÜRETİK ENERJİ SİSTEMLERİ 6

2.1 Sınıflandırma 6
2.2 Kombine Isı ve Güç Sistemleri (KIGS) 8
2.3 Yakıt Pilleri (YP); 16
2.4 Güneş Pilleri 23
2.4.1 Fotovoltaik Inverterleri ve Çalışma Modları 25
2.4.2 Inverter ara yüzlü dağıtım üretim kaynaklarının (IADÜK) farklı kontrol sistemlerinde kısa devre arıza davranışları 26
2.5 Rüzgar Türbinleri 29
2.5.1 Rüzgar Türbinlerinin Kısa Devre Arıza Davranışları 33
2.6 Dizel ve Doğalgaz Generatörü 34

BÖLÜM 3

KISA DEVRE VE ELEKTRİKSEL KORUMA SİSTEMLERİ 36

3.1 Arıza Analizi ve Kısa Devre Hesap Yöntemleri 36
3.1.1 Simetrik Bileşenler ile Dağıtım Sistemi Analizi 36
3.1.2 Kısa Devre ve Hesap Yöntemleri 47
3.1.2.1 IEC 60909 Standardı Kısa Devre Hesap Yöntemi 48
3.1.2.2 Empedans Metodu 56
3.2 Orta Gerilimde Koruma ve Koordinasyon 64
3.2.1 Orta Gerilim Anahtarlama Elemanları ve Standartları 64
3.2.2 Başlıca Orta Gerilim Koruma Röleleri ve Tanımlar 65
3.2.2.1 Aşırı Akım Rölesi 66
3.2.2.2 Diferansiyel Koruma Röleleri 70
3.2.2.3 Mesafe Röleleri 70
3.3 Alçak Gerilimde Koruma ve Koordinasyon 72
3.3.1 Alçak Gerilim Koruma Röleleri ve Tanımları 72
3.4 Koruma Sistemlerinde Seçicilik 75
3.4.1 Zaman Temelli Seçicilik 75
3.4.2 Akım Temelli Seçicilik 76
3.4.3 Mantıksal Seçicilik 77
3.4.4 Yönlü Aşırı Akım Röleleri ile Seçicilik 78
3.4.5 Diferansiyel Röle ile Seçicilik 79
3.4.6 Kombine Seçicilik 80
3.5 Dağıtık Üretim Kaynaklarının Elektriksel Koruması ile İlgili Çalışmalar 81

BÖLÜM 4

HİBRİT ENERJİ DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KORUMA VE HABERLEŞME STANDARTLARI 83

4.1 IEC 61850 83
4.2 IEC 62898 86
4.3 ENA 89
4.4 Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik 91

BÖLÜM 5

DAĞITIK ÜRETİM KAYNAKLARINI İÇEREN ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ ANALİZ PROGRAMLARI İLE YÜK AKIŞI-KISA DEVRE HESABI-KORUMA KOORDİNASYONU VE KARARLILIK ANALİZLERİ 94

5.1 ERACS ve ETAP Yazılımı ile Modellenen Orta Gerilim Seviyesinde Hibrit Bir Enerji Dağıtım Sisteminin Koruma ve Koordinasyon Analizi 95
5.1.1 Model Tanıtımı 95
5.1.1.1 Enerji Kaynakları 96
5.1.1.2 Transformatör – TX-1 107
5.1.1.3 Yükler 113
5.1.1.4 Kablolar 119
5.1.1.5 Koruma röleleri ve kesiciler 121
5.2 ERACS ve ETAP Yazılımları ile Gerçekleştirilen Orta Gerilim Seviyesinde Hibrit Bir Enerji Dağıtım Sisteminin Aşırı ve Yönlü Aşırı Akım Röleleri ile Gerçekleştirilen Arıza ve Koruma Analizleri 127
5.2.1 Çalışma Senaryosu-1 (ÇS-1) 128

5.2.1.1 Yük Akış Analizi 128
5.2.1.2 Kısa Devre Analizi 130
5.2.2 Koruma ve Seçicilik Koordinasyonu 132
5.2.3 Geçici Durum Gerilim-Frekans Analizi 144
5.2.4 Çalışma Senaryosu-1 Sonuç 150
5.3 Çalışma Senaryosu-2 (ÇS-2) 150
5.3.1 Yük Akışı 150
5.3.2 Kısa Devre Analizi 151
5.3.3 Koruma ve Seçicilik Koordinasyonu 152
5.3.4 Geçici Durum Gerilim-Frekans Analizi 156
5.3.5 Çalışma Senaryosu-2 Sonuç 158
5.4 Çalışma Senaryosu-3 (ÇS-3) 160
5.4.1 Yük Akış Analizi 162
5.4.2 Kısa Devre Analizi 163
5.4.3 Koruma Koordinasyonu Analizi 163
5.4.4 Çalışma Senaryosu-3 Sonuç 164
5.5 Diferansiyel Röleler ile Gerçekleştirilen Arıza ve Koruma Analizi 164
5.5.1 Koruma Koordinasyonu Analizi 165
5.6 Gerilim Röleleri ile Gerçekleştirilen Arıza ve Koruma Analizi 166
5.6.1 Koruma Koordinasyonu Analizi 167
5.6.2 Geçici Durum Analizi 168
5.7 Arıza Kompanzasyonu Yöntemi ile Koruma Analizi 169
5.8 Orta Gerilim Hibrit Enerji Sisteminin Koruma Analizi Sonuçları 170
5.9 ETAP YAZILIMI İLE MODELLENEN ALÇAK GERİLİM SEVİYESİNDE HİBRİT BİR ENERJİ DAĞITIM SİSTEMİNİN ARIZA ANALİZİ 172
5.9.1 Modellenen Dağıtım Sisteminin Tanıtımı 172
5.9.1.1 Enerji Kaynakları; 173
5.9.1.2 Devre Kesiciler ve Röleleri; 174
5.9.1.3 İletkenler Tanımları ve Empedans Değerleri 174
5.9.1.4 Yükler 177
5.9.2 Arıza Analizleri ve Sonuçları 178
5.9.3 Analiz Sonuçlarına Göre Koruma Koordinasyonu 180
5.9.3.1 Arıza-1 180
5.9.3.2 Arıza-2 182
5.9.3.3 Arıza-3 183
5.9.3.4 Arıza-4 ve Arıza-5 184

BÖLÜM 6

ADA ÇALIŞMA VE ADA ÇALIŞMADA KORUMA ANALİZİ 186

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 188

KAYNAKLAR 192

ÖZGEÇMİŞ 196

SİMGE LİSTESİ

V_a	Faz gerilimi
V_b	Faz gerilimi
V_c	Faz gerilimi
V_0	Sıfır bileşen gerilimi
V_1	Pozitif bileşen gerilimi
V_2	Negatif bileşen gerilimi
I_a	Faz akımı
I_b	Faz akımı
I_c	Faz akımı
I_0	Sıfır bileşen akımı
I_1	Pozitif bileşen akımı
I_2	Negatif bileşen akımı
a	Faz açısı operatörü
Z_1	Pozitif bileşen empedansı
Z_2	Negatif bileşen empedansı
Z_0	Sıfır bileşen empedansı
$I_k^{"}$	Anlık kısa devre akımı
i_p	Kısa devre tepe akımı
i_{dc}	Kısa devre doğru akım bileşeni
T_{dc}	Kısa devre doğru akım zaman sabiti
I_b	Kısa devre simetrik kesme akımı
I_{basym}	Kısa devre asimetrik kesme akımı
c_{maks}	Maksimum gerilim katsayısı
c_{maks}	Minimum gerilim katsayısı
κ	DC akım azalma katsayısı
λ_{maks}	En yüksek tahrikte senkron jeneratör maksimum kısa devre akım katsayısı
λ_{min}	En düşük tahrikte senkron jeneratör maksimum kısa devre akım katsayısı
I_{rG}	Jeneratör nominal akımı
μ	Kesme akımı zaman sabiti
$I_{kG}^{"}$	Senkron jeneratör kısa devre akımı
Z_{TK}	Transformatör düzeltme empedansı
K_T	Transformatör empedans düzeltme katsayısı

Z_T	Transformatör empedansı
x_T	DC akım azalma katsayısı
S_{rT}	Transformatör gücü
U_{rT}^2	Transformatör gerilimi
Z_{GK}	Senkron jeneratör düzeltme empedansı
K_G	Senkron jeneratör empedans düzeltme katsayısı
Z_G	Senkron jeneratör empedansı
R_G	Senkron jeneratör rezistansı
$X_G^{"}$	Senkron jeneratör endüktansı
U_n	Senkron jeneratör gerilimi
U_{rG}	Senkron jeneratör nominal gerilimi
$x_d^{"}$	Senkron jeneratör kararlı durum kısa devre endüktansı
R_G	Senkron jeneratör rezistansı
Z_S	Şebeke empedansı
I_{SC3}	Empedans methodu üç faz kısa devre akımı
Z_{SC}	Empedans methodu kısa devre empedansı
I_{SC2}	Empedans methodu iki faz kısa devre akımı
I_{SC1}	Empedans methodu faz nötr kısa devre akımı
Z_{LN}	Empedans methodu faz nötr empedansı
I_{SC0}	Empedans methodu faz toprak akımı
Z_{up}	Empedans methodu şebeke empedansı
W	Transformatör aktif kaybı
ρ	Öz iletkenlik
A	Kesit
R_L	Empedans methodu kablo rezistansı
X_L	Empedans methodu kablo endüktansı
$\log\frac{d}{r}$	İletkenler arası mesafenin endüktansa etkisi
X_1	Senkron jeneratör pozitif bileşen kararlı durum endüktansı
X_d'	Senkron jeneratör pozitif bileşen transient durum endüktansı
X_d''	Senkron jeneratör pozitif bileşen sub-transient durum endüktansı
X_2	Senkron jeneratör negatif bileşen endüktansı
X_0	Senkron jeneratör sıfır bileşen endüktansı
R_{neut}	Nötr iletkeni direnci
X_{neut}	Nötr iletkeni endüktansı
w	Rotor hızı
J	Atalet momenti
T_m	Mekanik tork
T_e	Elektriksel tork
H	Atalet sabiti
ω_s	Senkron hız
H_{ml}	Mekaniksel yük atalet sabiti
X_s	Stator reaktans
R_s	Stator rezistans
X_m	Manyetik reaktans
X_{rs}	Durağan durum motor reaktansı
X_r	Rotor çalışma reaktansı

$\mathrm{R_r}$	Rotor çalışma reazistansı
s	Asenkron motor kayma
$\mathrm{Z_s}$	Stator empedansı
$\mathrm{Z_{rs}}$	Durağan durum rotor empedansı
R_{0L}	Kablo sıfır bileşen rezistansı
$\mathrm{X_{0L}}$	Kablo sıfır bileşen endüktansı

KISALTMA LİSTESİ

AG	Alçak Gerilim
CIBSE	The Chartered Institution of Building Services Engineer
COP	Continuous Power
ÇD	Çalışma Düzeneği
ÇS	Çalışma Senaryosu
DÜK	Dağıtık Üretim Kaynağı
ENA	Energy Network Association
ESP	Emergency Stanby Power
IADÜK	İnvertör Arayüzlü Dağıtık Üretim Kaynakları
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligient Electronic Device
KIGS	Kombine Isı ve Güç Sistemleri
KISGS	Kombine Isıtma, Soğutma ve Güç Sistemleri
OG	Orta Gerilim
PRP	Primary Power
ROCOF	Rate of Change of Frequenct
YP	Yakıt Pili

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma 1
Şekil 2. 1 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma 6
Şekil 2. 2 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma 7
Şekil 2. 3 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma 7
Şekil 2. 4 Kojenerasyon sistemlerinde ısı ve güç verimliliği 9
Şekil 2. 5 KIGS ünitesi blok diyagramı 11
Şekil 2. 6 KIGS ünitesi blok diyagramı 11
Şekil 2. 7 KIGS ünitesi örnek bir resim 12
Şekil 2. 8 mini KIGS ünitesi 13
Şekil 2. 9 KIGS ünitesi alçak gerilim seviyesinden tipik şebeke bağlantı şeması 16
Şekil 2. 10 Yakıt pili çalışma prensibi 17
Şekil 2. 11 Yakıt pili blok şeması 18
Şekil 2. 12 Yakıt pili detayı 18
Şekil 2. 13 Yakıt pili kojenerasyon uygulaması blok şeması 20
Şekil 2. 14 Yakıt pili bina uygulaması örneği 21
Şekil 2. 15 Yakıt pili bina uygulaması örneği 22
Şekil 2. 16 Yakıt pili bina uygulaması örneği 22
Şekil 2. 17 Güneş pili yapısı 24
Şekil 2. 18 IADÜK PI kontrolcü blok şeması 26
Şekil 2. 19 IADÜK PQ kontrol blok şeması 27
Şekil 2. 20 IADÜK V/f kontrol blok şeması 27
Şekil 2. 21 IADÜK droop kontrolcü blok şeması 28
Şekil 2. 22 Rüzgar türbini tipleri 30
Şekil 2. 23 Tip-1 rüzgar türbini 31
Şekil 2. 24 Tip-2 rüzgar türbini 31
Şekil 2. 25 Tip-3 rüzgar türbini 32
Şekil 2. 26 Tip-4 rüzgar türbini 33
Şekil 3. 1 Simetrili bileşenler 37
Şekil 3. 2 Simetrili gerilim-akım-empedans gösterimi 39
Şekil 3. 3 Simetrili bileşenler ile örnek dağıtım sistemi modeli 40
Şekil 3. 4 Faz-faz kısa devresi 41
Şekil 3. 5 Simetrili bileşenler ile faz-faz kısa devresi ifadesi 42
Şekil 3. 6 Simetrili bileşenler ile faz toprak kısa devre ifadesi 43

Şekil 3. 7 Simetrili bileşenler ile faz faz kısa devre ifadesi 44
Şekil 3. 8 Simetrili bileşenler ile iki faz toprak kısa devre ifadesi 45
Şekil 3. 9 Simetrili bileşenler ile üç faz toprak kısa devre ifadesi 46
Şekil 3. 10 akım zaman eğrisi 48
Şekil 3. 11 Jeneratöre yakın kısa devre 49
Şekil 3. 12 Jeneratöre uzak kısa devre 49
Şekil 3. 13 IEC 60909 kısa devre formülleri 51
Şekil 3. 14 IEC 60909 κ faktörü 52
Şekil 3. 15 IEC 60909 turbo jeneratörler için λmax ve λmin eğrileri 53
Şekil 3. 16 IEC 60909 çıkık kutuplu jeneratörler için λmax ve λmin eğrileri 53
Şekil 3. 17 IEC 60909 μ eğrileri 54
Şekil 3. 18 Orta ve alçak gerilim seviyesinde empedans metodu kısa devreleri 57
Şekil 3. 19 UTE C 15-105 Fransız standardı iletkenler için rezistans değerleri 61
Şekil 3. 20 Kablolarda kesit değişimi ile rezistans ve endüktans ilişkisi 62
Şekil 3. 21 Aşırı akım rölesi sabit zaman anlık açma zaman eğrisi 67
Şekil 3. 22 Aşırı akım rölesi sabit zaman- akım eğrisi 67
Şekil 3. 22 Aşırı akım rölesi ters zaman- akım eğrisi 68
Şekil 3. 24 Diferansiyel röle 70
Şekil 3. 25 Mesafe rölesi 71
Şekil 3. 26 Mesafe rölesi X-R eğrisi 72
Şekil 3. 27 Elektronik devre kesici koruma fonksiyonları 74
Şekil 3. 28 Minyatür devre kesici akım zaman eğrileri 74
Şekil 3. 29 Aşırı akımın insan vücuduna etkisi akım-zaman grafiği 75
Şekil 3. 30 Zaman temelli seçicilik 76
Şekil 3. 31 Akım temelli seçicilik 77
Şekil 3. 32 Mantıksal seçicilik 78
Şekil 3. 33 Yönlü seçicilik 79
Şekil 3. 34 Empedans üzerinden diferansiyel koruma 80
Şekil 3. 35 Oransal diferansiyel koruma 80
Şekil 5. 1 Simülasyonu gerçekleştirilen dağıtım sisteminin tek hat şeması 96
Şekil 5. 2 Şebeke yük akış modeli 97
Şekil 5. 3 ERACS şebeke verileri 98
Şekil 5. 4 Senkron makine yük akış modeli 99
Şekil 5. 5 Senkron makine park modeli-d aksı 103
Şekil 5. 6 Senkron makine park modeli q aksı 103
Şekil 5. 7 AC2A gerilim regülatörü blok diyagramı 104
Şekil 5. 8 PID kontrollü türbin regülatörü blok diyagramı 104
Şekil 5. 9 ERACS modeli senkron makine parametreleri 105
Şekil 5. 10 IADÜK yük akış modeli 107
Şekil 5. 11 Transformatör sargılarına göre sıfır bileşen empedansları 108
Şekil 5. 12 ERACS modeli transformatör parametreleri 113
Şekil 5. 13 ERACS modeli yük parametreleri 114
Şekil 5. 14 Asenkron motor modeli 114
Şekil 5. 15 Asenkron motor yük akış modeli 115
Şekil 5. 16 Asenkron motor negatif bileşen empedans modeli 116
Şekil 5. 17 ERACS modeli asenkron motor parametreleri 118

Şekil 5. 18 ERACS modeli 34,5kV kablo parametreleri 120
Şekil 5. 19 ERACS modeli 34,5kV orta gerilim kesici parametreleri 124
Şekil 5. 20 REF615 Orta gerilim rölesi 125
Şekil 5. 21 ERACS modeli röle akım-zaman ayaları 126
Şekil 5. 22 ÇS-1 yük akışı simülasyonu sonuçları 129
Şekil 5. 23 ÇS-1 kısa devre arıza noktaları 130
Şekil 5. 24 ÇS-1 üç fazlı kısa devre analizi sonuçları 131
Şekil 5. 25 ÇS-1 faz toprak kısa devre analizi sonuçları 132
Şekil 5. 26 ÇS-1 1.arıza çalışması tek hat şeması 133
Şekil 5. 27 ÇS-1 1.arıza çalışması akım-zaman eğrileri 134
Şekil 5. 28 ÇS-1 2.arıza çalışması tek hat şeması 135
Şekil 5. 29 ÇS-1 2.arıza çalışması akım-zaman eğrileri 136
Şekil 5. 30 ÇS-1 3.arıza çalışması tek hat şeması 137
Şekil 5. 31 ÇS-1 3.arıza çalışması sonuçları 138
Şekil 5. 32 ÇS-1 4.arıza çalışması tek hat şeması 139
Şekil 5. 33 ÇS-1 4.arıza çalışması koruma simülasyonu sonucu 140
Şekil 5. 34 ÇS-1 4.arıza çalışması akım-zaman eğrileri 141
Şekil 5. 35 ÇS-1 5.arıza çalışması tek hat şeması 142
Şekil 5. 36 ÇS-1 4.arıza çalışması sonuçları 142
Şekil 5. 37 ÇS-1 5.arıza çalışması tek hat şeması 143
Şekil 5. 38 ÇS-1 4.arıza çalışması sonuçları 144
Şekil 5. 39 ÇS-1 1. geçici durum analizi V-f eğrileri 146
Şekil 5. 40 $P - \delta$ senkron makine kararlılık eğrisi 147
Şekil 5. 41 ÇS-1 2.arıza geçici durum analizi BUS-GS barası V-f eğrileri 149
Şekil 5. 42 ÇS-2 yük akışı simülasyonu sonuçları 150
Şekil 5. 43 ÇS-2 kısa devre arıza noktaları 151
Şekil 5. 44 ÇS-1 üç fazlı kısa devre analizi sonuçları 152
Şekil 5. 45 ÇS-2 5.arıza çalışması tek hat şeması 153
Şekil 5. 46 ÇS-2 5.arıza çalışması sonuçları 153
Şekil 5. 47 ÇS-2 5.arıza çalışması akım-zaman eğrileri 154
Şekil 5. 48 ÇS-2 6.arıza çalışması sonuçları 155
Şekil 5. 49 ÇS-2 6.arıza çalışması akım-zaman eğrileri 156
Şekil 5. 50 ÇS-6.arıza geçici durum analizi BUS-GS barası V-f eğrileri 158
Şekil 5. 51 ÇS-2 6. yeni akım-zaman eğrileri 160
Şekil 5. 52 ÇS-3 yük akışı simülasyonu sonuçları 162
Şekil 5. 53 ÇS-3 üç fazlı kısa devre arıza analizi sonuçları 163
Şekil 5. 54 ÇS-3 2-3-4.arıza çalışması sonuçları 164
Şekil 5. 55 Diferansiyel röle ile gerçekleştirilen arıza çalışması sonuçları 165
Şekil 5. 56 Diferansiyel röle ile gerçekleştirilen koruma şeması 166
Şekil 5. 57 Gerilim röleleri ile gerçekleştirilen koruma şeması 167
Şekil 5. 58 Gerilim röleleri ile gerçekleştirilen geçici durum analizi-1 168
Şekil 5. 59 Gerilim röleleri ile gerçekleştirilen geçici durum analizi-2 169
Şekil 5. 60 Rotary UPS örneği 170
Şekil 5. 61 ETAP AG hibrit enerji sistemi modeli 172
Şekil 5. 62 ETAP AG modeli transformatör bara koruması 181
Şekil 5. 63 ETAP AG model elektronik LSI röle akım zaman eğrisi 184

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 KIGS sınıflandırma 8
Çizelge 2. 2 Fotovoltaik teknolojileri 25
Çizelge 2. 3 Invertör tabanlı kontrol sistemlerinin arıza karakterleri 28
Çizelge 2. 4 Senkron makine kısa devre empedansları 35
Çizelge 3. 2 IEC60909 gerilim faktörü tablosu 50
Çizelge 3. 3 IEC60909 gerilim faktörü tablosu 59
Çizelge 3. 4 Senkron jeneratör empedansları 63
Çizelge 3. 5 Senkron motor empedansları 63
Çizelge 3. 6 IEC 62255-151 ters zamanlı röle karakteristikleri 69
Çizelge 5. 1 Enterkonnekte şebeke empedansları 97
Çizelge 5. 2 IEC60909 gerilim faktörü 101
Çizelge 5. 3 motor XM ve RM empedansları 117
Çizelge 5. 4 ERACS modeli kablo listesi 119
Çizelge 5. 5 ERACS modeli kesici listesi 122
Çizelge 5. 6 ERACS modeli röle listesi 126
Çizelge 5. 7 çalışma senaryoları 128
Çizelge 5. 8 ÇS-1 arıza-1 geçici durum olay-zaman senaryosu 145
Çizelge 5. 9 ÇS-1 arıza-2 geçici durum olay-zaman senaryosu 148
Çizelge 5. 10 ÇS-2 arıza-6 geçici durum olay-zaman senaryosu 157
Çizelge 5. 11 O.G model koruma özeti 171
Çizelge 5. 12 A.G ETAP modeli enerji kaynakları listesi 173
Çizelge 5. 13 A.G ETAP modeli kesici-röle listesi 175
Çizelge 5. 14 A.G ETAP modeli kablo listesi 176
Çizelge 5. 15 A.G ETAP modeli kablo empedansları 177
Çizelge 5. 16 A.G ETAP modeli yük listesi 178
Çizelge 5. 17 A.G ETAP modeli kısa devre sonuçları 179
Çizelge 5. 18 A.G ETAP modeli ÇD-1 arıza-1 açma süreleri 181
Çizelge 5. 19 A.G ETAP ÇD-1 arıza-2 açma süreleri 182
Çizelge 5. 20. G ETAP ÇD-1 arıza-3 açma süreleri 183
Çizelge 5. 21 A.G ETAP ÇD-3 arıza-5 açma süreleri 185
Çizelge 6. 1 Uluslararası standartlarda ROCOF rölesi ayarları 187

ÖZET

DAĞITIK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KORUMA

Okan KONDUL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Enerji marketindeki liberalleşme ile beraber gaz emisyonu azaltma trendi ve küçük boyutlu, yüke yakın enerji üretiminin teknik avantajları dağıtık üretim kaynaklarının (DÜK) elektrik dağıtım sisteminde daha çok kullanılmasına neden olmaktadır. Dağıtık üretim kaynaklarının enerji dağıtım sisteminde artan uygulamaları çift yönlü enerji iletimi ile çok değişken ve geleneksel dağıtım sistemlerine göre düşük arıza akımlarını ortaya çıkarmıştır. Bunlar da klasik elektrik koruma sistemlerinde koordinasyon problemlerine sebep olmaktadır. Bu çalışmada farklı sınıflardaki dağıtık üretim kaynaklarının arıza karakteristikleri ve yapıları hakkında tanımlamalar yapılmıştır. Ardından kısa devre hesaplama yöntemleri ile en yaygın kullanılan orta gerilim ve alçak gerilim röle ve kesicileri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca dağıtık üretim kaynaklarının bulunduğu elektrik dağıtım sistemlerinde korumayı da konu alan ulusal ve uluslararası standartlar kısaca özetlenmiştir. Simülasyon bölümünde farklı arıza karakteristiğine ve sınıfına sahip dağıtık üretim kaynaklarından oluşan orta gerilim ve alçak gerilim seviyesindeki enerji dağıtım sistemleri ERACS ve ETAP yazılımı ile modellenerek kapsamlı arıza ve koruma analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuç bölümünde koruma analizinden elde edilen veriler karşılaştırılmış, öneriler sunulmuş ve uluslararası standartlardaki ada koruma sistemi ile ilgili bilgiler çizelge halinde özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dağıtık üretim, yenilenebilir enerji kaynakları, hibrit enerji sistemleri, kısa devre, elektriksel koruma ve koordinasyon.

ABSTRACT

PROTECTION FOR DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS

Okan KONDUL

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Dr. Recep YUMURTACI

Liberalization on energy market together with trend of reducing gas emission and technical advantages of small energy sources near the load can cause more utilized of the distributed energy sources in electrical distribution system. The increasing ratio of utilizing of distributed energy sources in electrical distribution system has emerged power flow with two sides and highly variable and small short circuit currents. These results can cause challenges for coordination of electrical protection system. In this thesis, the fault characteristics of distributed energy sources are defined. Then most prevalent protection relays and switchgears for medium- low voltage level distribution systems also short circuit calculation methods are explained. Comprehensive short circuit analysis and electrical protection study are realized using ERACS and ETAP software for examples of electrical distribution systems which are comprises of different type distributed energy sources with medium or low voltage level. Finally, results are presented in a comparison table, conclusions which are reached through power system simulations are explained and anti-islanding protection system is summarized in a table.

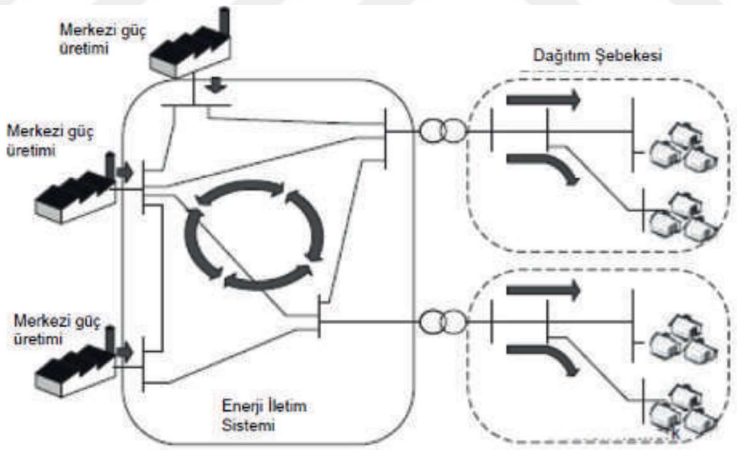
Keywords: Distributed energy production, renewable energy sources, hybrid energy systems, electrical protection and coordination.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Elektrik dağıtımının ilk yıllarında her şehir ve kasaba kendi elektriğini üretmekteydi fakat geçtiğimiz son 70 yılda modern elektrik güç sistemlerinin gelişmesiyle ile merkezi enerji üretim santralleri ve 1000kV gerilim seviyesine kadar enerji iletim santralleri ile tüketim karşılanmaya başlandı. Klasik bir merkezi enerji sistemi aşağıda gösterilmiştir. Merkezi enerji santralleri büyük oranda termik ve doğalgaz kaynaklarına bağımlıdır [1].



Şekil 1. 1 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma

21. yüzyılda artan enerji ihtiyacı ve azalan fosil kaynakları sebebiyle enerji kaynaklarına ilgi giderek artmaktadır. Benzer şekilde düşük verimli merkezi enerji üretim santrallerinin yerini tüketim noktasına yakın lokal üretim almaktadır. Artan enerji verimi ihtiyacı enerji piyasasında serbestleşmeyi de zorunlu kılmaktadır.

Merkezi ve fosil yakıtlara dayanan enerji üretim sistemlerinin verimsiz olmaları, doğaya zarar vermeleri ve azalan fosil yakıtlar sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına ve

tüketim noktasına yakın yerinde üretim sistemleri sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu yerinde merkezi olmayan tüketim noktasına yakın üretim sistemine dağıtık üretim denilmektedir.

Dağıtık üretim kaynakları son yirmi yılda konvensiyonel enerji kaynaklarına ulaşım ve kapasitesinde yaşanan sıkıntılar ile beraber gittikçe önem kazanmaktadır. Özellikle enerji verimliliğinin artması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması dağıtık üretim kaynaklarının (DÜK) mevcut klasik dağıtım sistemine entegrasyonunu hızlandırmıştır. DÜK lerin maliyetlerinde yıllara göre artan oranda azalma markette daha rekabetçi bir şekilde temsil edilmelerini de sağlamıştır.

Klasik merkezi enerji dağıtım sistemi üretimden yüke tek yönlü olarak gerçekleşir [2] [3]. Enerji marketindeki liberalleşme ile beraber gaz emisyonu azaltma trendi ve küçük boyutlu yüke yakın enerji üretiminin teknik avantajları dağıtık üretim kaynaklarının (DÜK) elektrik dağıtım sisteminde daha çok kullanılmasına sebep olmaktadır [2] [3]. DÜK lerin giderek artan kullanımı elektrik dağıtım sistemlerini tek yönlü pasif sistemden çift yönlü aktif hale dönüştürmektedir. Dağıtım üretim kaynakları genel bir ifade ile direk elektrik dağıtım şebekesine bağlanan ve sayacı müşteri tarafında olan geleneksel üretime kıyasla küçük boyutta, merkezi olarak kontrol edilmeyen ve merkezi olarak planlanmayan elektrik üretim kaynaklarını tanımlar [2]. DÜK lerin elektrik dağıtım sisteminde kapasite miktarının artması ve çift yönlü enerji akışı birçok teknik zorluğu beraberinde getirmektedir [4]. Özellikle klasik elektrik dağıtım şebekesine entegrasyon, elektriksel koruma ve kararlılık bunların başında gelmektedir. DÜK lerin koruma sistemine etkisi özel bir önemi haketmektedir. Mevcut elektrik koruma sistemleri tek yönlü radyal şebekelere uyumludur. Çift yönlü güç akışı durumlarında elektriksel koruma özel olarak incelenmelidir [4]. DÜK lerin entegre olduğu ve çift yönlü güç akışının sağlandığı elektrik sistemleri için yapılan koruma analizleri çoğunlukla iletim seviyesine odaklanmaktadır. Bir diğer odaklanılan konu ise dağıtım üretim kaynaklarının tekil olarak kısa devre katlı akımlarıdır.

DÜK' lerin klasik merkezi üretim ve dağıtım sistemine göre tasarlanan mevcut enerji dağıtım sistemine entegrasyonu çözülmesi gereken büyük sorunları da beraberinde getirmiştir. DÜK' lerin entegrasyonu ile artık hibrit olarak isimlendirilen enerji dağıtım

sisteminin kontrol, koruma ve kararlılık konuları bunların başında gelmektedir. Güç sistemleri elektrik mühendisliği sektörü ve akademisi bu konuların çözümüne odaklamış ve bu da son yıllarda bir çok yeniliği beraberinde getirmiştir.

Hibrit enerji sistemlerinde rastlanılan değişken yönlü ve boyutlu arıza akımları klasik tek yönlü aşırı akım röleleri ile sağlanan koruma sistemlerinde büyük problemlere neden olmaktadır. İstenmeye açma ve arızanın röle tarafından farkedilemeyecek kadar düşük olması bunlardan bazılarıdır. Özellikle invertör arayüzlü kaynakların kullanılması ile kısa devre akımları oldukça düşmektedir.

Hibrit enerji sistemlerinde koruma sistemi ile ilgili oldukça geniş bir alanda sınırlı sayıda akademik makale üretilmiştir. Kısaca bu çalışmalar [5] ;

- Dağıtık üretim kaynaklarının arıza katkıları,
- Adaptif röleler ve yeni algoritmalar,
- Negatif bileşen veya harmonikteki aşırı değişim ile düşük genlikli arıza tespit methotları,
- Gerilim temelli korumalar,
- Reaktif güç desteği ile arıza kompanzasyonu olara sınıflandırılabilir.

Markette ise IEC 61850 haberleşme sistemi standardının yayınlanması ile kesici ve röleler IED (intelligent electronic device) olarak isimlendirilen birbirleriyle haberleşebilen cihazlara evrilmiştir. Bu da enerji sistemleri için ileri kontrol imkanı sağlamıştır. Fakat üreticilerin orta gerilim ve alçak gerilim seviyesindeki ürünleri henüz son yıllarda pazarda yer almaya başlamıştır.

Hibrit sistemlere yönelik özellikle ada çalışma durumunda ulusal veya uluslarası standarlarda bir elektriksel kontrol yaklaşımı henüz ortaya çıkmamıştır. IEC komitelerinde 62898-3 olarak 2018 senesi içerisinde yayımlanacak standart ile bir koruma standardizasyonu getirilmek istenmektedir.

Literatürde özellikle pratikte kullanılan güç sistemleri analizi programıları ile mevcutta markette kullanılan röle ve DÜK' ler ile gerçekleştirilen oldukça kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Son yıllarda özellikle yaşanan enerji problemleri sebebiyle hibrit enerj dağıtım sistemlerine global düzeyde artan ilgiye paralel olarak bu sistemlerin koruma, kontrol ve kararlılığı ile ilgili akademik çalışmalar da aynı paralelde artmaktadır. Bu çalışmalar çoğunlukla tek bir dağıtık üretim kaynağının kısa devre etkisine odaklanmakta veya ileri modelleme programları ile markette yer almayan yeni koruma yaklaşımlarını konu almaktadır.

Konuyla ilgili literatürde mevcut marketteki pratik uygulamaya yönelik bütüncül yaklaşımda eksiklik bulumaktadır.

Bu tezde bahsedilen geniş bakış açısını sağlamak hedeflemiştir. Önemli dağıtık üretim kaynakları ve arıza katkıları, kısa devre hesap methotları, ulular ve uluslararası standartlardaki içerik ile hibrit sistem elektriksel modelleri tezde özetlenmiştir. Bu sayede konuyla ilgili tüm teknik altyapı sunulmaya çalışılmıştır.

Elektrik güç sistemleri analizinde markette sıklıkla kullanılan ERACS ve ETAP programları ile gerçek hibrit enerji sistemleri modellenmiş ve çeşitli çalışma senaryoları ile koruma rölelerinin koruma kapasiteleri test edilmiştir. Bu sayede koruma koordinasyonu açısından hibrit enerji sistemleri çok yönlü ele alınmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Dağıtık üretim kaynakalarının kullanımı çok yönlü ve değişken genlikli kısa devre akımları ile karşılaşmamıza neden olmaktadır. Gerçekleştirilen akademik çalışmalar genellikle tek tip dağıtık üretim kaynağını konu almaktadır. En çok kullanılan dağıtık üretim kaynakları ve kısa devre katkıları bölüm 2 de tanımlanmıştır.

İlgili ulusal ve uluslararası standartlar özetlenmiştir. Bunların içerisinde henüz IEC komitesinde tartışılan hibrit enerji sistemi koruma standardı da bulunmaktadır. Bu sayede standartlarıdaki güncel gelişmeler verilmiştir.

Hibrit enerji sistemleri ERACS ve ETAP programları ile modellenmiş ve mevcut koruma röleleri kullanılarak koruma koordinasyonu sağlanmıştır.

Orta gerilim sağıtım seviyesinde aşırı akım- yönlü aşırı akım- diferansiyel-gerilim röleleri ve arıza kompanzasyonu methotları ile güç sistem analiz programlarında çeşitli çalışma senaryoları oluşturularak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma senaryoları şebeke-senkron jeneratör ve IADÜK içeren hibrit enerji sistemlerinin farklı kombinasyonlarını içermektedir.

Öncelikle DÜK' lerin şebeke ile paralel ve ada çalışma modundaki kısa devre katkı akımları ve yük akış analizi gerçekleştirilmiştir.

Ardından 6 arıza noktası için aşırı akım, yönlü aşırı akım, diferansiyel röle, gerilim rölesi ve arıza kompanzasyon methotu ile koruma kordinasyonu gerçekleştirilmiştir.

Son olarak çalışma senaryosu ve röle koruma kombinasyonlarından ulaşılan açma süreleri dikkate alınarak sistemin gerilim ve frekans kararlılığı incelenmiştir.

Alçak gerilim seviyesinde hibrit bir enerji dağıtım sistemi için de benzer şekilde fakat sadece aşırı akım ve toprak kaçağı röleleri kullanılarak bir koruma koordinasyonu gerçekleştirilmiştir.

Sonuç bölümünde elde edilen bulgular tartışılmış ve çizelge ile özetlenmiştir.

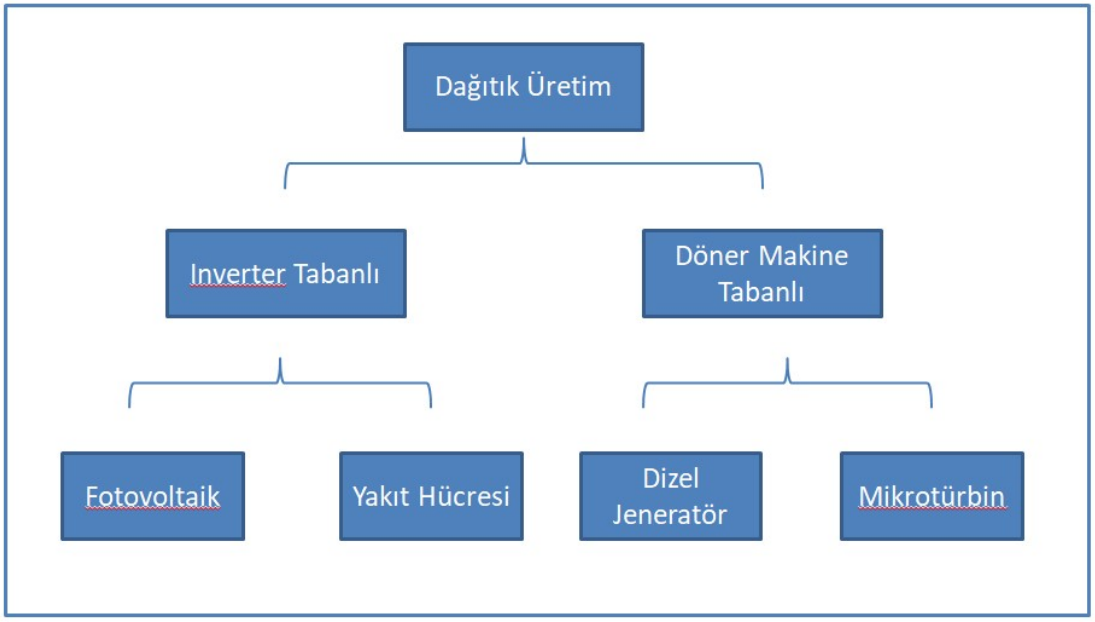
BÖLÜM 2

DAĞITIK ÜRETİK ENERJİ SİSTEMLERİ

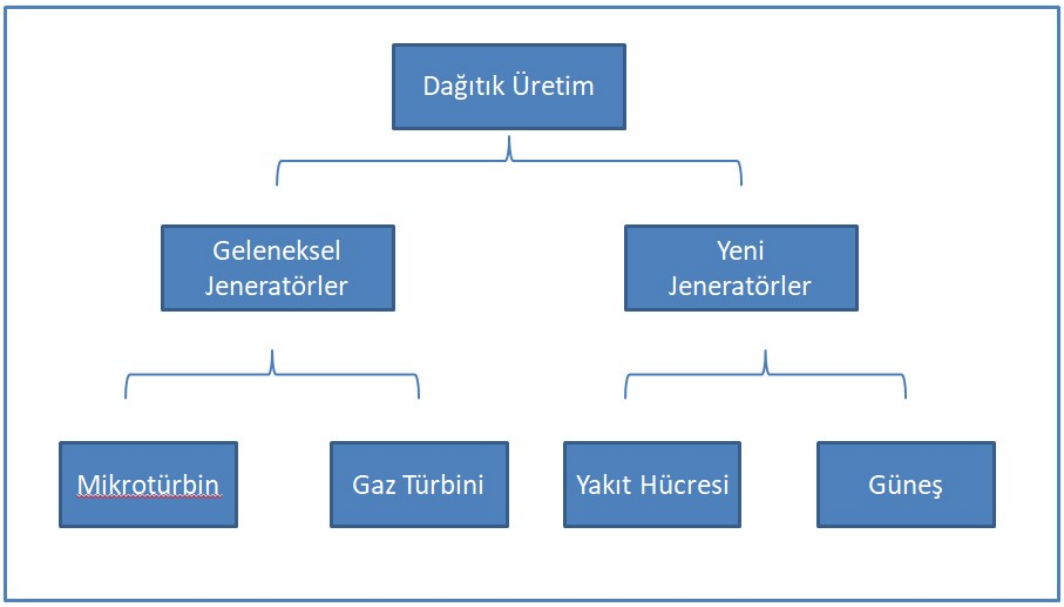
Bu bölümde çeşitli dağıtık üretim kaynaklarının sınıflandırmaları, çalışma prensipleri ve arıza akımı katkıları tanımlanmıştır.

2.1 Sınıflandırma

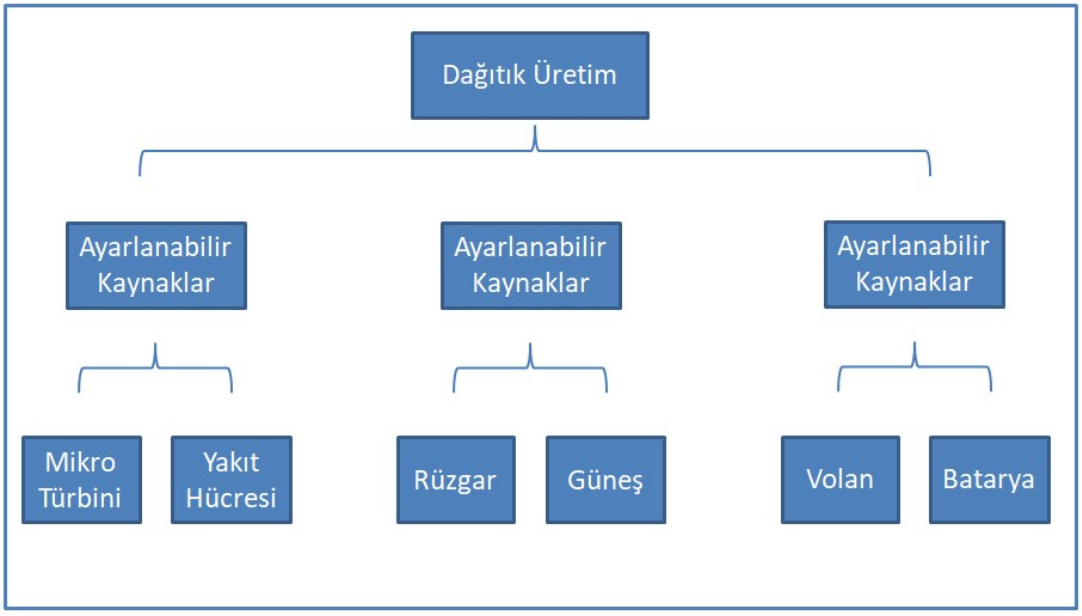
Dağıtık enerji kaynakları çeşitli şekilde sınıflandırılabilirler. Aşağıda bazı örnek sınıflandırmalar gösterilmiştir [6] [7].



Şekil 2. 1 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma



Şekil 2. 2 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma



Şekil 2. 3 Dağıtık üretim kaynaklarında sınıflandırma

İlerleyen bölümde invertör tabanlı enerji kaynakları fotovoltaikler, yakıt hücreleri, rüzgar türbinleri ve döner makine tabanlı dizel ve doğalgaz jeneratörleri hakkında bilgiler verilecektir. Ayrıca bu dağıtık üretim kaynaklarının kısa devre davranışları tanımlanacaktır.

2.2 Kombine Isı ve Güç Sistemleri (KIGS)

Kojenerasyon olarakta adlandırılırlar. Tek bir enerji kaynağından elektrik ve ısı gücü elde edilir. Bu sistemler elektrik enerjisinin yanında önemli miktarda ısı talebi olan uygulamarda kullanılırlar [8].

Kombine güç ve ısı sistemleri motorda yakılan yakıt ile elde edilen enerjinin bir alternatör aracılığıyla elektrik üretmesi için kullanılır. Motordan yayılan ısı (atık ısı) domestik ısıtma veya endüstryel amaçlı ısı enerjisi olarak kullanılır. Atık ısı ayrıca absorpsiyon soğutucusu üzeriden soğutma sağlamak için de kullanılabilir [8].

KIGS' ler elektriksel güçlerine göre tanımlanır ve sınıflandırılırlar.

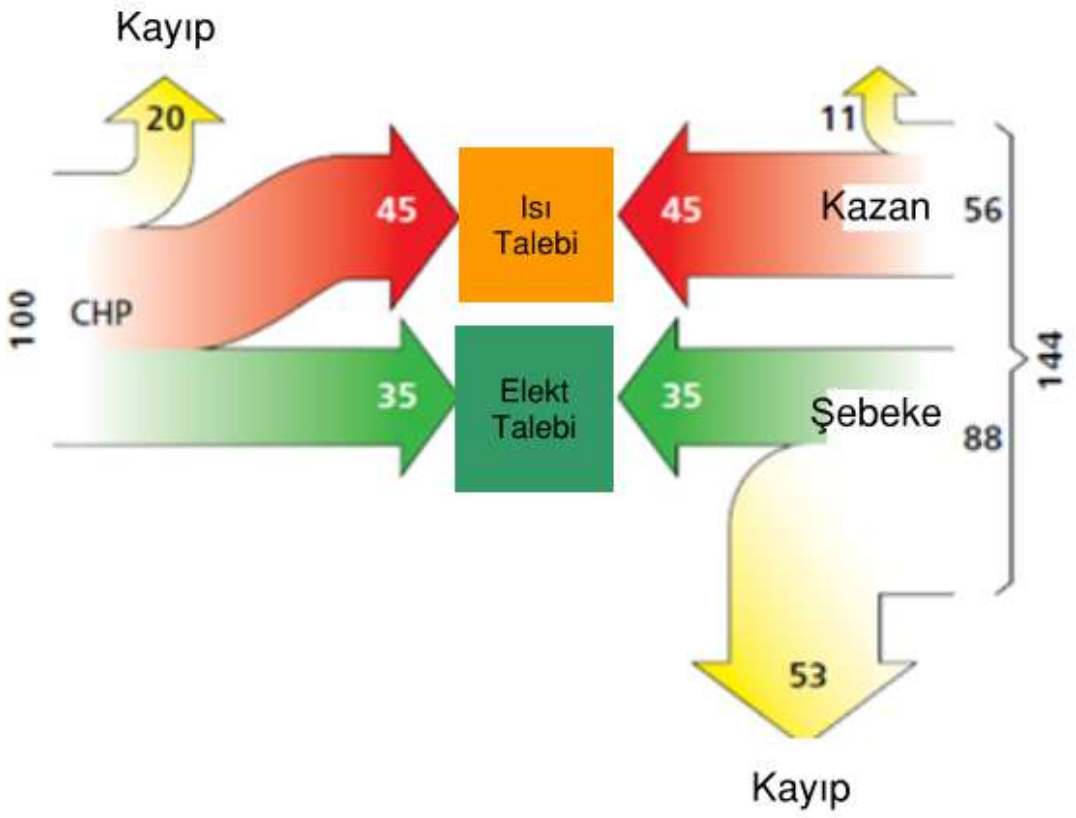
Çizelge 2. 1 KIGS sınıflandırma

KIGS Sınıflandırması	Elektriksel Güç
Mikro	< 5kW
Mini	5-500kW
Küçük Boyutlu	500kW-5MW
Orta Boyutlu	5-50MW
Büyük Boyutlu	50+MW

KIGS' lerinin çevresel faydası ürettiği ısı sayesinde artan enerji veriminden kaynaklanır. Geleneksel elektrik üretim santrallerinde yakıtın yanması ile üretilen ısı dış ortama salınır. Bu atık ısıyı kullanılması ile KIGS' ler %80 üzerinde enerji veririmliği sağlarlar.

Ayrıca elektrik yerinde üretildiği için geleneksel merkezi üretimde karşılaşılan iletim kayıpları da söz konusu olmaz.

Çevresel ve enerji verimliliği gibi faydalarının yanında KIGS' ler üretilen elektrik üretim kalitesi açısından da tercih sebebidirler. Kontrol sistemleri sayesinde üretilen elektriğin kalitesini artırırlar [9].



Şekil 2. 4 Kojenerasyon sistemlerinde ısı ve güç verimliliği

Geleneksel kaynaklar ile ısı ve elektrik enerjisi üretimi ve KIGS karşılaştırması

KIGS Tipleri

KIGS' leri çok çeşitli motor teknolojileri ve yakıt kullanımları ile markette bulunmaktadır. İçten yanmalı motorlar, buhar türbinleri, gaz türbinleri ve kombine çevrim sistemleri bunlardan bazılardır.

İçten Yanmalı Gaz Türbinleri (50kW' tan 10MW' a kadar)

En yaygın kombine ısı ve güç çevrim sistemleridirler. 50kW - 10MW güç aralığında üretilirler ve 10-15 yıl ortalama ömürleri vardır.

Atmosferik ve turboşarj gaz motor tipleri vardır. Turbo motorlar elektriksel verimi %33 ten %35 e çıkartırlar.

Atmosferik motorlarda hava ön sıkıştırma olmaksızın motora alınır. Ortam havası ve sıcaklığı hava-yakıt oranını etkiler ve aşırı sıcak ortamlarda verim düşer.

Turboşarjlı motorlarda ise hava egzoz buhar akış yolu içerisindeki bir türbin tarafından sürülen kompresörden geçerek motora aktarılır. Bu sayede hava kütlesi akış hızı artar. Aynı doğrultuda motor çıkış gücü de artış gösterir. Turboşarj ünitelerinin dezavantajı kompresör sebebiyle oluşan aşırı ısıdır. Isıyı sistem tarafından kabul edilen bir seviyeye getirebilmek için intercooler ve aftercoolerda hava sıcaklığı soğutulmalıdır. Intercooler dan ortama salınan ısı geridönüşüm üniteleri ile tekrar kullanılabilir. Isı geri dönüşüm sistemi KIGS' lerine entegre, kapalı devreli ve bina ısıtma sistemi ile bir plakalı ısı eşanjörü üzerinden arabağlantısı vardır.

1MW tan küçük üniteler genellikle akustik kabinli olurlar. Unitelerin yakıt yanma hava ihtiyacı ve motor ısısını ortam dışına atmak için bir havalandırma sistemi tasarlanmalıdır.

İçten yanmalı doğal gaz motorlu KIGS' lerinin ana ekipmanları aşağıdaki gibidir;

Motor; Jeneratörü sürer.

Yakıt sistemi; Uygun basınçta gaz sağlar

Jeneratör; Bina dağıtım sistemine elektrik sağlar

Isı çevrim sistemi; Motordan kullanılabilir ısının geri kazanımı sağlar

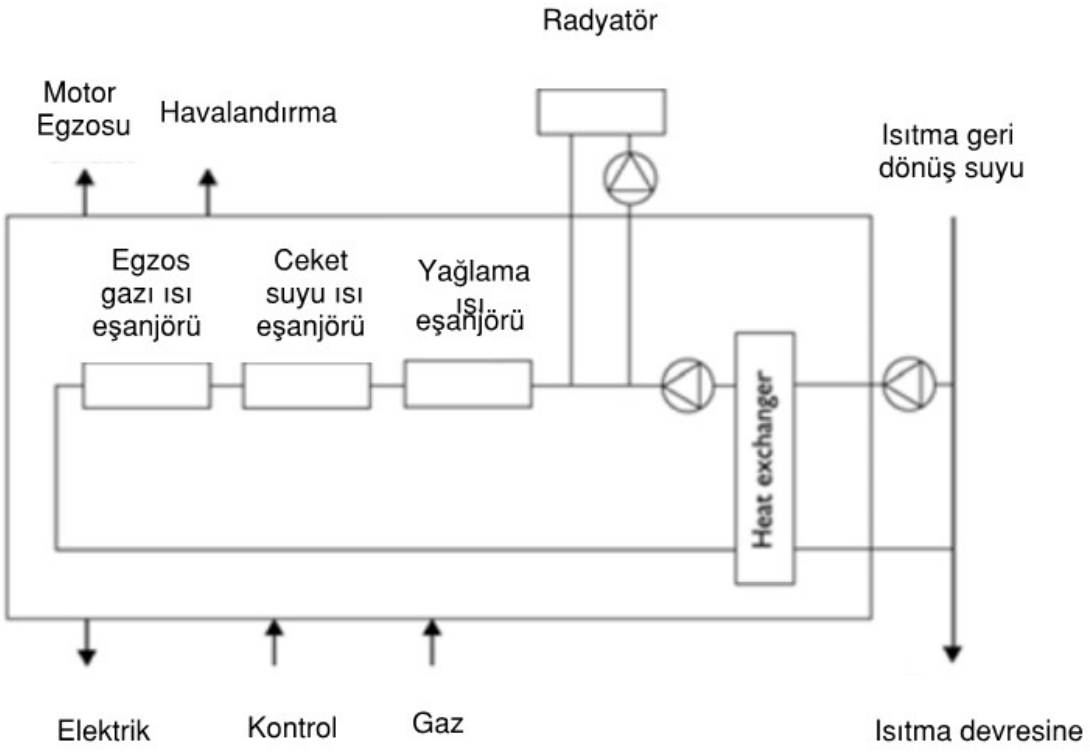
Soğutma sistemi; Motordan kullanılamayan ısının atılmasını sağlar.

Kompresör ve havalandırma sistemi; Motora yakıt için temiz hava sağlanmasını ve atık ısının dış ortama taşınmasını sağlar.

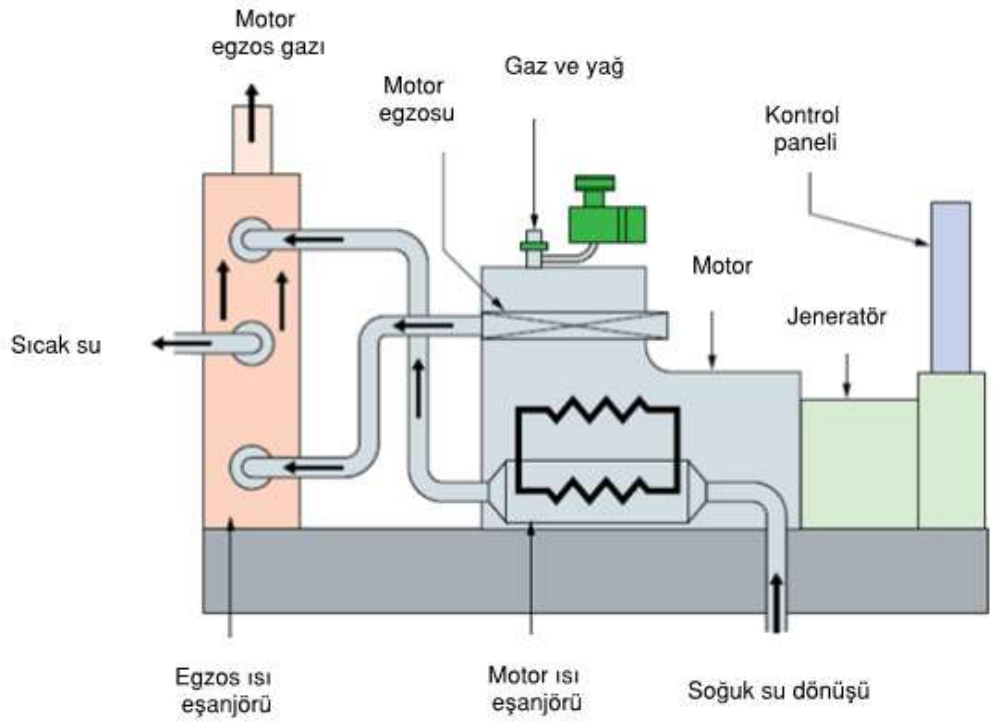
Egzoz gazı susturucu ve bacası; Egzoz gazının herhangi bir gürültüye ve rahatsızlığa sebep olmadan dış ortama atılmasını sağlar.

Kontrol sistemi; Ünitenin şebeke ile senkronize olmasını ve uzaktan kontrol edilmesini sağlar

Kabin; Ünitenin çevresel ve fiziksel korumasını sağlar ayrıca gürültüyü önler.



Şekil 2. 5 KIGS ünitesi blok diyagramı



Şekil 2. 6 KIGS ünitesi blok diyagramı

Bu ünitelerde senkron ve asenkron olmak üzere iki tip jeneratör kullanılır. Senkron makinalar 50 hz şebeke frekansını sağlayacak şekilde 1000-1500-3000 dev/dk da sabit hızda dönerler. Şebeden ayrıldıkları durumlarda ada çalışmada sabit bir frekansta çalışmaya devam edebilirler. Ana kaynak ile gerilim, frekans ve faz senkronizasyonunu sağlamak için kontrol sistemi gerekmektedir. Asenkron jeneratörlerin standart bir frekans sağlama kabiliyetleri yoktur. Bunun yerine ana kaynağın frekansını izlerler. Asenkron jeneratörler ile şebekeden bağımsız ada çalışma mümkün değildir. KIGS' lerinin çok büyük bir çoğunluğu senkron jeneratöre sahiptir. Bunlar 1MW gücüne kadar alçak gerilim, 3MW' ın üstünde ise yüksek gerilim jeneratörleridir. 1MW-3MW güç arasında tesis maliyet ve fizibilete çalışmasına göre alçak gerilimli veya yüksek gerilimli olabilirler [9].



Şekil 2. 7 KIGS ünitesi örnek bir resim

Mini ve küçük boyutlu KIGS' ler (<50kW)

Son yıllarda uzun çalışma saatlerine (10000 saat) uygun küçük boyutlu KIGS' leri markette yer almaya başlamıştır. Daha çok küçük ticari alanlar ve konutlar da tipik uygulamarı görülür [9].



Şekil 2. 8 mini KIGS ünitesi

Mikro gaz türbinleri

Tipik olarak yaklaşık 100kW elektrik enerjisi üretirler. Son 10 yılda markette yer almışlardır. Bu türbinler uzun çalışma saatleri ve invertör arayüzlü DC jeneratörleri ile büyük boyutlu ünitelerden ayrılırlar. Uzun bakım aralıkları sebebiyle bakım maliyetleri düşüktür. Bu faydalarına karşın verimliliği büyük boyutlu ünitelerde kullanılan içten yanmalı gaz türbinlerine göre düşüktür [9].

Bireysel konut kullanımlı üniteler (<2kW)

Konutlarda bireysel kullanımlı KIGS' lerin geliştirilmesi son yıllarda araştırma ve geliştirme faliyetleri arasındadır. Bu uniteler dairenin ısısını ve elektrik üretimini aynı anda sağlarlar. Böylece merkezi ısı dağıtım sistemlerinin maliyetinden tasarruf edilebilir. Yardımcı brülör ile tepe ısı talebinin karşılanması sağlanır [9].

Bu üniteler ikiye ayrılırlar;

<u>Stirling motoru;</u>

Isı enerjisinin harici bir ısı eşanjörü ile sağlandığı yanmalı motorlardır. Dıştan yanmalı motor olarak da isimlendirlirler. İçten yanmalı motlara göre verimleri daha düşüktür

fakat küçük boyutlu konutsal uygulamara sessiz olmaları ve titreşim problemleri olmaması sebebiyle daha uygundurlar

Yakıt hücresi;

Kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretim prensibine dayanır. Diğer KIGS' lere göre daha yüksek elektrik verimliliğine sahiptirler. Aynı doğrultuda daha az CO2 emisyonu ve maliyet tasarrufu sağlarlar. Yakıt hücre kullanımlı KIGS' ler bu avantajlarına karşın oldukça maliyetli ve görece daha büyük boyutludurlar.

Büyük boyutlu KIGS' ler

Gaz türbinler

Gaz türbinler 500kW' tan 200MW gücüne kadar üretilirler. Genellikle endüstryel uygulamalarda 2.5MW ve daha yüksek güçlerde sıklıkla kullanılırlar. Egzozdaki yüksek dereceli ısı proses buhar üretmekte veya bir atık ısı kazanı ve buhar türbinine bağlanarak ikincil elektrik üretiminde kullanılır.

5MW elektrik gücüne kadar açık çevrimli gaz türbinleri içten yanmalı gaz motorlarına göre daha düşük elektrik verimliliğine sahiptir.

Gaz türbinlerinin yüksek basınçlı gaz ihtiyacı içten yanmalı gaz motorlarına göre daha yüksektik. Bu sebepten kompresörün elektirk ihtiyacının sağlanması çok önemlidir. Büyük boyutlu KIGS' lerinin gaz türbinleri oldukça yüksek sıcaklıkta egzoz gazı üretirler. Bu egzoz gazı ısı geri kazanım üniteleri sayesinde aynı doğrultuda yüksek sıcaklıklı su ve buhar üretirler.

Buhar dağıtım sisteminin gerektiği hastane, üniversite ve endüstyel uygulamaları oldukça yaygındır [9].

Kombine ısıtma, soğutma ve güç sistemi (KISGS) (Tri-generation)

KIGS üniteleri atık ısıyı eşanjörler üzerinde veya buhar kazanları üzerinden sistemine geri kazandırır. Fakat bu atık ısının absorpsiyonlu soğutma üniteleri üzerinden soğutma enerjisi olarak kullanıması mümkündür. Bu üniteler kombine ısı, soğutma ve güç sistemleri (KISGS) (Tri-Generation)' leri olarak isimlendirilir.

Temel olarak iki çeşit absopsiyonlu soğutma ünitesi vardır. Bunlar tek etkili ve çift etkili olarak isimlendirilir. Tek etkili soğutucunun CoP si 0,7 civarındadır ve düşük ısılı sıcak su ile çalışır. Çift etkili soğutucular ise yüksek ısılı sıcak su, buhar veya egzoz gazı kullanır ve CoP 1.3' tür [9].

KIGS lerinin elektrik dağıtım sistemine bağlantısı

Bu üniteler büyük çoğunlukla 415V ve 50Hz, 3 faz üretim sağlayacak şekilde üretirler. Tesis edilecekleri tesisin alçak gerilim barasından uygun devre kesiciler ile sisteme bağlanabilirler. Daha yüksek elektrik gücündeki uygulamalarda alçak gerilimden bağlantı iletken boyutları ve arıza gücünün yüksek olması sebebiyle mümkün olmayabilir. Bu durumlarda yükseltici (step-up) transformatörler ile 11kV dağıtım sistemine bağlanabilirler. Genellikle 2MW civarındaki güçlerde alçak gerilim jeneratörleri tercih edilir.

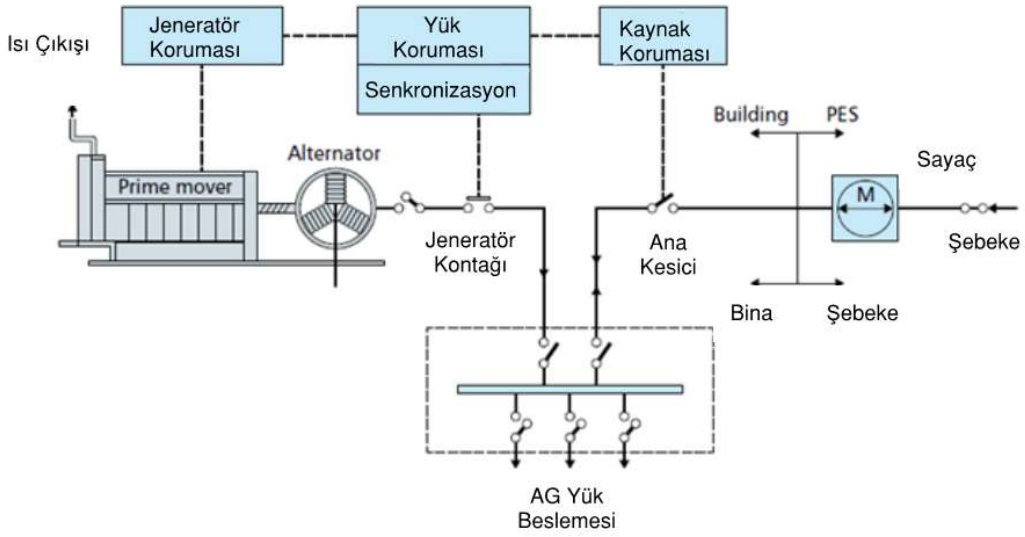
İlerideki ünitelerde dağıtık üretim kaynaklarının sisteme bağlantısı ile ilgili yönetmelik hakkında bilgi verilecektir. Fakat kısaca bahsetmek gerekirse KIGS üniteleri iç ihtiyacı sağlayacak veya ulusal elektrik şebekesine enerji verecek olmak üzere iki şekilde tesis edilirler. Her iki durumunda ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde bağlantıda detayları verilmiştir. Energy Network Association (ENA) dağıtık üretim ekipmanlarının sisteme bağlantısını tanımlayan iki rehber kılavuz yayınlamıştır;

- Distributed Generation Connection Guide: A Guide for connection generation that falls under G59/2 to the distribution network (ENA, 2011a)
- Distributed Generation Connection Guide: A Guide for connection generation that falls under G83/1 (Stages 1 and 2) to the distribution network (ENA, 2011b)

G83/1 standardı 3 fazlı 11kW' ın altında ve 1 fazlı 3.68kW üretim kaynaklarına yöneliktir.

KIGS' ler doğal gaz türbinleri ve motorlarının değişken yüklere cevap verebilme dinamiği ve sürekli çalışmadan kaynaklanan olası arıza-bakım durumları sebebiyle yedek enerji kaynağı olarak kullanılmamalıdır [8].

Tipil bir bağlantı şematiği;



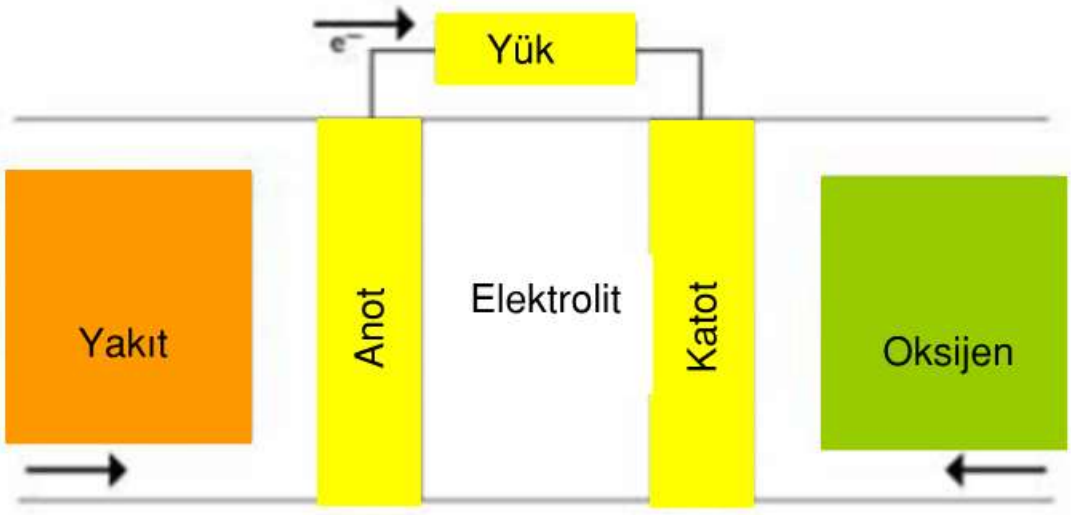
Şekil 2. 9 KIGS ünitesi alçak gerilim seviyesinden tipik şebeke bağlantı şeması

2.3 Yakıt Pilleri (YP);

Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi reaksiyonlar ile elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal cihazlardır. Temel bileşenleri elektrolit, anot ve katottur. Bu çevrim reaksiyonu sonucunda ısı açığa çıkar [10].

Temel bileşenleri;

Elektrolit, anot ve katottur. Gaz formundaki yakıtlar sürekli olarak anotu beslerken, oxidant ise katotu besler. Anot ve katot elektrolit ile birbirlerinden ayrılırlar. İyonlar elektrolit üzerinden anot ile katot arasında akar. Harici bir yük üzerinden de devre tamamlanır. YP' lerin hepsi bu prensipte olsa da aralarında çeşitli farklar vardır [10].



Şekil 2. 10 Yakıt pili çalışma prensibi

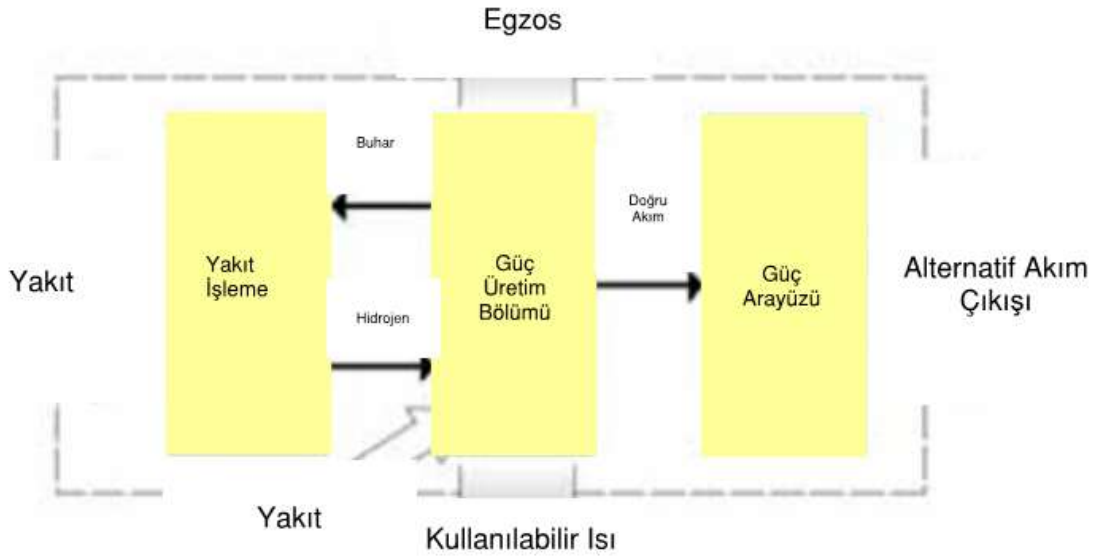
Her bir yakıt pili 1V üretir ki bu pratik uygulamar için oldukça küçüktür. Kullanılabilir bir gerilim seviyesi elde edebilmek için piller seri olarak birarada kullanılmalıdır. Bir grup yaklaşık olarak 100 adet hücreden oluşur. Bu hücreleri elektriksel olarak seri bağlamak ve fiziksel ayrım sağlamak amacıyla seperatörler kullanılır. Temel yakıt kaynakları hidrojen gazıdır. Yakıt pillerinde kullanılan hidrojen gazı yakıt dönüştürü kullanılarak doğal gaz, kömür gazı, methanol, çöp gazı, biyogaz ve diğer hidrojen içeren yakıtlardan elde edilebilir. Tipik bir yakıt pili aşağıdaki içerir [8];

- Yakıt dönüştürücü
- Kükürt giderici
- Su yönetim sistemi
- Güç ekipmanları, transformatör, invertör
- Isı geri kazanım üniteleri
- Kontrol sistemi

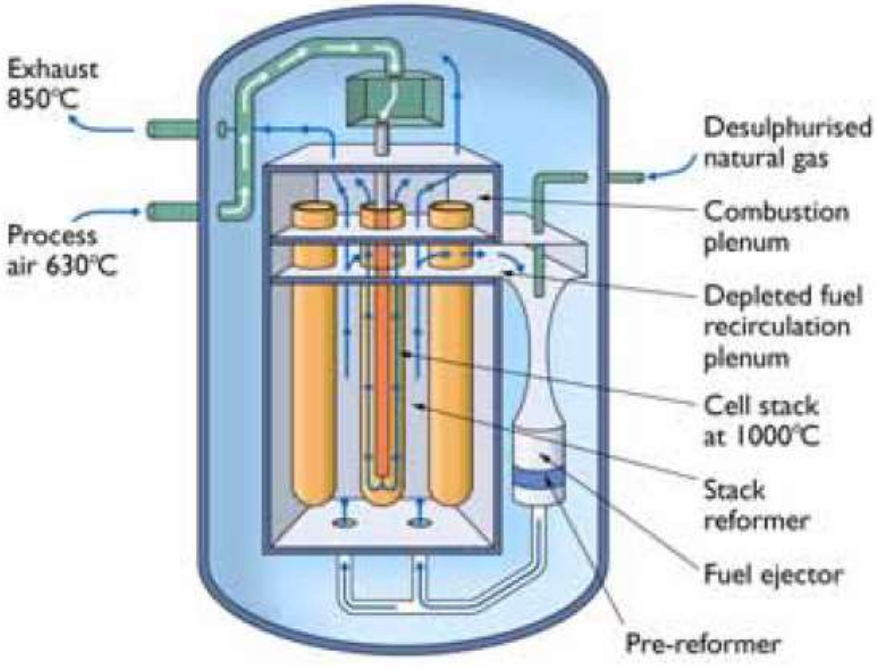
Yakıt pilleri saf hidrojen ile çalıştırılabilirlerse hidrojen salınımı yapmazlar. Fakat çoğu bina uygulamasında hidrojen gazını elde edebilmek için yakıt dönüştürücü kullanılır. Karbon içeren yakıtlardan (doğal gaz vb.) dönüştürü aracılığla hidrojen gazı elde edilir. Bu işlemin bir sonucu da her ne kadar geleneksel kaynaklardan az olsa da karbon salınımıdır.

Bir yakıt hücresinin elektriksel verimliliği %40-%55 aralığındadır. Atık ısının kullanılması durumunda ise bu oran oldukça artacaktır. Kojenerasyon uygulamalarına oldukça uygundurlar.

YP ler boyutlarından bağımsız olarak yaklaşık olarak aynı verimlilikte çalışırlar.



Şekil 2. 11 Yakıt pili blok şeması



Şekil 2. 12 Yakıt pili detayı

YP Sistem Tipleri

Bina uygulamarı için birçok YP geliştirilmiştir. Bunların başlıcaları;

- Proton exchange membrane (PEMFC)
- Alkaline (AFC)
- Phoshotic acid (PAFC)
- Molten carbonet (MCFC)
- Solid oxid (SOFC)

Bu YP' leri arasında sadece PAFC' ler ticari olarak bina uygulamarında kullanılmaktadır. Bununla beraber PEMFC ve SOFC' ler ile ilgili araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

FC ler DC elektrik üretimi sağlarlar. Dağıtım sistemine bağlanmaları için DC/AC çeviriciler kullanılması gerekmektedir. Ayrıca ihtiyaca göre yükseltici transformatörlerine de gereksinim olabilir. Kontrol üniteleri ise yakıt kontrolü ve üretilen elektrik enerjisini düzenlemek için kullanılırlar.

Kullanım alanları-Nerelerde kullanılırlar

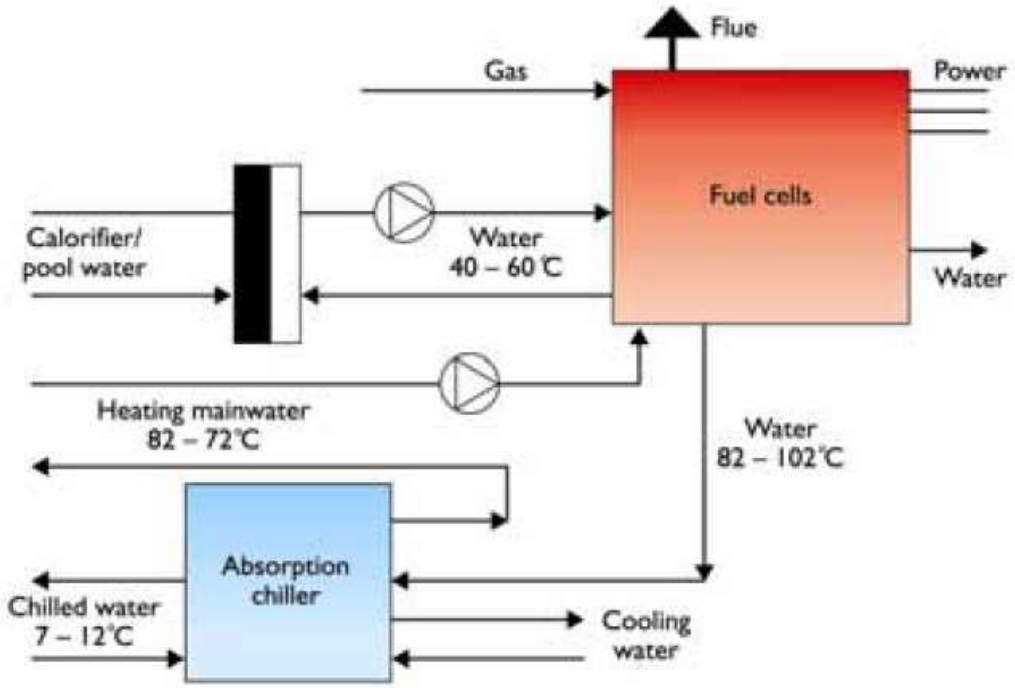
- Tekil yüklere hizmet edecek uygulamarda.
- Yedek enerji kaynağı olarak kullanılabilirler,
- Şebeke ile sürekli paralel çalışabilirler. Şebeke sadece tüketimin YP nin maksimum gücünü geçmesi durumunda talebi karşılar.
- Şebekeye sürekli enerji sağlayacak şekilde çalışabilirler.

Atık ısı kojenerasyon uygulamalarında geri kazandırılabilir. Geri kazanım atık ısının sıcaklığı, akış hızı ve tesisin sıcaklık talebine göre değişiklik gösterir.

YP tiplerinin atık ısıları aralarında farklılık gösterir. PAFC uygulamalarında atık ısı 80^{o}C iken SOFC' lerde ise 1000^{o}C kadar çıkabilir. Kojenerasyon uygulamalarında YP tesisin ihtiyacı olan sıcaklık profiline göre seçilmelidir.

Atık ısının akış hızı da geri kazanımın verimliliğini etkiler. Atık ısının sıcaklığı yeterli olabiliyorken akış hızı tesisin ihtiyacını karşılamıyor olabilir.

YP ve ısı geri kazanım ünitesinin tesis edildiği tesisin ısı yükü profili de oldukça önemlidir. YP lerinde ısı geri kazanımı gösteren örnek bir şematik;



Şekil 2. 13 Yakıt pili kojenerasyon uygulaması blok şeması

Kojenerasyon sistemlerinde YP leri aşağıdaki yollar ile kullanılabilir;

- Elektrik yük takibi;

YP tesisin elektrik talebini takip edecek ve karşılayacak şekilde kontrol edilir. Atık ısı geri kazanım sistemi ile kullanılır. Isı talebinin yeterli olmaması sebebiyle kullanılamayan ısı ortama salınır.

- Termal yük takibi;

YP tesisin termal yük talebini takip edecek şekilde çalışır. Üretilen enerjinin tesis elektrik talebini aşması durumunda şebeke satılır. Elektrik talebinin YP nin anlık olarak ürettiği kapasitesi aşması durumunda ise ihtiyaç şebekeden karşılanır.

- Sabit elektrik kaynağı;

YP ünitesi sabit bir elektrik yükünü karşılayacak şekilde belirlenen bir sabit güçte çalıştırılır. Kullanılamayan atık ısı ortama salınır. Üretilen elektriğin ihtiyaçtan fazla olması durumunda şebekeye iletilir.

- Sabit termal yükü kaynağı

YP ünitesinin çıkışı maksimum termal enerjiyi verecek şekilde çalıştırılır. Ek ısı kaynağı tepe yükler için gerekebilir. Anlık talebe göre üretilen fazla elektrikl şebekeye satılabilir veya gerektiği kadar şebekeden sağlanabilir.

Uygulamada dikkate alınması gerekenler

YP lerin en verimli olduğu şart maksimum elektrik ve ısı tüketiminin olduğu yük profilidir. Fakat pratikte mutlaka üretim ve tüketim arasında fark olacağı dikkate alınarak geri dönüş süresi hesaplanması gerekmektedir. YP üretim tesisleri gerekli müdahale boşlukları dikkate alınarak tasarlanmalıdır. YP' ler göreceli olarak çok küçük ekipmanlar değillerdir. 200kW' lık PAFC nin boyutları 3 x 6 metredir. Ayrıca her tarafından müdahale için gerekli alanın sağlanması gerekmektedir. Tesis edilmiş YP örnekleri;



Şekil 2. 14 Yakıt pili bina uygulaması örneği



Şekil 2. 15 Yakıt pili bina uygulaması örneği



Şekil 2. 16 Yakıt pili bina uygulaması örneği

YP' ler sessiz olmalarından dolayı binalara daha yakın konumlandırılabilirler. Güneş pilleri dışındaki diğer dağıtık üretim kaynaklarına göre daha az ses ve ısı yayarlar. YP tesislerinde drenaj ve zemin eğimi de dikkate alınmalıdır.

Elektrik bağlantısında dikkat edilmesi gerekenler;

YP nin bağlanacağı tesisin gerilim seviyesine göre yükseltici transformatör gerekebilir.

İnverter arayüzlü bir kaynak olması sebebiyle arıza katkısı oldukça düşüktür.

Şebekeye bağlantısı için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'ndan özel izin alınması gerekmektedir.

Standartlar;

EN 62282-3-1

Fuel Cell Technologies. Part 3-1. Stationary Fuel Cell Power Plants. Safety

BS EN 62282-3-2

Fuel Cell Technologies. Part 3-2: Stationary Fuel Cell Power Systems – Performance Test Methods

EN 62282-3-3

Fuel Cell Technologies. Part 3-3. Stationary Fuel Cell Power Plants. Installation

Elektriksel Koruma Standartları;

G83/1. Recommendations for the Connection of Small-Scale Embedded Generators (up to 16 A per phase) in Parallel with Public Low-Voltage Distribution Networks

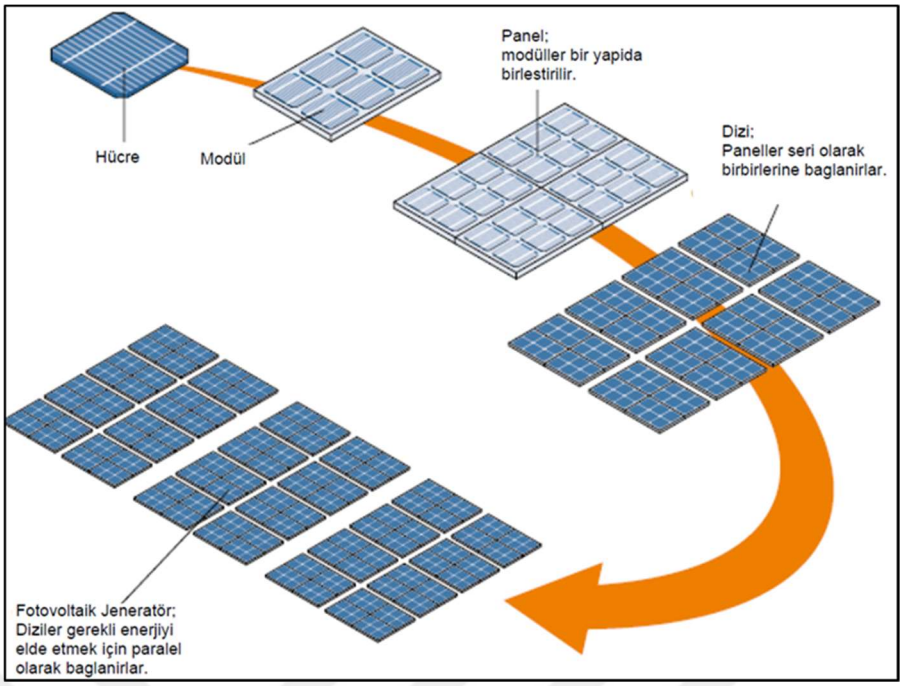
G59/1. Recommendations for the Connection of Generating Plant to Public Electricity Suppliers Distribution Systems

Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik

2.4 Güneş Pilleri

Güneş pilleri (fotovoltaik hücreler) güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirirler. Bu hücreler genellikle kalınlıkları 0,3mm ve yüzeyleri 100’ ile 225 cm2 arasında olan ve yaygın olarak silikon yarı iletken ince yüzeylerden oluşurlar.

Hücreler modülleri, modüller panelleri, paneller dizileri diziler de fotovoltaik tarlaları oluşturur [11].



Şekil 2. 17 Güneş pili yapısı

Başlıca fotovoltaik teknolojileri

- Monokristal silikon

- Multikristal silikon ve

- İnce filmdir.

Aşağıda başlıca fotovoltaik teknolojilerinin karşılaştırması örnek bir çizelgede gösterilmiştir [11].

Çizelge 2. 2 Fotovoltaik teknolojileri

Fotovoltaik Teknolojilerinini Karşılaştırılması			
	Monokristal Silikon	**Multikristal Silikon**	**İnce Film (amorphous silikon)**
Verim	%14-%17	%12-%14	%4-6
Avantajları	Yüksek verim	Düşük maliyet	Düşük maliyet
	Sabit verim	Basit üretim	Azaltılmış sıcaklık etkisi
	Güvenilir teknoloji	Optimum boyutlar	Radyasyon yayılımı ile yüksek enerji çıkışı
Dezavantajlar	Üretim için daha yüksek enerji gerekir	Üretim prosesinde pürüzsüzlüğe hassasiyet	Büyük boyutlar
			Montaj zamanı ve yapı maliyeti

2.4.1 Fotovoltaik Inverterleri ve Çalışma Modları

Fotovoltaik kaynakların güç kontrolü inverter tarafından yönetilir. Inverter doğru akımı alternatif akıma çevirir ve MPPT noktasında çalışarak çıkış gücünün miktarını ile kalitesini kontrol eder.

Fotovoltaik inverterleri şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız veya ada çalışma olarak iki modda çalışabilirler.

- Şebekeden bağımsız (ada çalışma) çalışmada yükü ve yük değişimlerini gerilimi mümkün olduğu kadar sabit tutarak karşılamaya çalışır.
- Şebekeye bağlı çalışmada inverter çıkışlarında şebeke gerilimi sağlanmalıdır. Aynı zamanda MPPT (maksimum güç noktası takibi) çalışma ile fotovoltaik modülün güç çıkışı maksimize edilmeye çalışılır.

2.4.2 Inverter ara yüzlü dağıtım üretim kaynaklarının (IADÜK) farklı kontrol sistemlerinde kısa devre arıza davranışları

Güneş pilleri, yakıt pilleri ve mikro türbinler gibi dağıtım üretim kaynakları elektrik dağıtım sistemine direkt olarak bağlanmaya uygun olmayan üretimleri sebebiyle bir inverter üzerinden bağlanırlar. Fakat arıza anında bu DÜK' lerin kısa devre akımları inverter tarafından kısıtlanır. Bu durum özellikle ada çalışmada düşük kısa devre akımlarına ve bu doğrultuda koruma koordinasyonunun sağlanamamasına neden olmaktadır.

DÜK inverterlerinin temel olarak iki çeşit kontrol modu bulunmaktadır.

-Akım kontrollü (Sabit akım kontrollü ve PQ kontrol)

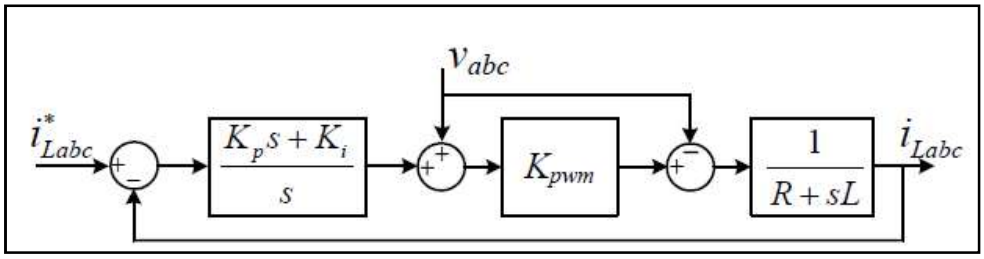
-Gerilim kontrollü (V/f kontrol – droop kontrol)

Dört kontrol sisteminin blok diyagramı aşağıda sıra ile gösterilmiştir.

Sabit akım kontrolü IADÜK' lerin blok diyagramı;

Sabit kontrollü IADÜK' ler çıkışlarında sabit bir akım sağlarlar. Kontrol sistemi "abc" yapısında (abc frame) sağlanır.

PI kontrolcü referans akım değerini elde etmek için kullanılır [12] [13].

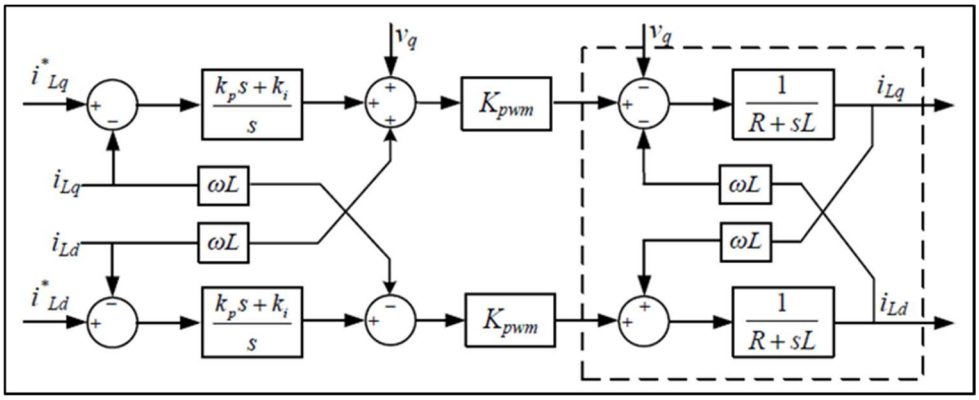


Şekil 2. 18 IADÜK PI kontrolcü blok şeması

PQ kontrollü IADÜK' lerin blok diyagramı;

Sabit güç değerini elektrik şebekesine aktarmak için kullanılır. dq ekseninde (senkron referans yapısı) kontrol edilir.

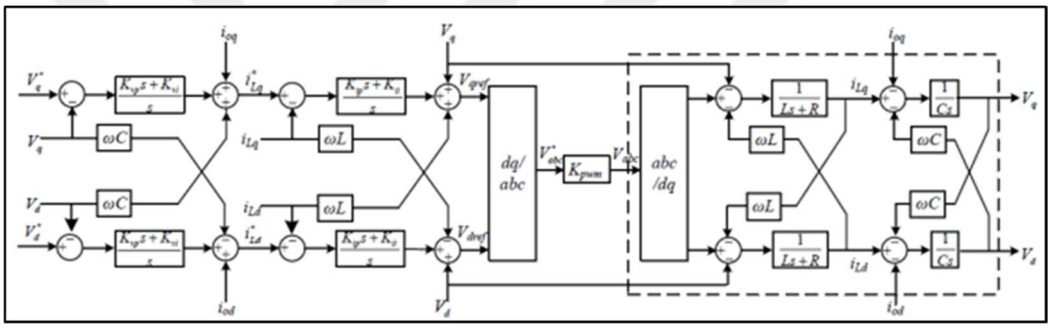
PQ ve sabit akım kontrolleri arasındaki fark sabit akım kontrollünde şebeke gerilimindeki dalgalanmalara göre çıkış akımı değişmiyor iken PQ kontrollü sistemde değişebilir [12] [13].



Şekil 2. 19 IADÜK PQ kontrol blok şeması

V/f kontrollü IADÜK'lerin blok diyagramı;

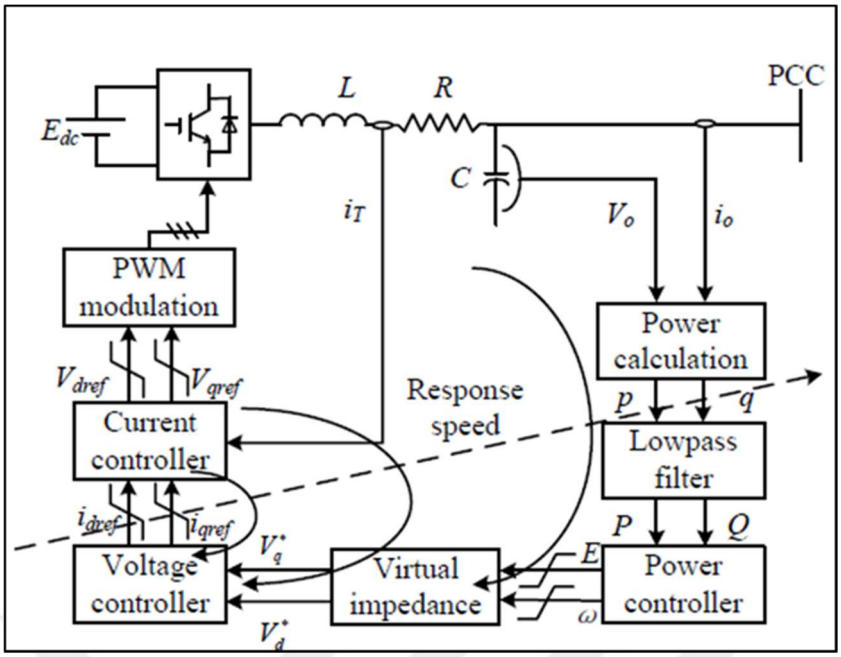
V/f kontrollü IADÜK'ler yaygın olarak ada modunda sabit gerilim ve frekans sağlamak için kullanılır. Kontrol sistemi dq yapısındadır [12] [13].



Şekil 2. 20 IADÜK V/f kontrol blok şeması

Droop kontrollü IADÜK'lerin blok diagramı;

Droop kontrolü IADÜK'ler yük paylaşım özellikleri sebebiyle genellikle mikro şebekelerde kullanılırlar. Kontrol prensibi V/f kontrol sistemi ile benzerdir [12] [13].



Şekil 2. 21 IADÜK droop kontrolcü blok şeması

Inverter tabanlı kontrol tiplerinin simetrik ve asimetrik arıza durumlarında aşağıda Çizelgeda gösterildiği şekilde modellenebilirler.

Çizelge 2. 3 Invertör tabanlı kontrol sistemlerinin arıza karakterleri

Kontrol Sistemi	Simetrik Hatalar		Asimetrik Hatalar	
	Eşdeğer kaynak	Eşdeğer empedans	İç Gerilim	Çıkış Akımı
Sabit akım kontrolü	Sabir akım kaynağı	Paralel filtre kapasitör	Dengesiz	Dengeli
PQ kontrolü	Kontrollü akım kaynağı	Paralel filtre kapasitör	Dengesiz	Dengeli
V/f kontrolü	Kontrollü gerilim kaynağı	Seri kontrollü empedans	Dengeli	Dengesiz
Droop kontrolü	Kontrollü gerilim kaynağı	Seri kontrollü empedans	Dengeli	Dengesiz

Çeşitli çalışmalarda [12], [13], [14] IADÜK' ler ile ilgili çok çeşitli arıza modellemeleri yapılmıştır.

[12] numaralı referans çalışmada yapılan kapsamlı arıza analizinin özeti;

Gerilim kontrollü IADÜK' ler akım kontrollü olanlardan daha yüksek arıza akımı ve daha az tepe akımı sağlarlar.

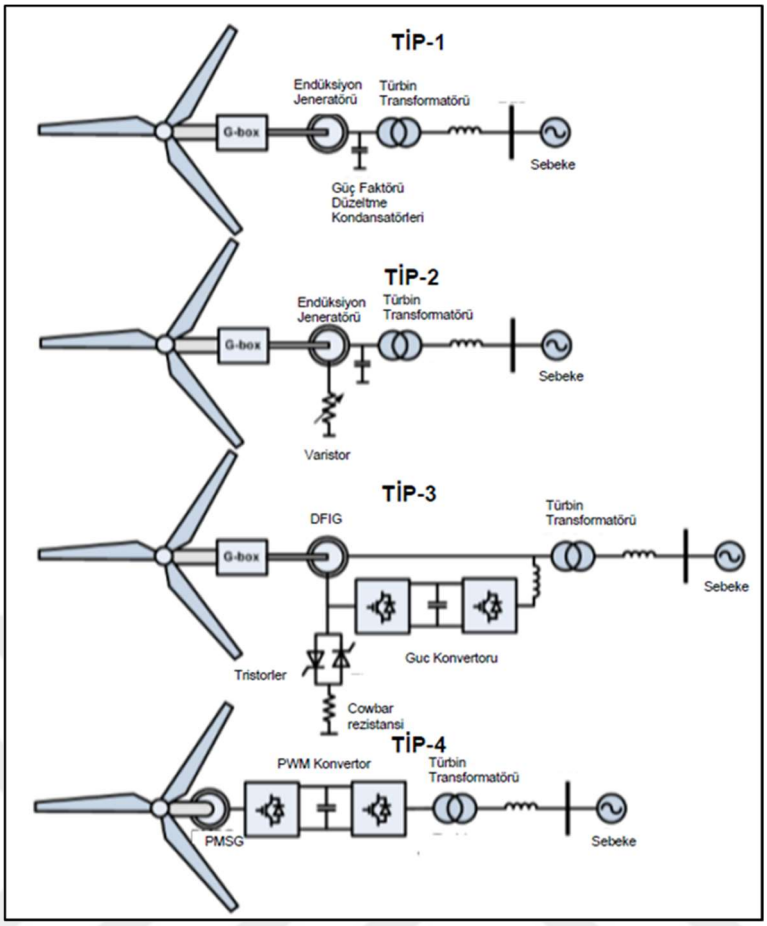
Gerilim kontrollü IADÜK' lerin arıza akımlarında eşpotansiyel azalan dc bileşenlerde gözlemlenmektedir. Akım kontrollü olanlarda ise dc bileşen akımı yoktur.

Akım sınırlayıcı kullanılması durumunda IADÜK' lerin hata akımları sabit akım kaynağı ile benzer hale gelir. Modülasyon dalga sınırlayıcı kullanılması durumunda ise IADÜK' ler ideal gerilim kaynağı olarak modellenebilirler.

2.5 Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri mekanik olarak elektrik jeneratörüne bağlı iki veya daha fazla kanatları olan rotorları vasıtasıyla rüzgar kinetik enerjisini yakalar ve elektrik enerjisine çevirirler. Bu türbin yüksek bir kule üzerine monte edilerek, yakalayacağı kinetik enerji enerjisi artırılmaya çalışılır. Arzu edilen güç üretim kapasitesini elde etmek için bir bölgeye birçok rüzgar türbini kurulur. Bu tür yapılara rüzgar çiftliği denir [15].

4 farklı rüzgar türbin generatörü (RTG) bulunmaktadır. Aşağıdaki resimde sabit hızlı RTG 1 den değişken hızlı tam çevrimli tip 4 e gösterilmiştir [16].



Şekil 2. 22 Rüzgar türbini tipleri

Rüzgar türbini generatörleri yukarıdaki resimde de görüleceği üzere dörde ayrılmaktadır;

-Tip 1: Asenkron jeneratör – Sabit hızlı

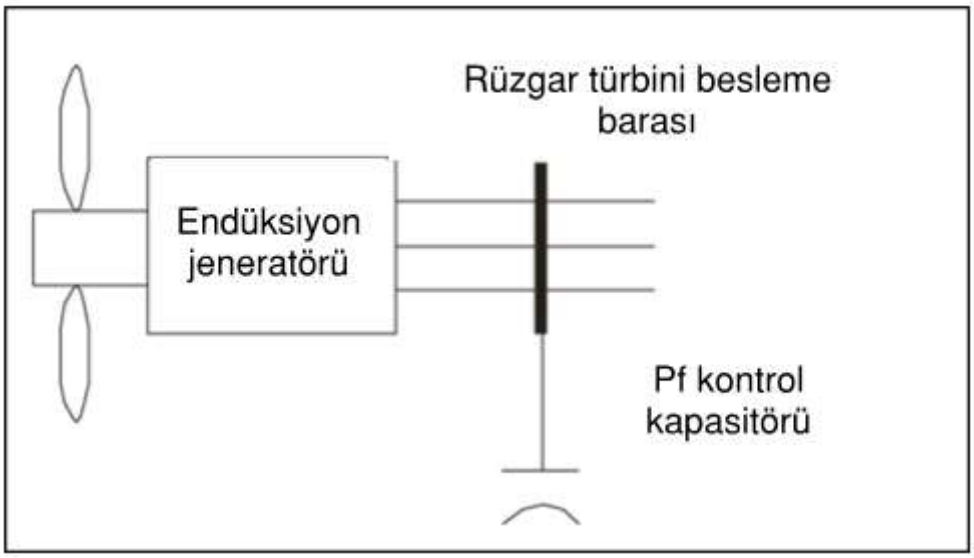
-Tip 2: Kafesli rotorlu asenkron jeneratör – harici rotor direnci ile değişken hızlı

-Tip3: Çift beslemeli asenkron jeneratör – değişken hızlı

-Tip4: Tam konvektör beslemeli sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü (değişken hızlı, direk sürücülü)

Tip 1 Sincap kafesli asenkron generatörlü (SKAG)

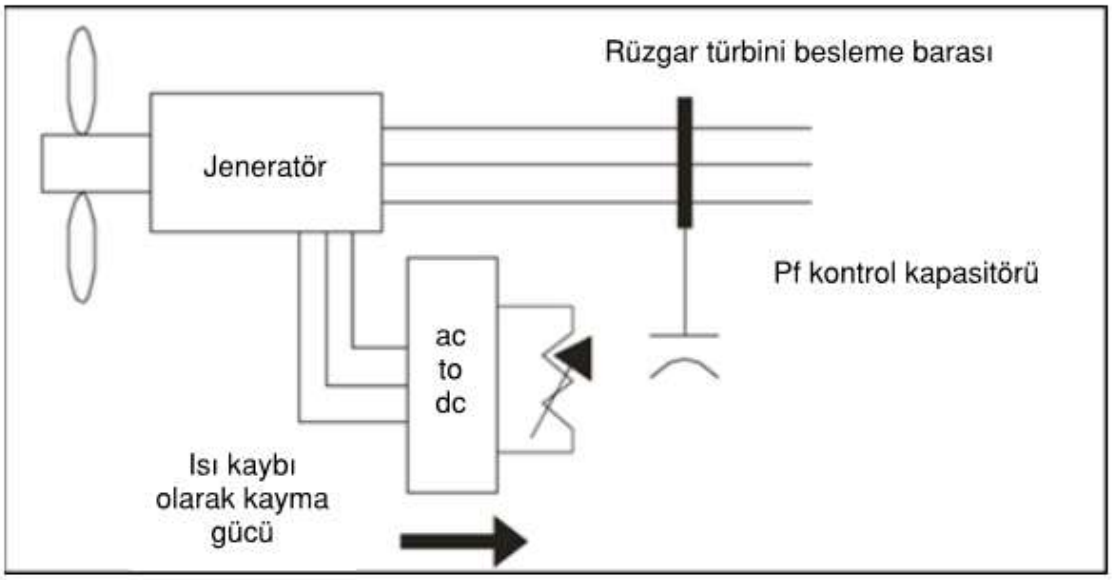
İlk rüzgar türbinleri sincap kafesli asenkron jeneratörlerdir. Şebeke frekansında sabit hız ile çalışan sincap kafesli asenkron jeneratörler ile enerji üretimi sağlanır. Nominalden daha düşük rüzgar hızlarında çalışıyor iken kalkış anında nominal akımın 10 katı kadar olabilen yüksek inrush akımlar sebebiyle şebeke dostu türbinler değildirler. [19].



Şekil 2. 23 Tip-1 rüzgar türbini

Tip 2 Değişken harici rotor dirençli kafes rotorlu asenkron generator (KRAG)

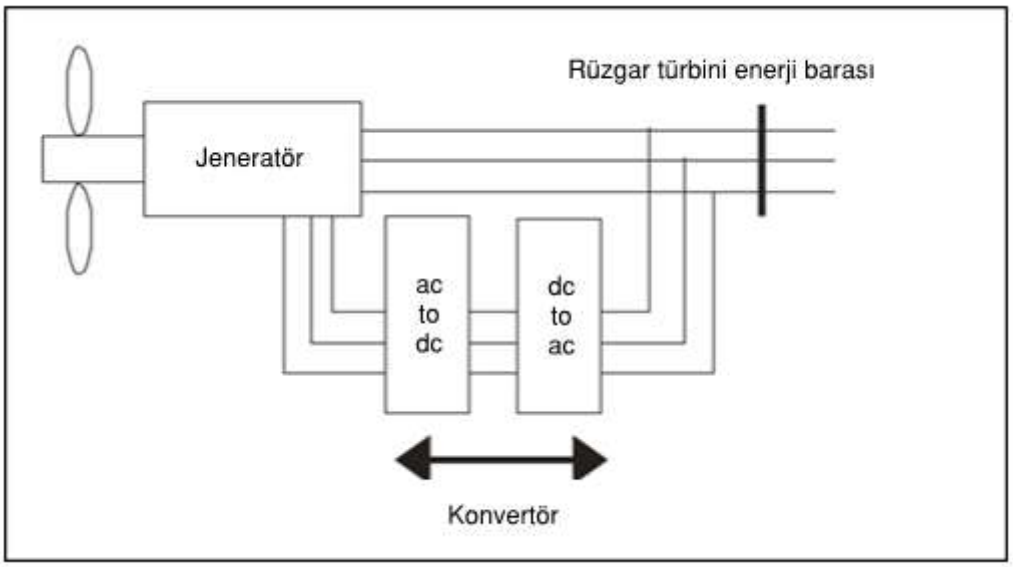
Kafes rotorlu asenkron generatörlü değişken kaymalı rüzgar türbinleridir. Rotor sargıları harici bir rezistansa ve onu kontrol eden bir güç elektroniği çeviricine bağlıdır.



Şekil 2. 24 Tip-2 rüzgar türbini

Tip 3 Çift beslemeli asenkron jeneratör (ÇBAG)

Tip 3 statorun direk şebekeye bağlı olduğu ve rotorun ise yarı iletken dönüştürücüler ile bağlandığı kafes rotorlu generatörlerdir. Bu bağlantı şekli türbinin çok geniş bir aralıkta farklı rüzgar hızlarında çalışmasını sağlayarak elde edilen enerjiyi maksimize eder. Bunun için nominal rüzgar hızının altında optimum Cp (güç katsayısı)' de ve nominal rüzgar hızının üstünde Pnominal de çalıştırılır. Bu sebepten düşük ve orta rüzgar hızlarında maksimum enerji elde edilebilir. Bu tip-3 rüzgar türbinleri rotor konvektöründe reaktif güç akışını kontrol ederek şebeke terminallerinde güç faktörü ile gerilim kontrol edebilir. Ayrıca kalkış akımları SKAG' ye düşüktür. Fakat ÇBAG' lerin yüksek maliyetleri ve şebekeye verdikleri harmonik sebebiyle orta çapta uygulamalarda kullanımları oldukça azdır. [20].

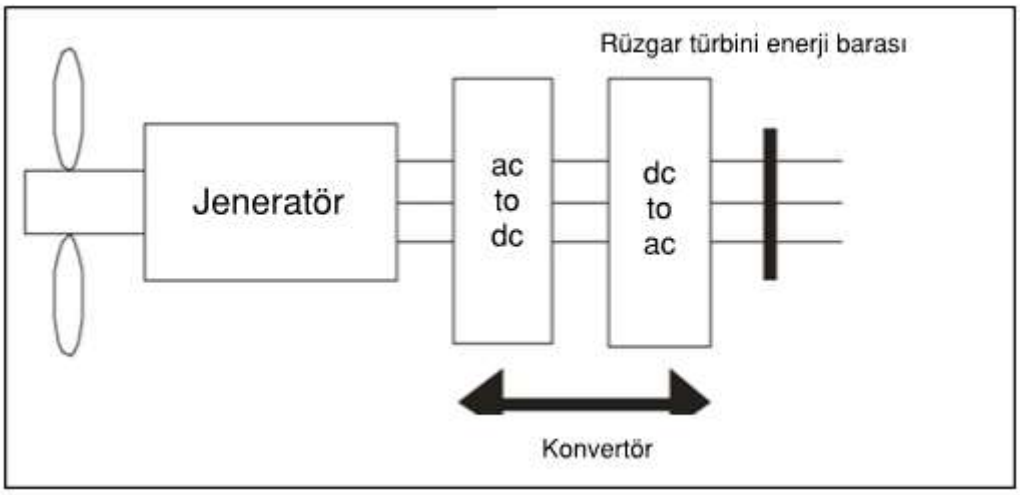


Şekil 2. 25 Tip-3 rüzgar türbini

Tip 4 Tam konvertörlü senkron generatörlü (TKSG)

Tip 4 rüzgar türbinleri statoru şebekeye tam kapasiteli AC-DC-AC güç konvertörü ile bağlanan sabit mıknatıslı senkron generatörden oluşur. Generator değişken hızlı çalışır, elde edilen enerji maksimumdur ve verimliliği çok yüksektir. Ek olarak şebeke dostudur. Inrush akımları yoktur ve şebekenin reaktif güç gereksinimlerini karşılayabilir. Diğer rüzgar türbinlerine göre daha pahalıdır. Fakat son gelişmeler ve güç elektroniği alanındaki daha düşük maliyetler güç konvertörlü değişken hızlı rüzgar türbinlerinin

kullanımını fizibil hale getirmiştir. Kontrol algoritması tip 3 ile benzerdir. Rüzgar türbini nominal rüzgar hızının altında optimum Cp de, üstünde ise P nominal de çalıştırılır. [21].



Şekil 2. 26 Tip-4 rüzgar türbini

2.5.1 Rüzgar Türbinlerinin Kısa Devre Arıza Davranışları

Rüzgar türbinlerinin kısa devre katkıları ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan [17] ve [18] de rüzgar türbini çeşitlerinin arıza akımı katkısı karşılaştırılmıştır. İlgili çalışmadaki sonuçlar aşağıda özetlenmiştir [17] [18].

Tip-1 rüzgar türbinleri önemli miktarda kısa devre katkı akımı sağlarlar. Kısa devrenin zamanına bağlı olarak bu katkı akımları nominal akımın 8 katı kadar veya daha yüksek olabilir.

Tip1-2 ve 3' de beklendiği gibi en büyük kısa devre akımı 3 fazlı kısa devre akımıdır. Fakat hatanın süresi çok kısadır. Çünkü yeterli hat gerilimi olmadan akı çöker. Böylece hata sönümlenir. Yine de bu arıza akımının etkisi sistemde bir süre görüleceğinden elektrik ekipmanlarının maksimum arıza dayanımında dikkate alınmalıdır.

Faz toprak kısa devre akımında terminal gerilimi ve akımı daha uzun devam eder. Çünkü hat gerilimi bir faz dışında akıyı sürdürebilir. Bu kısa devre akımı en düşük değere sahip olandır fakat koruma devrelerinin açma süresini hesaplarken dikkate alınmalıdır.

Tip-1 ve tip-2 rüzgar türbinleri kısa devre katkıları benzer olsa da harici rotor direnci sebebiyle tip-2 nin hata katkısı daha düşük olabilir.

Tip 3 rüzgar türbinlerinde yakın hata durumların hata katkı akımı tip-1 kadar büyük olabilir. Özellikle DC barada aşırı gerilimden kaçınmak için konvertöre seri bir crowbar direnci kullanılır. Böylece hata akımı sınırlandırılır.

Tip-4 rüzgar türbinlerinde generatör ve şebeke konvertör ile birbirinden ayrılmıştır. Bu sebepten generatör hata akımı güç konventöründe kullanılan yarı iletkenlerin akım taşıma kapasiteleri tarafından sınırlandırılır. Bu sayede tip-4 rüzgar türbinlerinin kısa devre akım katkıları nominal akımın %110-%125' ine sınırlandırılır [17] [18].

2.6 Dizel ve Doğalgaz Generatörü

Dizel ve doğal gaz jeneratörler içten yanmalı motor ve ona akuple bir senkron jeneratörden oluşurlar [6].

Dizel ve gaz jeneratörleri ISO 8528-1 standardında tanımlanan çeşitli çalışma prensiplerine göre üretirler [21] [22].

Bunlar;

-Prime power (PRP);

Bir yıl içerisinde çalışma saati sınırı yoktur. Ortalama yük faktörü jeneratör plaka değerinin en fazla %70 i olmalıdır. %10 aşırı yük kapasiteleri vardır. Yük değişimlerine cevap verebilir ve bu tip tesislere uygundurlar

-Emergency standby power (ESP)

Bir yıl içerisinde 200 saate kadar çalıştırılırlar. Aşırı yük kapasiteleri yoktur. Ortalama yük faktörü jeneratör plaka değerinin en fazla %70 i olmalıdır.

-Continuous Power(COP)

Jeneratör plaka değerini %100 olarak bir yıl içerisinde sürekli olarak sağlayabilirler. Aşırı yük kapasiteleri yoktur. Yük değişimlerine cevap veremezler.

Dizel jeneratörler uygulamalarda yedek enerji kaynağı olarak "prime" veya "standby" çalışmada kullanılırlar.

Gaz jeneratörleri is yüksek hava-yakıt oranları sebebiyle yük değişimlerine çok hızlı cevap veremezler. Dizel jeneratörler %100 nominal gücü tek bir adımda üzerine alabiliyorken

gaz jeneratörlerinde bu %10 ile %75 arasındadır. Kademeli ve değişken yük uygulamalarında kullanılabilseler de gaz jeneratörleri büyük sıklıkla “continuous power” yani sürekli sabit güç verecek şekilde üretilirler. Kombine ısı ve güç sistemlerinde genellikle bu tip jeneratörler kullanılır [23].

Senkron generatörlerin kısa devre empedansları aşağıdaki gibidir [24].

Çizelge 2. 4 Senkron makine kısa devre empedansları

Jeneratör tipi	Turbojeneratör	Çıkık kutuplu damper sargılı jeneratörler	Çıkık kutuplu damper sargısız jeneratörler
Subtransient reaktans Xd%	9-22	12-30	20-40
Transient reaktans Xd%	14-35	20-45	20-40
Senkron reaktans Xd%	140-300	80-180	80-180
Negatif bileşen reaktans X2%	9-22	10-25	30-50
Sıfır bileşen reaktans X2%	3-10	5-20	5-25

Düşük subtransient empedansı sebebiyle dizel generatöre (DG) yakın kısa devrelerde arızanın tepe değeri ve dc katkı akımı artmaktadır.

Dizel generatörlerin kısa devre empedansları gaz jeneratörlerinden daha yüksektir. Bu sebepten kısa devre akım katkıları daha düşüktür [25] [26].

BÖLÜM 3

KISA DEVRE VE ELEKTRİKSEL KORUMA SİSTEMLERİ

Bu bölümde sırası ile arıza analizi ve kararlılık teorisi açıklanacak, orta gerilim ve alçak gerilim koruma röleleri ile çeşitli koruma uygulamaları tanımlanacak ve son olarak dağıtık üretim sistemlerinde koruma ile ilgili akademik makalelerden bahsedilecektir.

3.

3.1 Arıza Analizi ve Kısa Devre Hesap Yöntemleri

3.1.1 Simetrik Bileşenler ile Dağıtım Sistemi Analizi

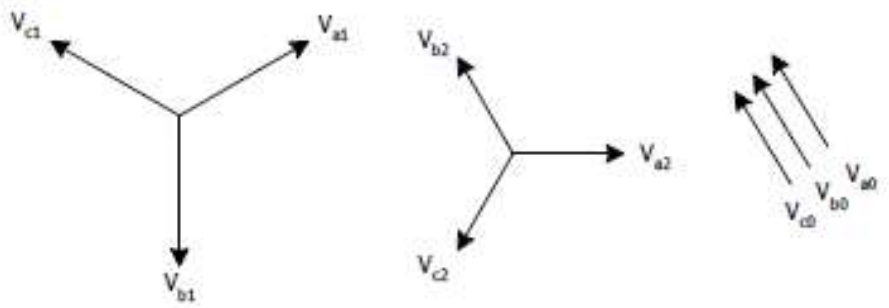
IEC 60909 yönetiminde kısa devre hesabının simetrili bileşenler metodu ile yapılmasından dolayı bu bölümde simetrili bileşenler tanımlanacaktır.

Simetrili bileşenler metodu kompleks dağıtım sistemlerinin basit ve sistematik olarak modellenmesi ve asimetrik arıza hesaplarının kolay bir şekilde yapılması amacıyla kullanılırlar.

Fortescue teoremine göre üç fazlı balansız bir sistemi dengeli veya simetrik üç grup fazörlere indirgemek mümkündür. Bu üç fazör grubu aşağıda gösterilmiştir. Üç faz sırasıyla abc olarak isimlendirilmiştir, $_{1,2}$ ve $_{0}$ alt indisleri ise sırasıyla pozitif, negatif ve sıfır bileşenlerini ifade eder [27].

1. Pozitif bileşenler birbirleri ile 120° uzaklıkta ve orijinal faz sırasıyla aynı sırada, üç adet dengeli ve eşit genlikli fazörden oluşur. Faz sırası abc.

2. Negatif bileşenler birbirleri ile 120° uzaklıkta ve orijinal faz sırasıyla ters sırada, üç adet dengeli ve eşit genlikli fazörden oluşur. Faz sırası acb.
3. Sıfır bileşenler birbirleri ile 0° uzaklıkta, dengeli ve genlikleri eşit üç adet fazörden oluşur.



Şekil 3. 1 Simetrili bileşenler

Orijinal balanssız fazörler V_a, V_b, V_c nin her biri kendi simetrik bileşenlerinin toplamına eşittir.

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (3.1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (3.2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (3.3)$$

Eğer orijinal fazör grubu dengeli ise negatif ve sıfır bileşenler sıfır olacak ve böylece dengeli fazörlerin toplamı pozitif bileşenlere eşit olacaktır [27].

Dengesiz fazör eşitlikleri basitleştirmek amacıyla sadece referans fazörü (fazör a) kullanarak da ifade edilebilirler. Bunun için "a" operatörünün kullanılması gerekecektir.

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (3.4)$$

$$V_b = V_0 + a^2.V_1 + a.V_2 \quad (3.5)$$

$$V_c = V_0 + a.V_1 + a^2.V_2 \quad (3.6)$$

a operatörü 120^0 faz kaymasını ifade etmektedir.

$$a = 1 < 120^0 = e^{j.\frac{2.\pi}{3}} = -0{,}5 + j.0{,}866 \quad (3.7)$$

$$a^2 = 1 < 240^0 = -0{,}5 - j.0{,}866 \quad (3.8)$$

$$a^3 = 1 < 0^0 = 1 \tag{3.9}$$

(3.4), (3.5), (3.6) daki denklemler matris ile ifade edilirler ise;

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

veya

$$V_{abc} = A . V_{012} \tag{3.11}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

A matrisinin tersi A^{-1}

$$A^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

(3.10) daki eşitliğin her iki tarafını da A^{-1} ile çarparsak;

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} . \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

Veya

$$V_{012} = A^{-1} . V_{abc} \tag{3.15}$$

Yukarıdaki eşitlikten anlaşılacağı üzere dengesiz fazörler simetrik bileşenlerinin açılımlarında kullanılabilirler.

$$V_0 = \frac{1}{3} . (V_a + V_b + V_c) \tag{3.16}$$

$$V_1 = \frac{1}{3} . (V_a + a . V_b + a^2 . V_c) \tag{3.17}$$

$$V_2 = \frac{1}{3} . (V_a + a^2 . V_b + a . V_c) \tag{3.18}$$

Gerilim fazörlerinde yapılan dönüşümler benzer şekilde dengesiz akım ve empedanslar için de yapılabilir.

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \tag{3.19}$$

$$I_b = I_0 + a^2 . I_1 + a . I_2 \tag{3.20}$$

$$I_c = I_0 + a.I_1 + a^2.I_2 \quad (3.21)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}.(I_a + I_b + I_c) \quad (3.22)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}.(I_a + a.I_b + a^2 I_c) \quad (3.23)$$

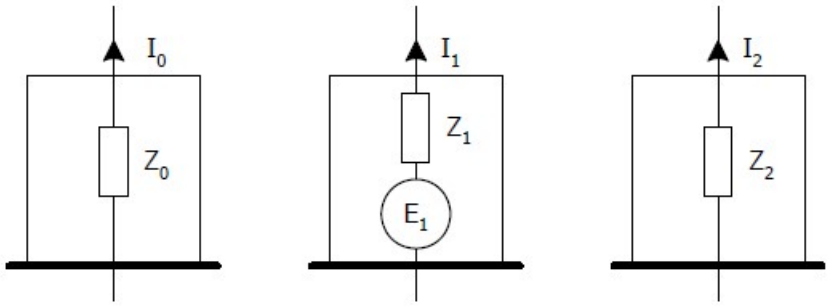
$$I_2 = \frac{1}{3}.(I_a + a^2.I_b + a.I_c) \quad (3.24)$$

Empedans bileşenlerini de dikkate aldığımızda aşağıdaki eşitlikler kurulabilir;

$$V_1 = E_1 - I_1.Z_1 \quad (3.25)$$

$$V_2 = I_2.Z_1 \quad (3.26)$$

$$V_0 = I_0.Z_0 \quad (3.27)$$



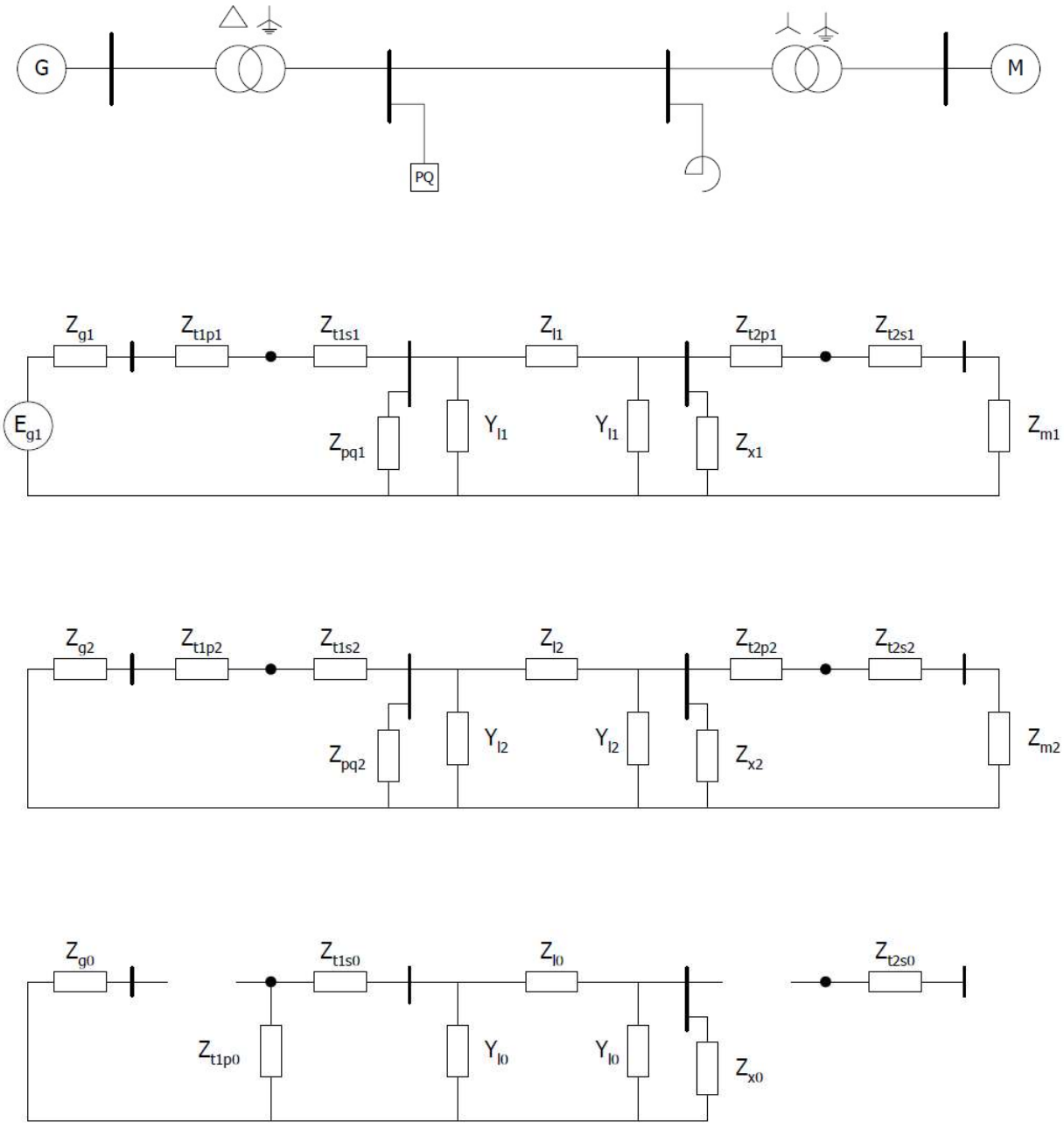
Şekil 3. 2 Simetrili gerilim-akım-empedans gösterimi

Simetrili Bileşenler ile Şebeke Modeli

Bir elektrik dağıtım sisteminde dengesiz kısa devre analizi bu dağıtım sisteminin simetrili bileşenler ile ifade edilmesi ile basit bir biçimde gerçekleştirilebilir. Bu analiz hata noktasına Thevenin teoremi uygulanarak, sistemin gerilim ve empedansa indirgenmesi ile yapılır.

Aşağıdaki örnekte basit bir dağıtım sisteminin simetrili bileşenler kullanılarak hata analizinde nasıl ifade edildiğini görebiliriz.

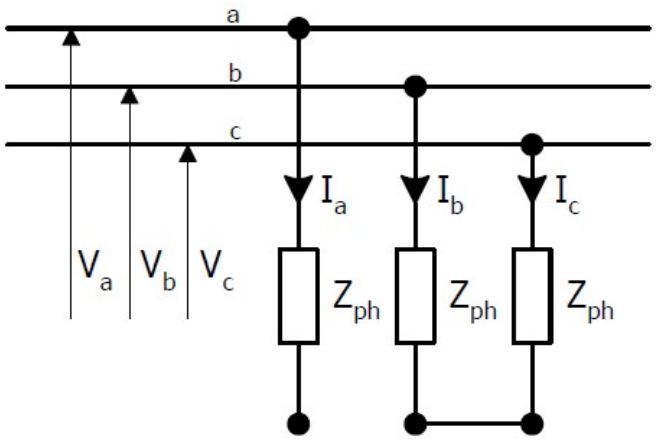
Basit bir dağıtım sisteminin simetrili bileşenler ifadesi;



Şekil 3. 3 Simetrili bileşenler ile örnek dağıtım sistemi modeli

Simetrili bileşenler ile arıza analizi örneği;

Faz-faz kısa devresi için simetrili bileşenler metodunun örnek bir dağıtım sistemine uygulanması;



Şekil 3. 4 Faz-faz kısa devresi

Faz-faz kısa devresi durumunda eşitlikler;

$$\mathrm{I_a} = 0 \tag{3.28}$$

$$\mathrm{I_b} = -\mathrm{I_c} \tag{3.29}$$

$$\mathrm{V_b} - \mathrm{V_c} = \mathrm{I_b}.2.\mathrm{Z_{ph}} \tag{3.30}$$

(3.22), (3.23), (3.24) simetrili bileşen eşitlikleri dikkate alındığında;

$$\mathrm{I_0} = 0 \tag{3.31}$$

$$\mathrm{I_1} = \frac{1}{3}.\mathrm{I_b}.(\mathrm{a} - \mathrm{a}^2) \tag{3.32}$$

$$\mathrm{I_2} = \frac{1}{3}.\mathrm{I_b}.(\mathrm{a}^2 - \mathrm{a}) \tag{3.33}$$

Ayrıca;

$$\mathrm{I_2} = -\mathrm{I_1} \tag{3.34}$$

(3.30) ifadesi simetrili bileşenlere çevrilirse

$$(\mathrm{V_0} + \mathrm{a}^2.\mathrm{V_1} + \mathrm{a}.\mathrm{V_2}) - (\mathrm{V_0} + \mathrm{a}.\mathrm{V_1} + \mathrm{a}^2.\mathrm{V_2}) = (\mathrm{I_0} + \mathrm{a}^2.\mathrm{I_1} + \mathrm{a}.\mathrm{I_2}).2.\mathrm{Z_{ph}} \tag{3.35}$$

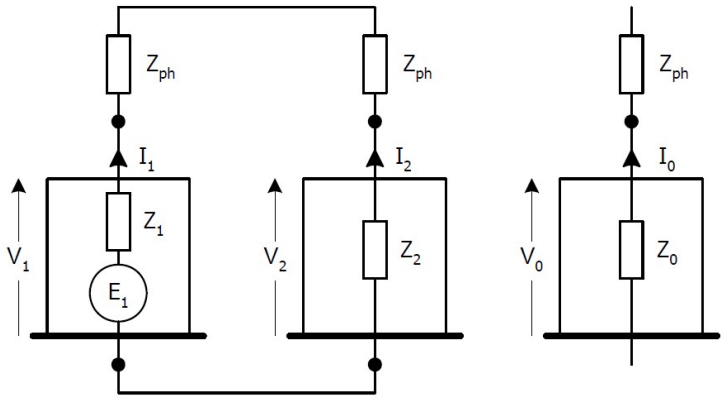
Denklemi $I_0 = 0$ ve $I_2 = -I_1$ eşitliklerini dikkate alarak tekrar düzenlersek;

$$\mathrm{V_1}.(\mathrm{a}^2 - \mathrm{a}) + \mathrm{V_2}.(\mathrm{a} - \mathrm{a}^2) = \mathrm{I_1}.2.\mathrm{Z_{ph}}.(\mathrm{a}^2 - \mathrm{a}) \tag{3.36}$$

İfade sadeleştirilirse;

$$\mathrm{V_1} - \mathrm{V_2} = \mathrm{I_1}.2.\mathrm{Z_{ph}} \tag{3.37}$$

Simetrili bileşeni açılımı ile ifade edilen şebeke (3.37) ifadesi dikkate alınarak birleştirilebilir.



Şekil 3. 5 Simetrili bileşenler ile faz-faz kısa devresi ifadesi

Faz-faz arızası için yukarıdaki ifadelerinden aşağıdaki eşitliklere ulaşılabilir;

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1+Z_2+2.Z_{ph}} \quad (3.38)$$

$$I_2 = -I_1 \quad (3.39)$$

$$I_0 = 0 \quad (3.40)$$

Yukarıdaki ifadelerin (3.19), (3.20), (3.32) eşitliklerinde yerinde kullanılması ile faz akımları;

$$I_a = 0 \quad (3.41)$$

$$I_b = -j.\sqrt{3}.I_1 \quad (3.42)$$

$$I_c = j.\sqrt{3}.I_1 \quad (3.43)$$

Simetrili Bileşenler ile Kısa Devre Arıza Modelleri

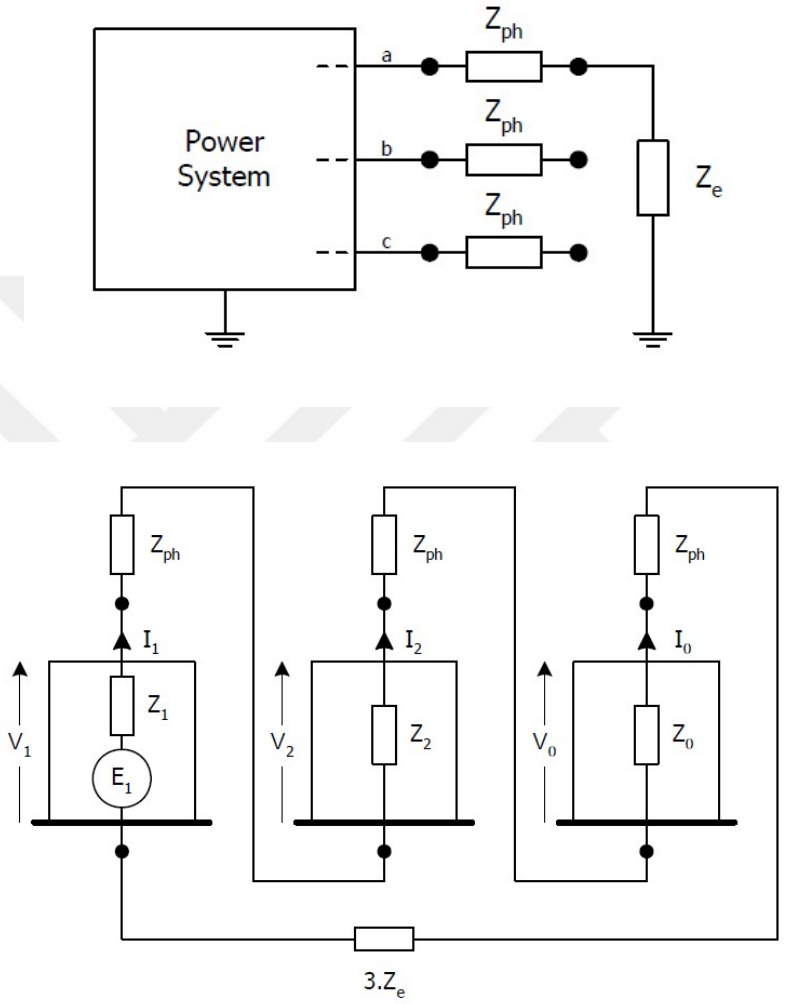
Bu bölümde aşağıda sıralanan kısa devre arızaları için simetrili bileşen ile elektrik dağıtım sistemleri tanımlanacaktır [27].

- Faz-Toprak
- Faz-faz

- İki faz toprak
- Üç faz

Faz-Toprak Hatası

Bir faz ile toprak arasında meydana gelen kısa devrelerdir.



Şekil 3. 6 Simetrili bileşenler ile faz toprak kısa devre ifadesi

Faz toprak kısa devresinde simetrili akım bileşenleri;

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E_1}{Z_1+Z_2+Z_0+3.Z_{ph}+3.Z_e} \quad (3.44)$$

Simetrili akım bileşenlerinden elde edilebilecek faz akımları sırasıyla;

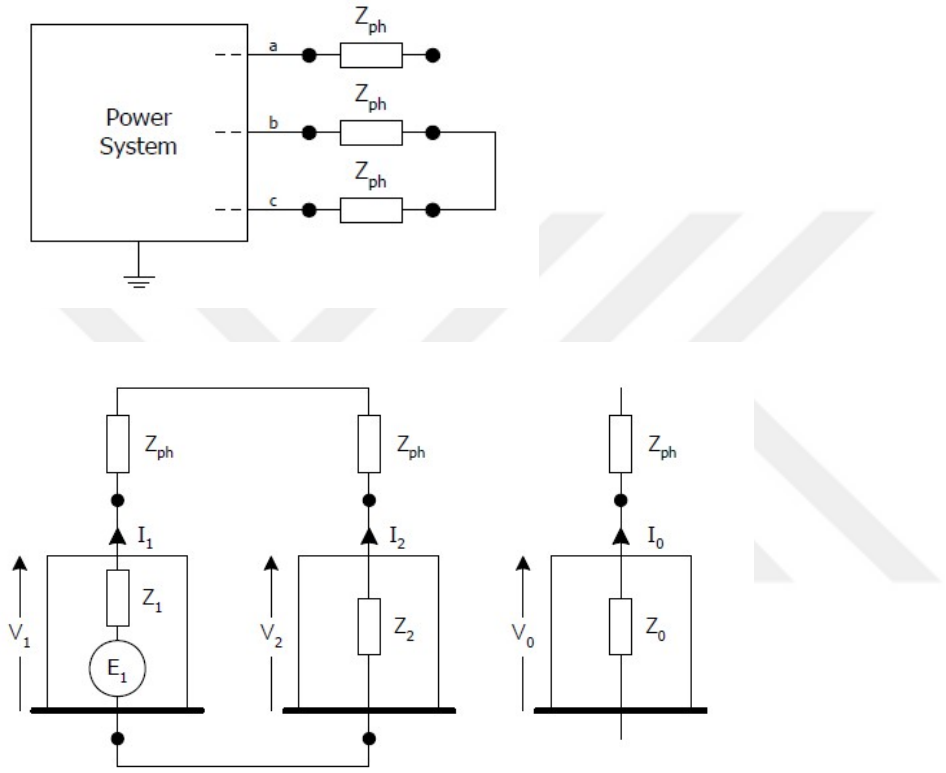
$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 3.I_1 \quad (3.45)$$

$$I_b = I_0 + a^2.I_1 + a.I_2 = 0 \quad (3.46)$$

$$I_c = I_0 + a.I_1 + a^2.I_2 = 0 \quad (3.47)$$

Faz-Faz Hatası

İki faz arasında meydana gelen kısa devre arızalarıdır.



Şekil 3. 7 Simetrili bileşenler ile faz faz kısa devre ifadesi

Faz faz arızası için simetrili akım bileşenleri;

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1+Z_2+2.Z_{ph}} \quad (3.48)$$

$$I_2 = -I_1 \quad (3.49)$$

$$I_0 = 0 \quad (3.50)$$

Simetrili akım bileşenlerinden elde edilebilecek faz akımları sırasıyla;

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (3.51)$$

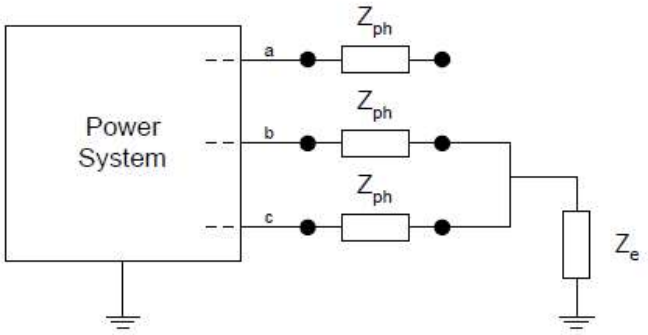
$$I_b = I_0 + a^2.I_1 + a.I_2 = -j.\sqrt{3}.I_1 \quad (3.52)$$

$$I_c = I_0 + a.I_1 + a^2.I_2 = j.\sqrt{3}.I_1 \quad (3.53)$$

$$a^2 - a = -j.\sqrt{3} \quad (3.54)$$

İki Faz Toprak Hatası

İki faz ve toprak iletkeni arasında meydana gelen kısa devrelerdir.



Şekil 3. 8 Simetrili bileşenler ile iki faz toprak kısa devre ifadesi

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_{ph} + \left[\frac{(Z_2 + Z_{ph}).(Z_0 + Z_{ph} + 3.Z_e)}{Z_2 + Z_0 + 2.Z_{ph} + 3.Z_e}\right]} \quad (3.55)$$

$$I_2 = -I_1.\frac{Z_0 + Z_{ph} + 3.Z_e}{Z_2 + Z_0 + 2.Z_{ph} + 3.Z_e} \quad (3.56)$$

$$I_0 = -I_1.\frac{Z_2 + Z_{ph}}{Z_2 + Z_0 + 2.Z_{ph} + 3.Z_e} \quad (3.57)$$

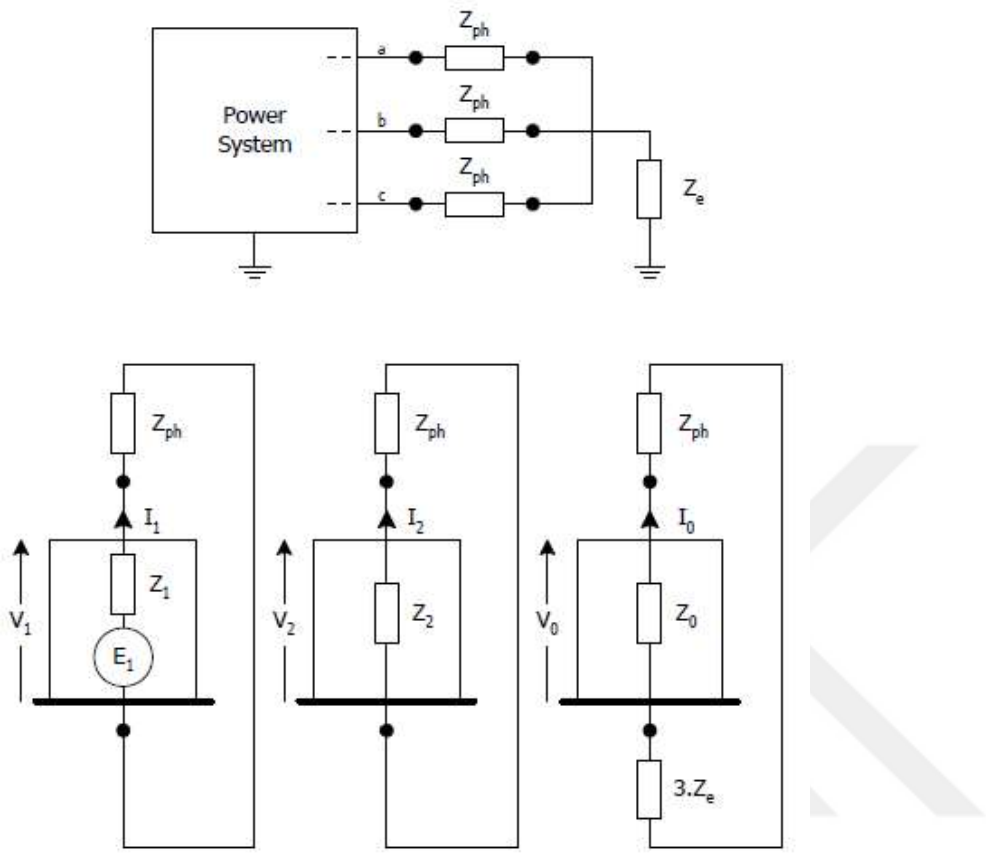
$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (3.58)$$

$$I_b = I_0 + a^2.I_1 + a.I_2 \quad (3.59)$$

$$I_c = I_0 + a.I_1 + a^2.I_2 \quad (3.60)$$

Üç Faz Hatası

Üç fazın veya üç faz ile toprak iletkeni arasında meydana gelen kısa devredir.



Şekil 3. 9 Simetrili bileşenler ile üç faz toprak kısa devre ifadesi

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_{ph}} \tag{3.61}$$

$$I_2 = I_0 = 0 \tag{3.62}$$

Simetrili akım bileşenlerinden elde edilebilecek faz akımları sırasıyla;

$$I_a = I_1 \tag{3.63}$$

$$I_b = I_0 + a^2.I_1 + a.I_2 = a^2.I_1 \tag{3.64}$$

$$I_c = I_0 + a.I_1 + a^2.I_2 = a.I_1 \tag{3.65}$$

3.1.2 Kısa Devre ve Hesap Yöntemleri

Elektrik tesislerinde en tehlikeli sonuçları olan ve en yaygın arıza tipi kısa devredir. Bu sebepten elektrik tesisleri her noktada kısa devre akımına karşı korunmalı yine bu bağlı olarak her nokta için kısa devre hesabı yapılmalıdır. En sık meydana gelen ve en düşük değere sahip kısa devre akım faz toprak, en büyük değere sahip ve az sıklık karşılaşılan kısa devre akımı 3 faz kısa devresidir.

Kısa devre hesapları empedans metoduna veya IEC 60909 standardında tanımlanan simetrili bileşenler metoduna göre yapılabilir. Genellikle karmaşık olmayan alçak gerilim tesislerinde hesaplar empedans metodu ile yapılıyorken daha büyük boyutta ve orta gerilim tesislerinde simetrili bileşenler metodu ile yapılmaktadır.

Arıza tipine ve iletkenlerin arıza anındaki çalışma sıcaklıklarına göre maksimum ve minimum kısa devre akımları hesaplanmalıdır.

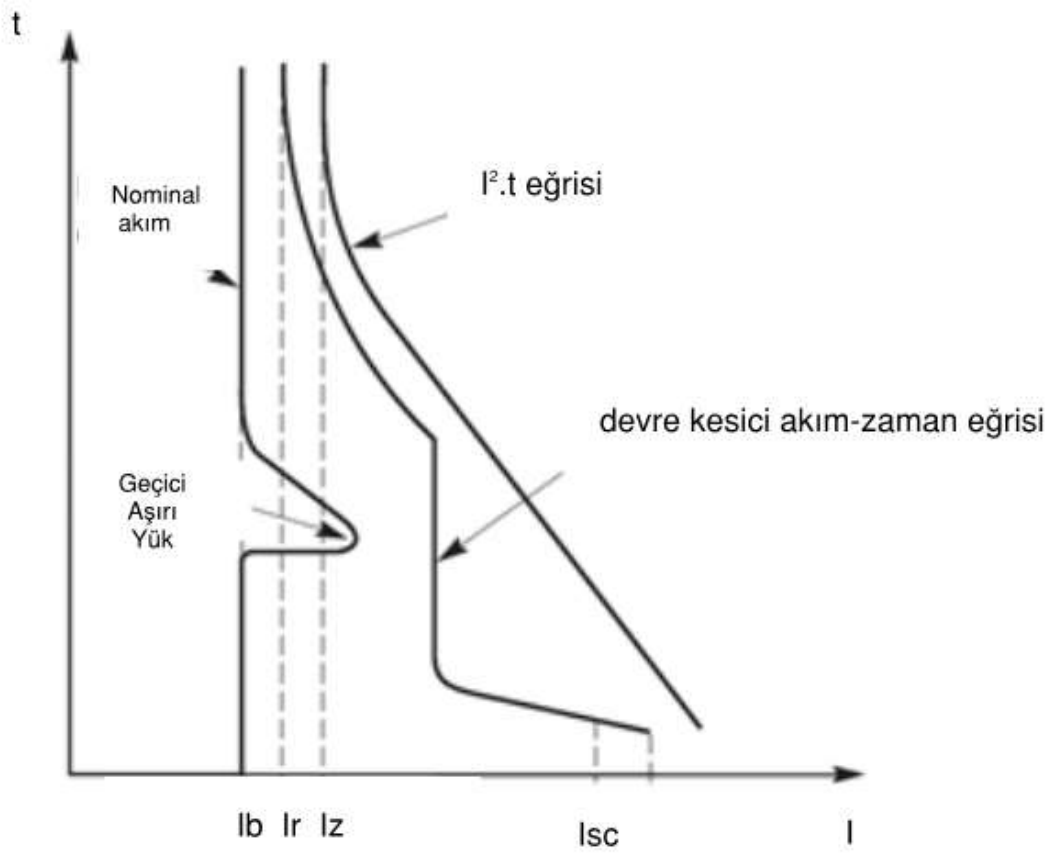
Maksimum kısa devre akımına göre devre kesicilerin dayanma ($\mathrm{I_{cw}}$), açma ($\mathrm{I_{cu}}$) ve kapama ($\mathrm{I_m}$) değerleri belirlenir.

Minimum kısa devre akımı ise devre kesicilerin en uzun açma süresini bulmak için hesaplanırlar. Bu en uzun açma süresince korunan iletkenin kısa devre enerjisine dayanımı hesaplanarak iletkenin uygunluğu doğrulanır.

Kısa devreye maruz kalan iletkenler maksimum ve minimum kısa devre arıza enerjisine devre kesici hatayı temizleyene kadar dayanabilmelidir. Bu ilişkiyi açıklayan denklem (3.66) da gösterilmiştir.

$$\int \mathrm{i}^2 \mathrm{dt} \leq \mathrm{k}^2 \mathrm{A}^2 \tag{3.66}$$

Şekil 3.10 da akım zaman eğrisinde yük akımı, devre kesici açma karakteristiği ve iletken dayanım eğrisi gösterilmiştir [30].



Şekil 3. 10 akım zaman eğrisi

3.1.2.1 IEC 60909 Standardı Kısa Devre Hesap Yöntemi

Bu bölümde IEC 60909 standardında tanımlanan dengeli ve dengesiz kısa devre tanımları yapılacaktır. IEC 909 standardının amacı kısa devre hesabı için yeterli doğrulukta genel bir yaklaşım vermektir. Özellikle kompleks yüksek gerilim ve orta gerilim seviyesindeki dağıtım sistemlerine uygulanırlar [28].

$I_k^{''}$ = Anlık rms kısa devre akımı

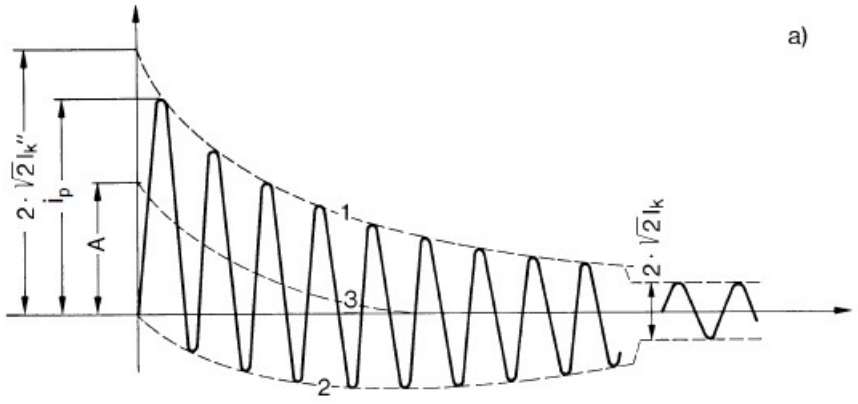
i_p = Tepe kısa devre akımı

i_{dc} = DC akım

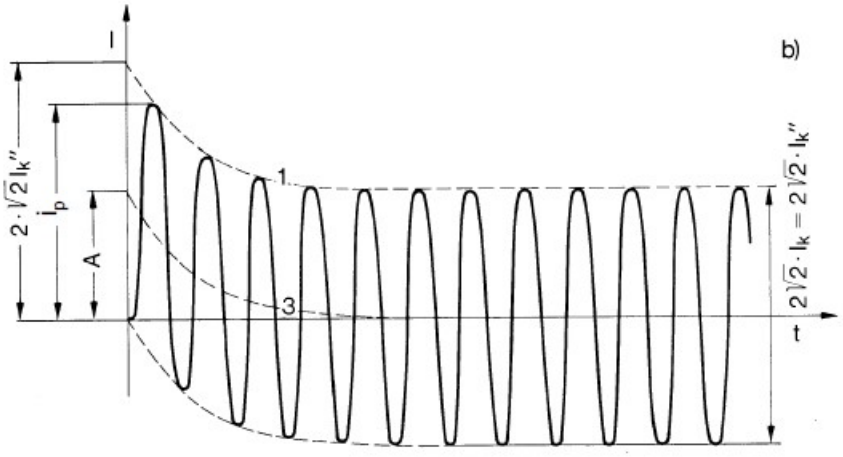
T_{dc} = DC zaman sabiti

I_b = rms simetrik kısa devre kesme akmı

I_{basym} = rms asimetrik kısa devre kesme akmı



Şekil 3. 11 Jeneratöre yakın kısa devre



Şekil 3. 12 Jeneratöre uzak kısa devre

Elektrik dağıtım sisteminde ki ekipmanların doğru bir şekilde boyutlandırılabilmesi için kısa devre akımlarının genliklerinin hesaplanması gerekmektedir. Kısa devre akımları genellikle arızanın ne zaman ve jeneratörden ne kadar uzakta olduğuna bağlı olarak asimetriktir. Yine zaman ve uzaklığa bağlı olarak kısa devre akımları AC ve DC bileşenlerden oluşurlar. Arıza jeneratöre elektriksel olarak yaklaştıkça jeneratörün sisteme DC zarf akım katkısı artacağından kısa devre akımlarının anlık tepe değerleri artar. Şekil 3. 11 ve 3. 12 de IEC 60909'dan jeneratöre yakın ve uzak arıza eğrileri gösterilmiştir [28].

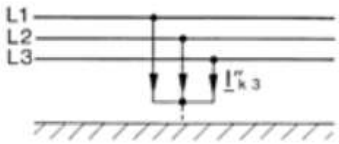
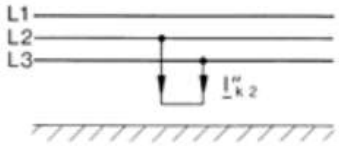
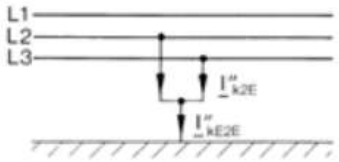
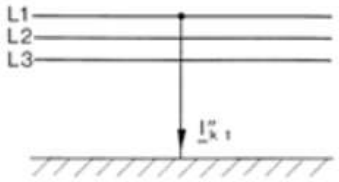
Kısa devre hesapları çoğu zaman ark direnci, kontak direnci, iletken sıcaklığı ve akım transformatörlerin endüktansı vb. gibi kısa devre akım değerini etkileyen faktörler

dikkate alınmadan yapılır. Bu sebepten maksimum ve minimum kısa devre akımı hesabında dikkate alınması için IEC60909 da gerilim faktörü tanımlanmıştır [28].

Çizelge 3. 1 IEC60909 gerilim faktörü tablosu

Nominal gerilim, U_n	Gerilim Faktörü, c_{max}	Gerilim Faktörü, c_{min}
Alçak gerilim 100V ile 1000V arası 230V / 400V Diğer gerilimler	1.0 1.05	0,95 1.0
Orta gerilim, >1kV 35kV a kadar	1.1	1.0
Yüksek gerilim, >35kV 230kV a kadar	1.1	1.0

IEC 60909 standardına göre kısa devre akımlarının formülleri;

Hata tipi		IEC 909 Eşitlik
Üç faz topraklı veya topraksız kısa devre		$I''_{k3} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3}\,\lvert \underline{Z}_1 \rvert}$ $S''_k = \sqrt{3}\, U_n\, I''_{k3}$
Faz-faz kısa devre		$I''_{k2} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\lvert \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \rvert}$
İki faz toprak kısa devre		$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1\, U_n}{\left\lvert \underline{Z}_1 + \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} \right\rvert}$
Faz toprak kısa devre		$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot U_n}{\lvert \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 \rvert}$

Şekil 3. 13 IEC 60909 kısa devre formülleri

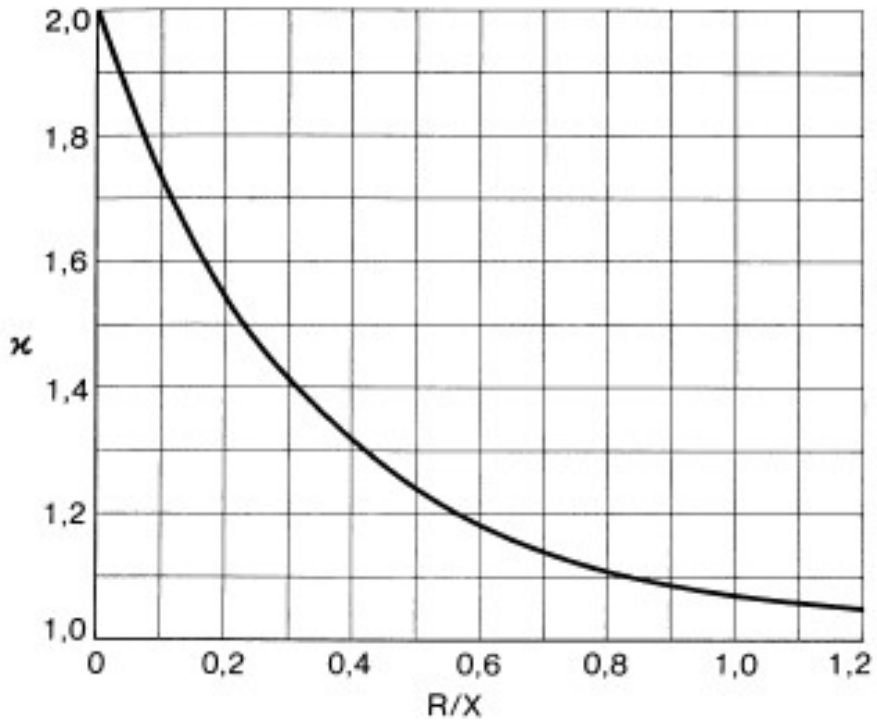
Tepe kısa devre akımı;

$$\mathrm{i_p} = \kappa . \sqrt{2} . \mathrm{I_k^{''}} \tag{3.67}$$

κ faktörü DC akım zarfının kısa devre akımına etkisi ifade eder. R/X oranına bağlıdır.

$$\kappa = 1{,}02 + 0{,}98 . e^{-3.R/X} \tag{3.68}$$

(3.68) formülü ile hesaplanabilir veya şekil 3. 14 ile belirlenebilir.



Şekil 3. 14 IEC 60909 κ faktörü

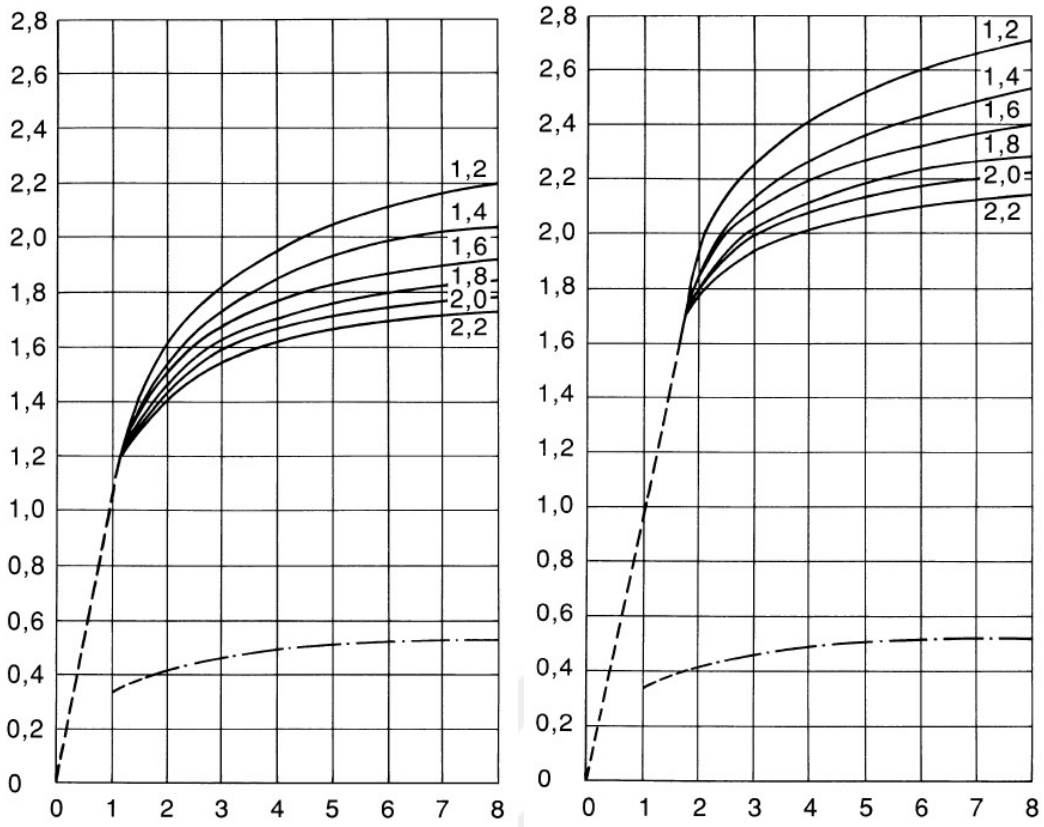
Kararlı durum kısa devre akımı;

Kararlı durum kısa devre akımı arızayı besleyen jeneratörün doyumundan etkilenir. Bu sebepten hesap ile elde edilen sonuçlarda doğruluk azalır. Özellikle ilk an kısa devre akımına $I_k^{''}$ göre daha hesap daha çok sapma gösterir. Bu sebepten senkron jeneratörün uyarım ve doyumu dikkate alınarak maksimum ve minimum aralıkları hesaplanır. [28] [29].

$$I_{kmax=}\lambda_{max}.\, I_{rG} \tag{3.69}$$

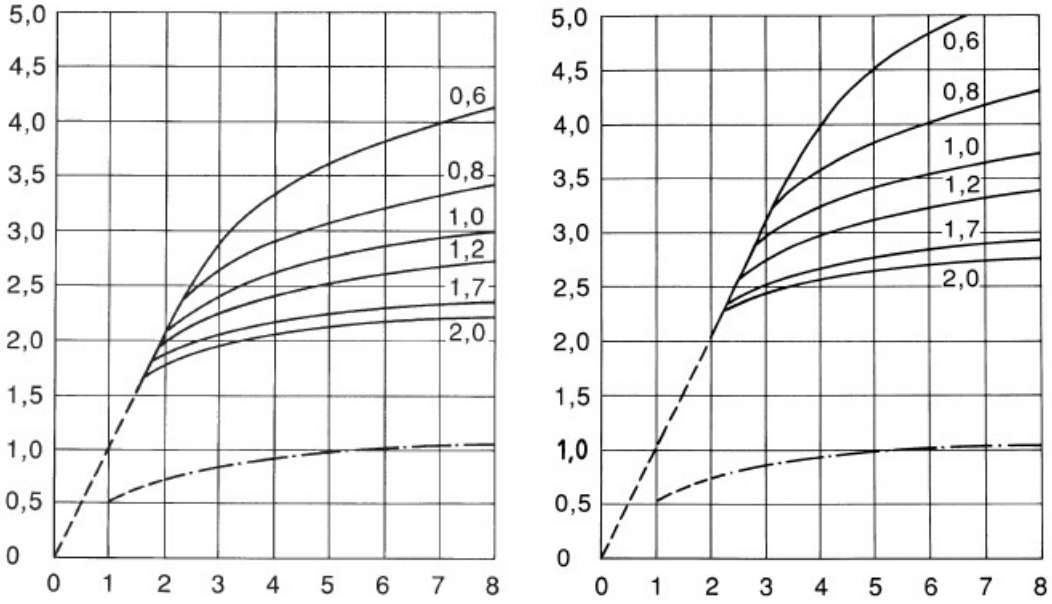
$$I_{kmax=}\lambda_{min}.\, I_{rG} \tag{3.70}$$

IEC 60909' da turbo jeneratörler için maksimum uyarım gerilimin nominal uyarım geriliminin 1,3 ve 1,6 katı olması durumunda λ_{max} ve λ_{min} eğrileri;



Şekil 3. 15 IEC 60909 turbo jeneratörler için $\lambda_{\max}$ ve $\lambda_{\min}$ eğrileri

IEC 60909' da çıkık kutuplu jeneratörler için maksimum uyarım gerilimin nominal uyarın geriliminin 1,6 ve 2 katı olması durumunda λ_{max} ve λ_{min} eğrileri;



Şekil 3. 16 IEC 60909 çıkık kutuplu jeneratörler için $\lambda_{\max}$ ve $\lambda_{\min}$ eğrileri

Kısa devre kesme akımı

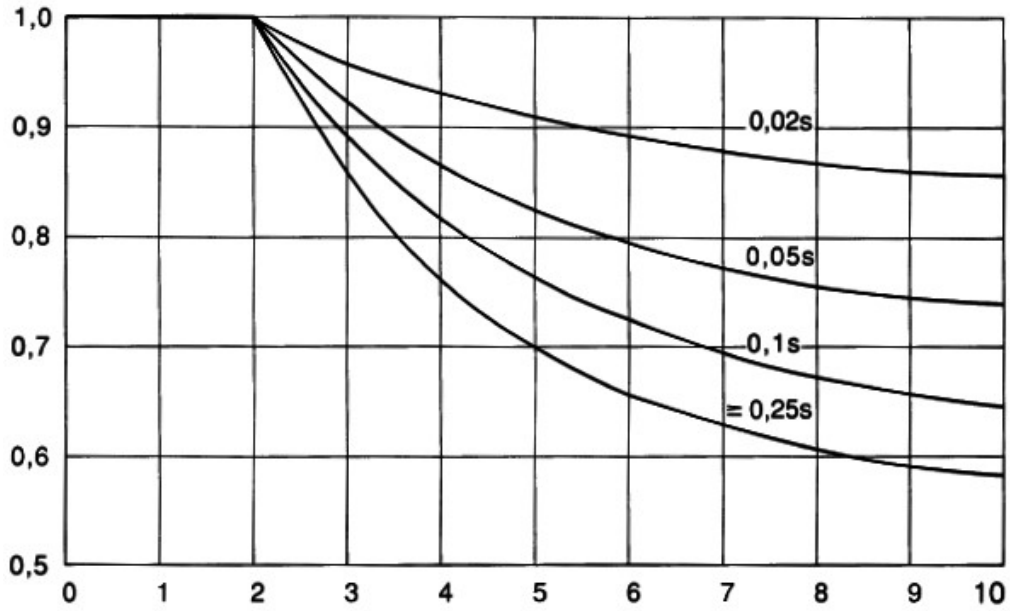
I_b kısa devre kesme akımı hata jeneratöre yakın ve koruma zaman gecikmeli röleler ile sağlandığı durumlarda hesaplanması gerekmektedir. Kısa devre kesicisinin kesme kapasitesi belirlenmesinde kullanılır.

$$I_b = \mu . I''_{kG} \tag{3.71}$$

(3.71) ile ifade edilir.

μ simetrik kısa devre akımının gecikmeli açma sürecindeki azalmasını ifade eder.

Minimum zaman gecikmesine ve I''_{kG}/I_{rG} ye bağlıdır.



Şekil 3. 17 IEC 60909 μ eğrileri

Empedans düzeltme faktörleri

IEC 60909 standardında kısa devre akım hesabının doğruluğunu sağlamak ve yaklaşımı basitleştirmek amacıyla empedans düzeltme faktörleri uygulanır [29].

- Transformatörler için;

K_T iki veya üç fazlı transformatörler için uygulanır.

$$Z_{TK} = K_T . Z_T \tag{3.72}$$

$$K_T = 0{,}95 \frac{c_{maks}}{1+0{,}6x_T} \quad (3.73)$$

$$x_T = X_T \frac{S_{rT}}{U_{rT}^2} \quad (3.74)$$

Transformatörler için empedans düzeltme faktörü dengesiz kısa devre hesabında negatif ve sıfır bileşen empedanslarına uygulanmalıdır. Ayrıca yıldız noktası empedans üzerinde topraklı transformatörlerde bu empedans $3Z_N$ sıfır bileşen empedansı olarak kısa devre hesabında dikkate alınır ve bu empedansa düzeltme faktörü uygulanmaz [29].

- Jeneratör ve güç şebekesi için;

Jeneratör pozitif bileşen subtransient empedans için düzeltme faktörü; K_G

$$Z_{GK} = K_G . Z_G = K_G . (R_G + jX_G^{"}) \quad (3.75)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} . \frac{c_{maks}}{1+x_d^{"} . \sin \emptyset_{rG}} \quad (3.76)$$

R_G jeneratör senkron rezistansıdır.

$R_G = 0.05\ X_d^{"}\ U_{rG} > 1kV$ ve $MVA \geq 100$ olan makinalar için

$R_G = 0.07\ X_d^{"}\ U_{rG} > 1kV$ ve $MVA < 100$ olan makinalar için

$R_G = 0.15\ X_d^{"}\ U_{rG} \leq 1000V$ olan makinalar için

Yük altında kademe değiştiricili güç şebekeleri için düzeltme faktörü; K_S

$$Z_S = K_S . (t_{Rzg}^2 + Z_{THV}) \quad (3.77)$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rQ}^2} . \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} . \frac{c_{maks}}{1+|x_d^{"} - x_T| \sin \emptyset_{rG}} \quad (3.78)$$

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \quad (3.79)$$

Yük altında kademe değiştirici içermeyen elektrik şebekeleri için düzeltme empedansı;

$$Z_S = K_{SO} . (t_{Rzg}^2 + Z_{THV}) \quad (3.80)$$

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}(1+p_G)} . \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} . (1 \pm p_{T)} . \frac{c_{maks}}{1+x_d^{"} \sin \emptyset_{rG}} \quad (3.81)$$

3.1.2.2 Empedans Metodu

Üç fazlı kısa devre

Üç fazın da dahil olduğu kısa devrelerdir.

$$I_{SC3} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{SC}} \tag{3.82}$$

U ; İki faz arası gerilim

Z_{SC}; Toplam hata empedansı

$$Z_{SC} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \tag{3.83}$$

R ; Seri rezistansların toplamı

X ; Seri endüktansların toplamı

Jeneratörlere elektriksel olarak yakın noktalar dışında en yüksek kısa devre akımı üç fazlı kısa devrede meydana gelir. Tesisin boyutlandırmasında iletkenlerin elektrodinamik dayanımında ve kesicilerin maksimum açma akımlarında dikkate alınmalıdırlar [30].

İki faz kısa devre

$$I_{SC2} = \frac{U}{2.Z_{SC}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.I_{SC3} \approx 0{,}86.I_{SC3} \tag{3.84}$$

Genellikle üç faz kısa devrelere akımından küçüktürler. Fakat döner makinalara yakın noktalarda iki faz kısa devre akımı üç fazdan daha yüksek olabilir [30].

Faz nötr kısa devresi

Faz ve nötr arasında meydana gelen kısa devrelerdir. Arıza faz-nötr gerilim ile beslenir.

Z_{LN} ; Nötr empedansı

V ; Faz nötr arası gerilim

$$V = U/\sqrt{3} \tag{3.85}$$

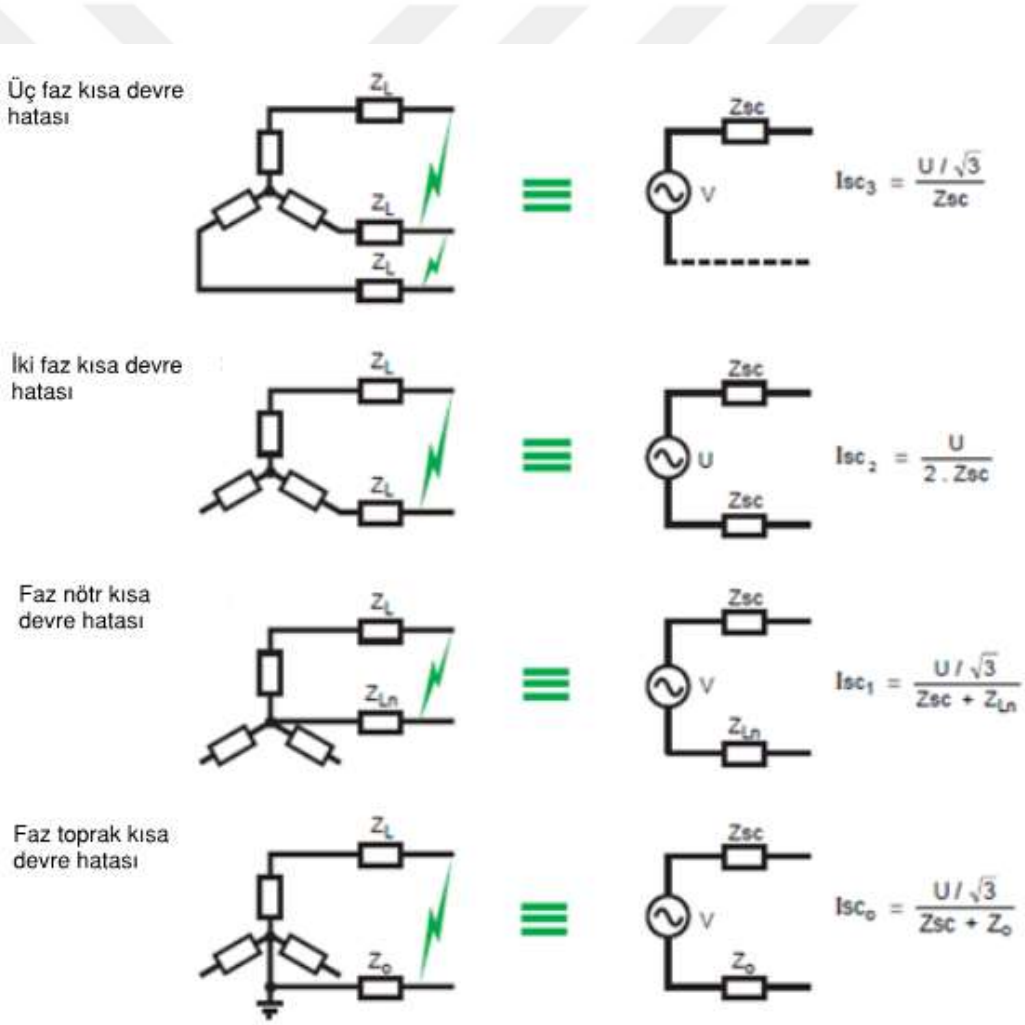
$$I_{SC1} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{SC}+Z_{LN}} \tag{3.86}$$

Sıfır bileşen empedansının düşük olduğu döner makinalara yakın noktalarda veya üçgen sargı sebebiyle primer tarafın katkısının ihmal edildiği durumlarda I_{SC1} faz nötr kısa devre akımı üç fazlı kısa devre akımından fazla olabilir [30].

Faz-toprak kısa devresi

Sıfır bileşen empedansını da dikkate almak gerekmektedir. Döner makinalara yakın noktalarda üç fazlı kısa devre akımından büyüktürler [30].

$$I_{SC0} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{SC}+Z_0} \tag{3.87}$$



Şekil 3. 18 Orta ve alçak gerilim seviyesinde empedans metodu kısa devreleri

Devre elemanları empedans değerleri;

Şebeke empedansı;

$$Z_{up} = \frac{U^2}{S_{SC}} \tag{3.88}$$

U ; Yüksüz faz-faz gerilimi

Rn/Zn ≈ 0,3 ; 6kV gerilim seviyesine kadar olan şebekelerde

Rn/Zn ≈ 0,2; 20kV gerilim seviyesine kadar olan şebekelerde

Rn/Zn ≈ 0,1; 150kV gerilim seviyesine kadar olan şebekelerde

Zn ≈ Xn

Transformatör Empedansı

Transformatör empedansı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$Z_T = \frac{U_{SC}}{100} . \frac{U^2}{S_n} \tag{3.89}$$

U= Yüksüz faz-faz gerilimidir.

S_n = Transformatör gücü kVA

$\%U_{SC}$; Transformatörün kısa devre empedansı. Transformatörün sekonder sargılarının kısa devre edildiği durumda, sekonder tarafta nominal akım akmasını sağlayan primer gerilim seviyesidir.

Avrupa Harmonizasyon standardı HD 428-1S1 de yayınlanan OG/AG transformatörlerinin %Uk değerleri [30];

Çizelge 3. 2 IEC60909 gerilim faktörü tablosu

OG/AG Transformatör gücü (kVA)	≤ 630	800	1000	1250	1600	2000
Kısa devre gerilimi $\%U_{SC}$	4	4,5	5	5,5	6	7

Genellikle yüksek güçlü transformatörlerde endüktif empedans rezistif empedanstan oldukça yüksektir;

$$R_t \ll X_t \tag{3.90}$$

Endüktif empedansın reziztif empedanstan oldukça yüksek olduğu durumlarda R_t ihmal edilebilir.

$$Z_t \approx X_t \tag{3.91}$$

Daha düşük güçteki transformatörlerde ise reziztif empedansa görece daha yüksektir. Bu transformatörlerin toplam empedansını hesaplarken Rt nin de dikkate alınması gerekmektedir. Reziztif direnç aynı zamanda joule kaybına sebep olmaktadır.

$$W = 3.R_T.I_n^2 \tag{3.92}$$

Elektriksel olarak eş transformatörlerin birbirleri ile paralel bağlanmaları durumunda toplam eş empedans Z_t/n (transformatör adedi) kadar olacaktır.

Kısa devre akımlarının kesici ve iletken anma akımlarını dikkate alarak azaltılması gereken durumlarda transformatörler yıldız sargıları nötr noktalarından direnç üzerinden topraklanırlar. Nötr noktası direnç üzerinden topraklanmış transformatörlerde toplam empedansı hesaplarken bu direnci de dikkate almak gerekmektedir [30].

$$I_{sc} = \frac{U}{\sqrt{3}.(Z_{UP}+Z_T)} \tag{3.93}$$

Hat Empedansı;

Hat empedansı hattın uzunluğuna ve birim reziztif ile endüktif enpedanslarına bağlı olarak hesaplanır (30).

Birim rezistans formülü;

$$R_L = \frac{\rho}{A} \tag{3.94}$$

A ; İletken kesiti

ρ ; İletken öz direnci. Hesaplanacak maksimum ve minimum kısa devre değerine göre değişkenlik gösterir. Maksimum kısa devre değeri için 20^{o}C derece minimum olan empedansın değeri alınır. Minimum kısa devre akımı hesaplanacak ise iletkenin işletme sıcaklığındaki minimum empedans değeri hesapta dikkate alınır.

Alçak gerilim kablolarında 150mm² kesitinin altındaki kablolarda endüktif direnç ihmal edilebilir

İletkenler için endüktif direnç aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$X_L = L.\omega = \left[15{,}7 + 144{,}44.\log\frac{d}{r}\right] \tag{3.95}$$

mΩ / km ile ifade edilir.

r ; İletkenin yarı çapı

d ; İletkenler arasındaki mesafe

$\log\frac{d}{r}$ den anlaşılacağı üzere iletkenler arasındaki mesafe arttıkça yaklaşık olarak aynı doğrultuda reaktans ta artmaktadır. Yüksek gerilim hatlarında gerilim seviyesinin yükselmesi ile iletkenler arasındaki mesafede artmaktadır [30].

Aşağıdaki çizelgelerde UTE C 15-105 Fransız standardında bulunan alçak gerilim iletkenlerinin rezistif ve endüktif dirençleri görünmektedir [30].

Rule	Resistitivity (*)	Resistivity value ($\Omega\,mm^2/m$)		Concerned conductors
		Copper	Aluminium	
Max. short-circuit current	ρ_0	0.01851	0.02941	PH-N
Min. short-circuit current				
■ With fuse	$\rho_2 = 1{,}5\ \rho_0$	0.028	0.044	PH-N
■ With breaker	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_0$	0.023	0.037	PH-N (**)
Fault current for TN and IT systems	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_0$	0,023	0,037	PH-N PE-PEN
Voltage drop	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_0$	0.023	0.037	PH-N
Overcurrent for thermal-stress checks on protective conductors	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_0$	0.023	0.037	PH, PE and PEN

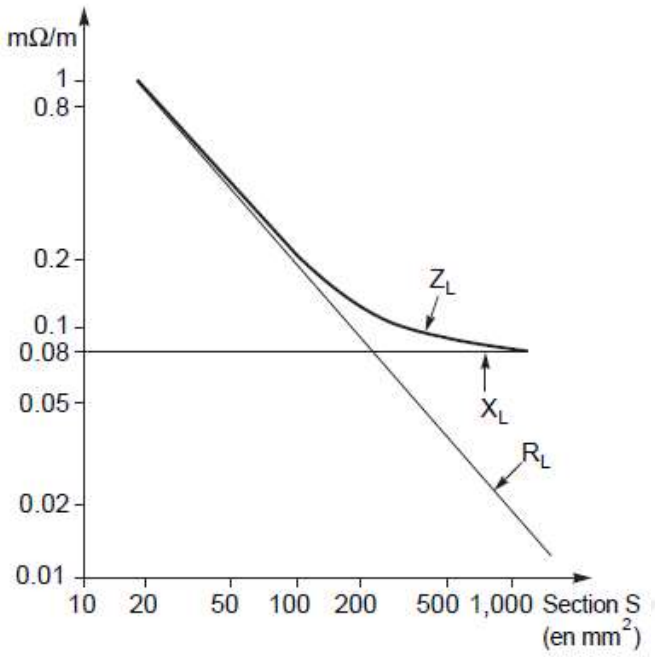
(*) ρ_0 = resistivity of conductors at 20°C = 0.01851 $\Omega\ mm^2/m$ for copper and 0.02941 $\Omega\ mm^2/m$ for aluminium.
(**) N, the cross-sectional area of the neutral conductor, is less than that of the phase conductor.

Wiring system	Busbars	Three-phase cable	Spaced single-core cables	Touching single core cables (triangle)	3 touching cables (flat)	3 «d» spaced cables (flat) d = 2r	d = 4r
Diagram							
Reactance per unit length, values recommended in UTE C 15-105 (mΩ/m)		0.08	0.13	0.08	0.09	0.13	0.13
Average reactance per unit length values (mΩ/m)	0.15	0.08	0.15	0.085	0.095	0.145	0.19
Extreme reactance per unit length values (mΩ/m)	0.12-0.18	0.06-0.1	0.1-0.2	0.08-0.09	0.09-0.1	0.14-0.15	0.18-0.20

Şekil 3. 19 UTE C 15-105 Fransız standardı iletkenler için rezistans değerleri

İletkenlerin toprağa göre kapasitansları birbirlerine göre olandan 10-20 kat daha büyüktür. Bu sebepten faz toprak kısa devrelerinde özellikle iletim hatlarında kapasitif direnç dikkate alınmalıdır.

20^{o}C de üç fazlı kablo için örnek bir rezistans-endüktans ve toplam empedans grafiği. Grafikten görüleceği üzere kesit arttıkça direnç azalmaktadır. Küçük kesitli kablolarda rezistans endüktansa göre yüksek olduğu için toplam empedans rezistansa eşittir. Yüksek kesitli kablolarda ise direnç gittikçe azalmakta ve bir değerden sonra ihmal edilebileceğinden endüktans ile toplam empedans birbirine yakınsamıştır.



Şekil 3. 20 Kablolarda kesit değişimi ile rezistans ve endüktans ilişkisi

Döner makinaların empedansı

Senkron jeneratörler

Senkron jeneratör empedans formülü;

$$Z_G = \frac{x}{100} . \frac{U^2}{S_n} \quad (3.96)$$

U ; yüksüz faz-faz gerilimi

S_n ; Jeneratör VA gücü.

R / X oranı orta gerilim jeneratörleri için 0,05 ile 0,1 arasında, alçak gerilim jeneratörleri için ise 0,1 ile 0,2 arasındadır. Endüktansın rezistansa göre oldukça yüksek olmasından dolayı toplam empedans Z ile endüktans X ile yaklaşık olarak aynı kabul edilebilir. (30)

Çizelge 3. 3 de yuvarlak rotorlu (turbo-generator) ile çıkık kutuplu rotorların alt geçici, geçici ve sürekli haldeki empedans değerleri gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere yuvarlak rotorlu jeneratörlerde sürekli haldeki empedans %100 den daha büyüktür. Bunun anlamı sürekli durum kısa devre akımının nominal akımdan daha düşük olabileceğidir. Ayrıca jeneratörler tamamen endüktif empedans olarak kabul edilebileceğinden kısa devre gücü tamamen reaktif olmasına ve bu da makinanın aşırı uyarıma gitmesine sebep olacaktır [30].

Çizelge 3. 3 Senkron jeneratör empedansları

Senkron jeneratör tipi	Sub-transient reaktans	Transient reaktans	Senkron reaktans
Turbo jeneratör	10-20	15-25	150-230
Çıkık kutuplu jeneratör	15-25	25-35	70-120

Senkron motorlar

Senkron motorlar senkron jeneratörler ile benzer kısa devre davranışına sahiptir. Tipik empedans değerleri çizelge 3. 4 de gösterilmiştir [30].

Çizelge 3. 4 Senkron motor empedansları

Senkron motorlar	Sub-transient reaktans	Transient reaktans	Senkron reaktans
Yüksek hızlı motorlar	15	25	80
Düşük hızlı motorlar	35	50	100
Kompanzatörler	25	40	160

Asenkron Motorlar

Asenkron motorların bağlı bulundukları devreden ayrılmaları, yani enerjilerinin aniden kesilmesi durumunda terminallerinde kısa süre içerisinde sönümlenen bir gerilim görülür. Benzer şekilde asenkron motorun terminallerinde bir kısa devre meydana gelmesi durumunda motor bu kısa devre akımını belirli bir süre besler. Bu ters kısa devre

akımı zaman katsayısına bağlı olarak bir süre sonra sönümlenir. Asenkron makinaların geçici hal empedansları %20-%25 aralığında olabilir. Dağıtım sistemi tasarımında asenkron makinalardan kaynaklanan ters geri beslemelerinde dikkate alınması gerekmektedir [30].

Devre Kesiciler

Kısa devrenin üzerinde bulunan devre kesici, kontaktör vb. ekipmanlarında empedansları kısa devre hesabında dikkate alınabilir. Özellikle alçak gerilimde seçici devre kesiciler bir alt dizideki kesiciler ile seçiciliği sağlamak için arızayı bir süre üzerinden geçirirler. Bu durumda kesicinin empedansının da dikkate alınması gerekmektedir. Alçak gerilim kesicilerinin empedansı 0,15mΩ olarak alınabilir [30].

Arıza Arkı

Kısa devre akımları genellikle bir elektrik arkı üzerinden akarlar. Ark direnci oldukça yüksektir ve gerilimi önemli ölçüde azaltırlar. 300V gerilim düşümüne sebep olabilmektedirler. Yüksek gerilim sistemlerinde bu gerilim düşümü gerilim seviyesi sebebiyle çok önemli olmamakla birlikte alçak gerilim de önemli azalmalara sebep olur. Maksimum kısa devre akımını hesaplarken ark dirençleri dikkate alınmamalıdır. Çünkü solid bir kısa devre ihtimali her zaman bulunur ve ekipmanların maksimum dayanımları buna göre seçilmelidir. Fakat minimum kısa devre hesaplarında alçak gerilim dağıtım sistemlerinde ark direnci dikkat alınabilir [30].

3.2 Orta Gerilimde Koruma ve Koordinasyon

3.2.1 Orta Gerilim Anahtarlama Elemanları ve Standartları

1kV ≤ U ≤ 52kV gerilim aralığındaki cihazlardır ve IEC 62271-200 ile standartlaştırılmışlardır. 52kV anma gerilimine kadar üretilen ve devreyi kesme, akım üzerine kapama, yüksüz anahtarlama, çalışma akımında kesme ve kısa devre akımını kesme görevlerini yerine getirirler. Bu ekipmanlar ile ilgili standart tanımları [31];

Orta gerilim anahtarlama elemanları;

- Devre kesici; Kısa devre dahil üretim kapasitesi doğrultusunda tüm akımlara karşı açma ve kapama yaparlar.

- Ayırıcı; Yüksüz açma ve kapama yapan cihazlardır.
- Yük ayırıcısı; Nominal yük altındaki devrede açma ve kapama yapabilirler. Kısa devre akımlarını kesemezler. Orta gerilim sigortaları ile kombine edilen sigortalı yük ayırıcıları kısa devrede açma yapabilirler.

Orta gerilim kesicilerinin karakteristikleri;

- Tepe kapama akımı; Devre kesici tarafından kapanırken kontaklarındaki akım tepe değeridir.
- Kesme kapasitesi; Devre kesici veya yük ayırıcı için üretimi doğrultusunda beklenen maksimum kesebileceği akımdır.
- Açma zamanı; Koruma rölesinden açtırma sinyalinin iletilmesi ile kesici kontaklarının ayrılmasına kadar geçen süredir.
- Kapama zamanı; Kontrol sisteminden kapama sinyalinin iletilmesi ile kesicinin bütün kontaklarının birbirlerine dokunduğu süre arasında geçen süredir.
- Akım üzerine kapama zaman; Kontrol sisteminden kapama sinyalinin iletilmesi ile kesici kontaklarının kapanıp akımın devrede akmaya başladığı zamana kadar geçen süredir.
- Nominal gerilim; Anahtarlama cihazının boyutlandırıldığı ve kullanıldığı dağıtım sisteminin en yüksek gerilim seviyesinden bir üstte olması gereken gerilimdir.
- Nominal akım; Anahtarlama cihazının ve bağlandığı devrenin sürekli durumda taşıdığı akımdır.
- Kısa süreli dağıtım sistemi frekansında dayanım gerilimi; Cihazın 1 dakika süresince dayanması gereken çalışma frekansındaki maksimum A.C gerilimin efektif değeridir.
- Yıldırım darbe dayanım gerilimi; Cihazın izolasyonunun dayanması gereken 1,2/50µs standart darbe gerilim tepe değeridir.

3.2.2 Başlıca Orta Gerilim Koruma Röleleri ve Tanımlar

Orta gerilim koruma rölelerini temel olarak aşağıdaki şekilde gruplandırılabilirler. [24]

-Tanımlı eşik değerli koruma röleleri;

a.Aşırı akım ve ters zamanlı aşırı akım röleleri. ANSI kodları; 50/50N/50G/51/51N/51G

b.Aşırı yük koruması. ANSI kodu; 49

c.Frekans koruması. ANSI kodu; 81H/81L

d.Gerilim koruması. ANSI kodu; 27/59

-Karşılaştırmalı koruma röleleri;

e.Fark koruma röleleri. Birim koruma rölesi olarak da adlandırılır. ANSI kodu; 87B /87G/87L/87M/87T

-Yönlü koruma röleleri;

f.Mesafe koruma röleleri. ANSI kodu; 21

g.Yönlü toprak hata röleleri. ANSI kodu; 67N/67NC/67

-Otomatik tekrar kapama rölesi;

h.Tekrar kapama rölesi. ANSI kodu; 79.

Bu rölelerden en sık kullanılan aşırı akım, fark rölesi ve birim koruma rölesi ile ilgili tanımlar aşağıda verilmiştir.

3.2.2.1 Aşırı Akım Rölesi

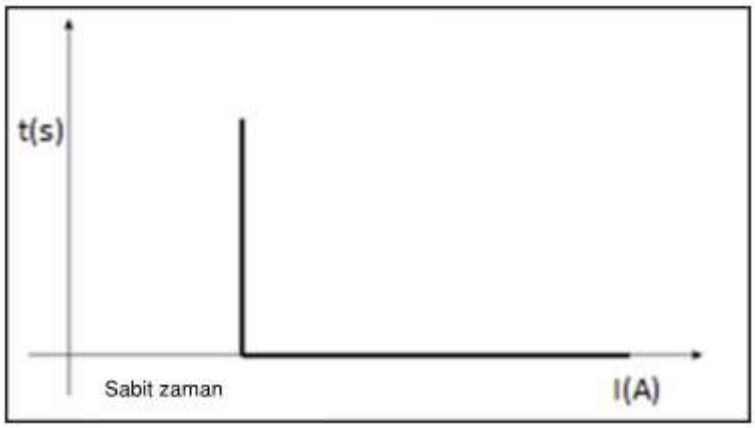
Aşırı akım röleleri zaman çalışma karakteristiğine bağlı olarak üç gruba ayrılırlar [32].

a.Sabit akımlı anlık açmalı aşırı akım rölesi

b.Sabit akımlı ve tanımlı zamanlı aşırı akım röleleri

c.Ters zamanlı aşırı akım röleleri

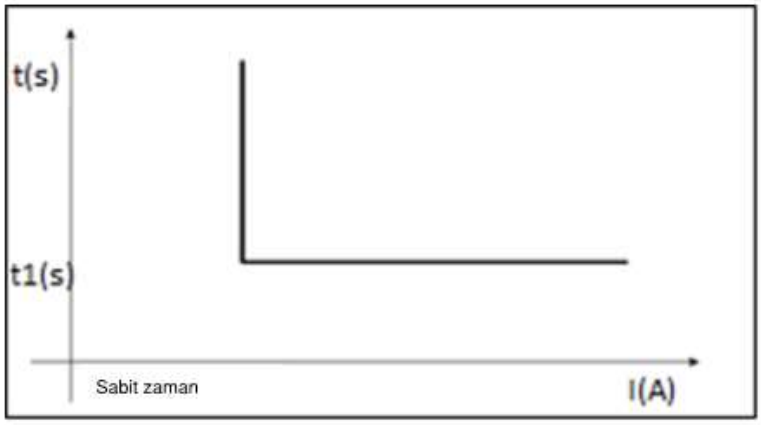
Sabit akımlı anlık açmalı aşırı akım röleleri;



Şekil 3. 21 Aşırı akım rölesi sabit zaman anlık açma zaman eğrisi

Yukarıdaki şekilde rölenin açma eğrisi gösterilmiştir. Bu röleler arıza akımı set edilen röle akımını geçtiğinde anlık olarak açarlar. İstenmeyen açmaları önlemek için genellikle kaynaktan uzakta kullanılırlar. Kaynağa doğru set edilen akım değeri artırılarak seçicilik sağlanır [32].

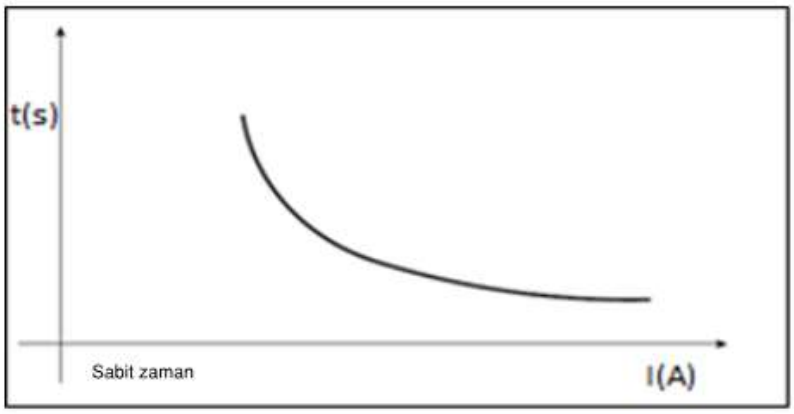
Sabit akımlı ve tanımlı zamanlı aşırı akım röleleri;



Şekil 3. 22 Aşırı akım rölesi sabit zaman- akım eğrisi

Bu rölelerde arıza akımı set edilen akımı geçtiğinde yine röle üzerinde belirlenen zamanda açma sağlanır. Değişebilir zaman aralığı ile seçicilik istenen uygulamalara daha uygundurlar [32].

Ters zaman röleleri;



Şekil 3. 23 Aşırı akım rölesi ters zaman- akım eğrisi

Bu röleler hata akımı ile ters oransal bir zamanda çalışırlar. Hata akımı arttıkça açma süresi ters oranda azalır [32].

Ters zamanlı aşırı akım röleleri açma karakteristiği IEC 62255-151 standardına göre değişebilir [33].

-Normal ters zamanlı açma (IEC tip-A)

-İleri ters zamanlı açma (IEC tip-B)

-Aşırı ters zamanlı açma (IEC tip-C)

-Uzun ters zamanlı açma (IEC tip-D)

Ters zaman rölesi akım karakteristik formülü [34];

$$t = \frac{k.\beta}{\left[\frac{I}{I>}\right]^{\alpha} - 1} \tag{3.96}$$

k ; Ayarlanabilir zaman katsayısı

α, β; Akım zaman eğrisi parametreleri

I; Ölçülen faz akım değeri

$I >$; Röle açma akımı değeri

Çizelge 3. 5 IEC 62255-151 ters zamanlı röle karakteristikleri

Karakteristik	α	β
Normal ters zamanlı	0,02	0,14
İleri ters zamanlı	1	13,5
Aşırı ters zamanlı	2	80
Uzun ters zamanlı	1	120

Aşırı akım röleleri 2MW tan daha az güçteki motor ve 10MVA dan daha az güçteki şebekelerde ana koruma elemanı olarak tercih edilir. Daha büyük güçlerde mesafe koruması vb. gibi farklı koruma tipleri tercih edilir. Bu uygulamalarda "back-up" koruma elemanı olarak tercih edilmelidir [33].

Yönlü aşırı akım röleleri;

Yönlü aşırı akım röleleri özellikle birden çok kaynağın paralel çalıştığı ve kapalı dağıtım sistemlerinde koruma koordinasyonunu sağlamak için kullanılırlar.

Bağlı bulunduğu baraya içeri yönde veya baradan dışarı yönde akımlara duyarlı olacak şekilde seçilebilir. Bu akım rölenin eşik değerini geçtiğinde akım-zaman karakteristiğine göre açma sinyali üretir.

Röle akımın yönünü gerilim ile karşılaştırarak bulur. Bu sebepten gerilim transformatörlerinin de kullanılması gerekmektedir.

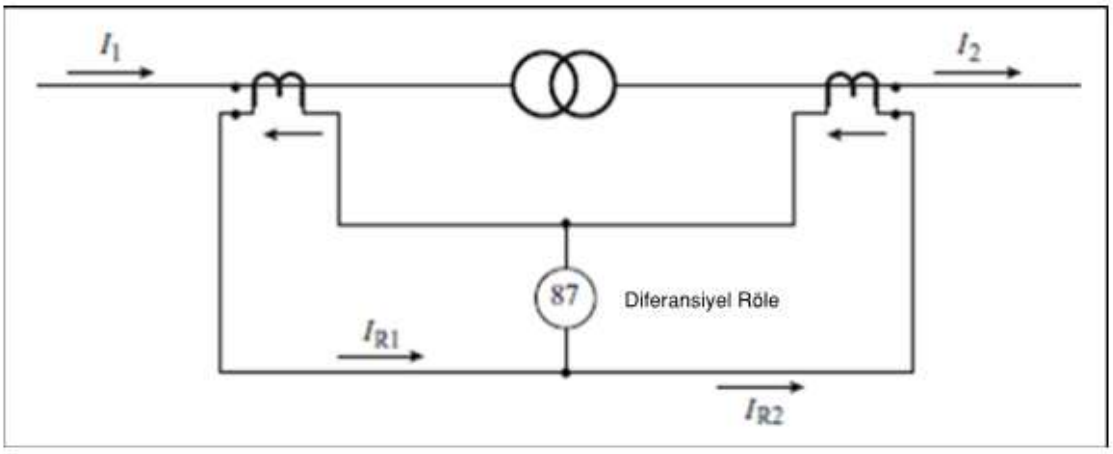
İki faz arası polarizasyon gerilimi ile akım arasında 90^0 açı farkı, akımın ayarlanan yönde (ileri veya geri) olması ve eşik değeri geçmesi durumunda röle açma sinyali gönderir. Birim güç faktörüne yakın çalışma karakteristiklerinde yanlış açmalara sebep olmamak için polarizasyon gerilimi belirlenen bir açı ile saat yönünün tersinde ilerletilerek bu kontrol sağlanır.

Röleye yakın üç faz kısa devrelerde gerilim sıfırlanacağı için bu rölelerin ölçülen gerilim değerlerini kaydeden bir hafızaya sahip olması gerekmektedir. [33].

3.2.2.2 Diferansiyel Koruma Röleleri

Enterkonnekte yüksek gerilim uygulamalarında oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Koruma kapsamı tek bir ekipmanı (transformatör, bara, iletim hattı vb.) kapsayacak şekilde düzenlenir. Eğer koruma kapsamı içerisinde bir hata olursa röle kesiciye açma sinyali gönderir. Eğer hata akımı koruma kapsamı içerisinde değilse röle tepki vermemelidir.

Akım korunan ekipmanın giriş ve çıkış kısmında ölçülür ve faz açısı ve genliği karşılaştırılır. Eğer bu fark akımının değeri set edilen değeri aşıyorsa röle kesiciye açma sinyali gönderir [35].



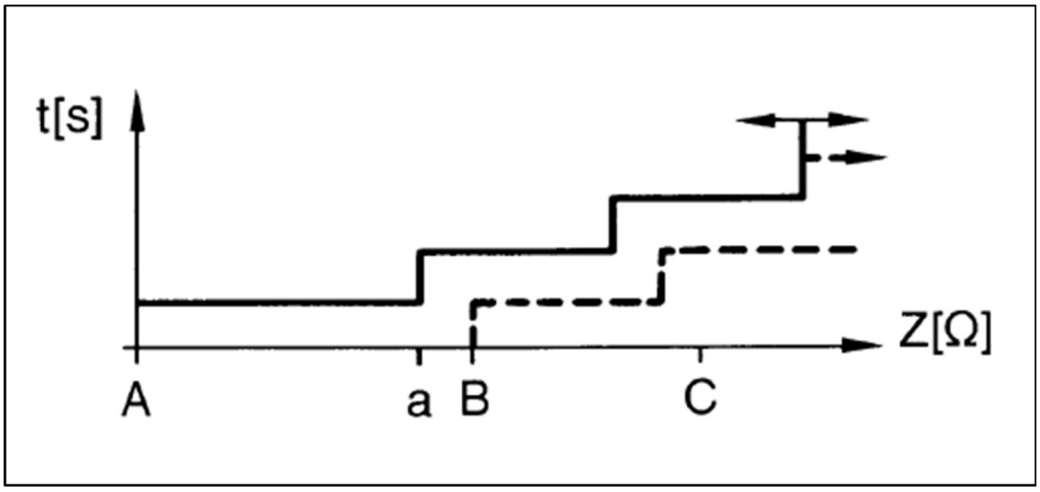
Şekil 3. 24 Diferansiyel röle

3.2.2.3 Mesafe Röleleri

Mesafe koruma röleleri endüstriyel uygulamalarda çok az kullanılmasına rağmen yüksek gerilim uygulamalarında oldukça yaygın kullanılırlar [36].

Aşırı akım rölelerinin seçicilik anlamında kısıtlamaları ayrıca yüksek hata akımlarında fark koruma rölelerinin kararlı çalışamaması yukarıda belirtildiği gibi özellikle yüksek gerilim uygulamalarında mesafe rölesinin sıklıkla kullanımını gerektirmektedir [35].

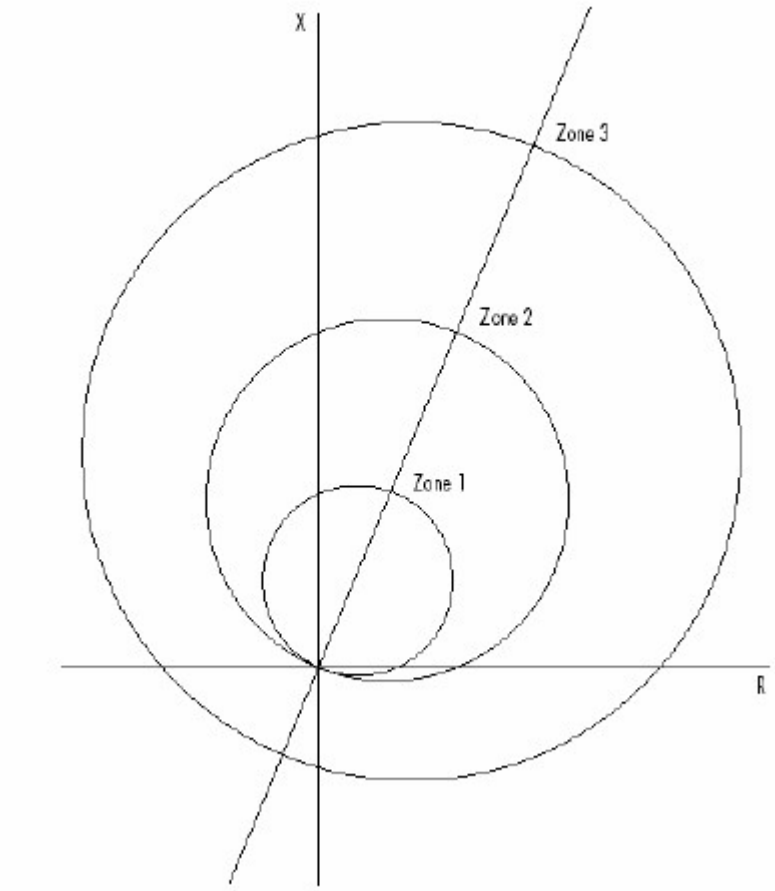
Bu rölelere akım ve gerilim trafoları üzerinden devrenin gerilim ve akımının bilgisi sağlanır. Mesafe röleleri arızanın mesafesinin arıza empedansı ile orantılı olduğu prensibi ile çalışır.



Şekil 3. 25 Mesafe rölesi

Yukarıdaki şekilde örnek bir mesafe rölesi uygulaması gözükmektedir. BC aralığında olan bir kısa devrede B noktasında röle ilk açma sinyalini verecektir. Arızanın temizlenmesinin ardından A rölesi normal çalışma durumuna geçecektir. A noktasındaki röle "back-up" koruma rölesi olarak da işlev görmektedir.

Şekil 3. 26 da mesafe rölesine ait örnek bir X-R eğrisi gösterilmiştir. Modern mesafe röleleri ölçülen admitans değeri ile lineer bir koruma sağlar. Görüldüğü üzere ayarlanabilir dairesel koruma karakteristikleri vardır. Ayrıca korunan dağıtım sisteminin faz açısına göre yönlü korumada sağlar [36].



Şekil 3. 26 Mesafe rölesi X-R eğrisi

3.3 Alçak Gerilimde Koruma ve Koordinasyon

3.3.1 Alçak Gerilim Koruma Röleleri ve Tanımları

Alçak gerilim sisteminde elektriksel koruma cihazları

-Aşırı yük

-Kısa devre ve

-Kaçak akım hatalarına karşı kullanılırlar [37].

Bu başlıca alçak gerilim koruma cihazları;

-Alçak gerilim sigortaları

-Devre kesiciler

-Minyatür devre kesiciler ve

-Kaçak akım koruma cihazlarıdır [37].

Sigortalar; Ters zaman korumalı cihazlardır. Yüksek kısa devre akımlarında kısa devre açma süresi azalır ve arızanın tepe akımı sınırlandırılır [33].

Devre kesiciler; Alçak gerilim devre kesicileri montaj tiplerine (sabit – çekmeceli), maksimum nominal akımlarına (Açık tip devre kesici, kompakt tip devre kesici), açtırma ünitelerine (termomanyetik ve elektronik açtırma ünitesi) ve koruma fonksiyonlarına göre ayrılırlar [38].

Termomanyetik devre kesici koruma fonksiyonları;

-MF; Sabit manyetik açtırma ünitesi

-MA; Ayarlanabilir manyetik açtırma ünitesi

-TMG; Jeneratör koruması için termomanyetik açtırma ünitesi

-TMD; Ayarlanabilir termik ve sabit manyetik eşikli açtırma ünitesi

-TMA; Ayarlanabilir termik ve manyetik açtırma ünitesi

Elektronik devre kesici koruma fonksiyonları; Açık tip devre kesicilerin ve kompakt devre kesicilerinin temel koruma fonksiyonları aşağıda sıralanmıştır [38].

-L - Uzun zaman gecikmeli; Aşırı yüke karşı ters uzun zaman koruma ve enerji geçişi (let through energy) karakteristiği sayesinde koruma sağlar.

-S – Ayarlanabilir zamanlı kısa devre koruması

-I – Ani açan kısa devre koruması

-G – Ayarlanabilir zamanlı toprak hata koruması

-U – Dengesiz faz koruması

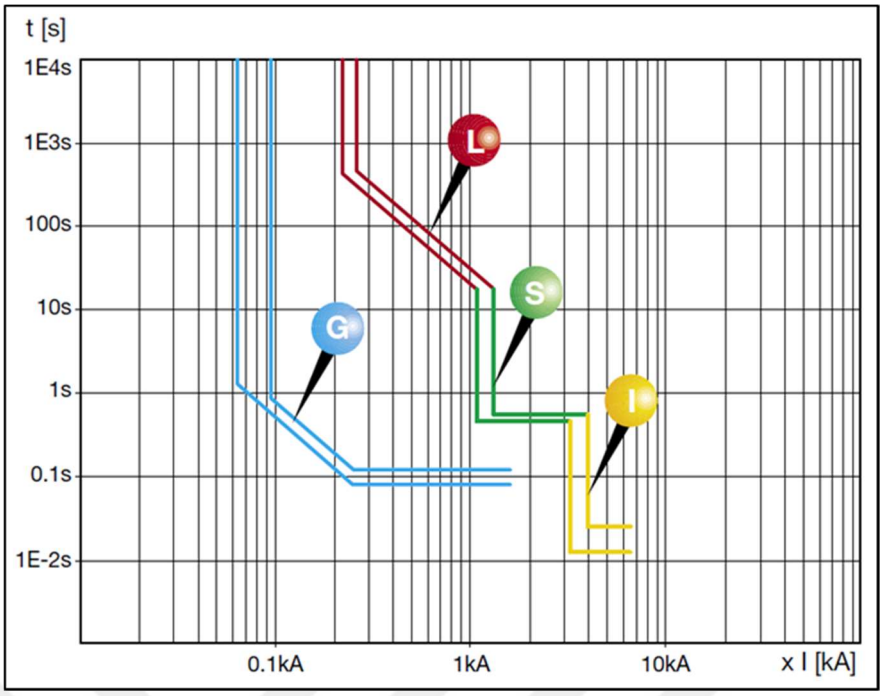
-UV – Düşük gerilim koruması

-OV – Aşırı gerilim koruması

-UF – Düşük frekans koruması

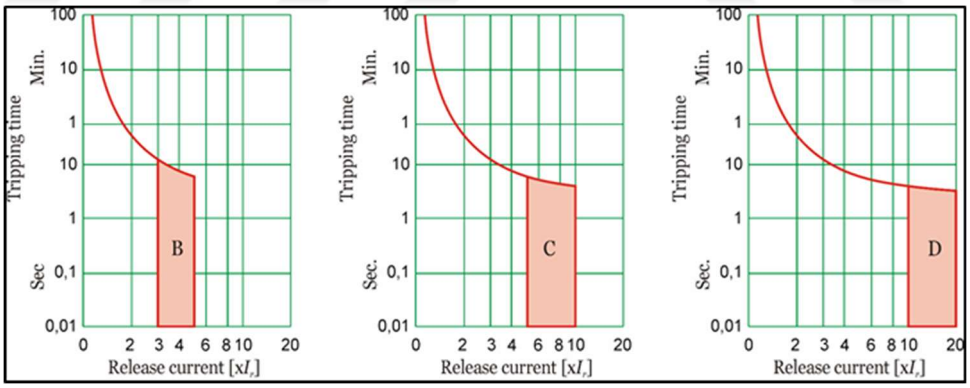
-**OF** – Aşırı frekanks koruması

-D – Ayarlanabilir yönlü kısa devre koruması



Şekil 3. 27 Elektronik devre kesici koruma fonksiyonları

Minyatür devre kesiciler; 10kA e kadar aşırı yük ve kısa devre koruması yapan devre kesicilerdir. B-C-D açma karakteristiklerine sahiptir. B tipi MCB ler nominal akımın 3 ile 5 katında, C tipi 6 ile 10, D tipi ise 10 ile 20 katında anlık açma yapmaktadır [24].

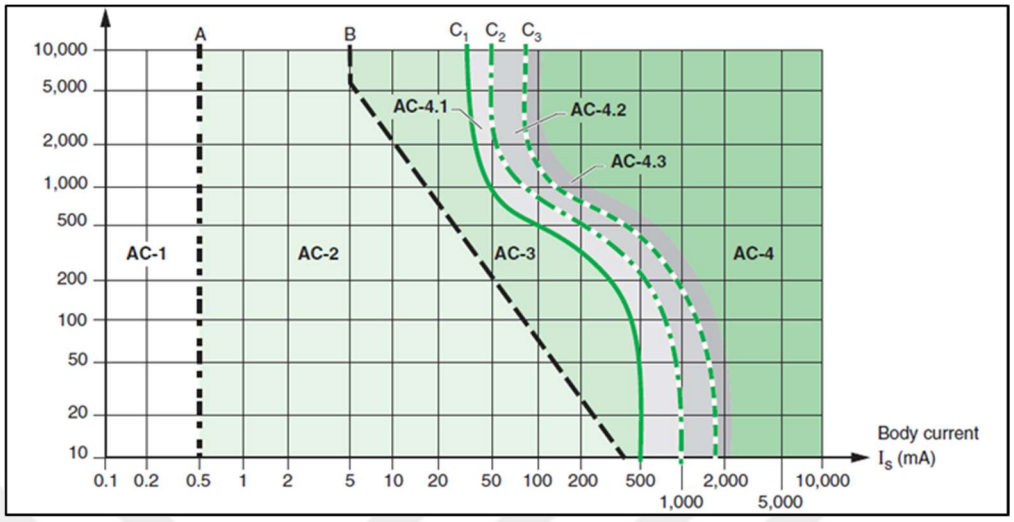


Şekil 3. 28 Minyatür devre kesici akım zaman eğrileri

Kaçak akım koruma cihazı; 3A e kadar toprak hata akımlarına karşı kullanılan fark röleleridir. Direk dokunma arızalarında 30mA eşik değerleri ile can güvenliği sağlayacak şekilde koruma yapabilir. TT şebekelerde kaçak akım koruma rölesinin kullanımı zorunludur.

Şekil 3.8’ de AC akımın insan vücuduna etkisinin akım zaman eğrisindeki zonları gösterilmiştir. AC-3 geri dönüşü olabilen en üst sınırdır. AC-4 zonlarındaki hata

akımlarında geri dönüşü olmayan yaralanmalar ve ölüm ile sonuçlanır. Grafikten görülebileceği üzere 30mA eşiği zamandan bağımsız üst sınırdır [39] [40].



Şekil 3. 29 Aşırı akımın insan vücuduna etkisi akım-zaman grafiği

3.4 Koruma Sistemlerinde Seçicilik

Bu bölümde kısaca çeşitli seçicilik kavramlarından bahsedilecektir.

3.4.1 Zaman Temelli Seçicilik

Röleler arası zaman gecikmesi ile sağlanır. Kaynağa yakın rölelerde daha uzun süreli gecikmeler olması gerekmektedir.

İki koruma rölesi arası zaman seçiciliği sağlamak için gereken minimum zaman (3.97) formülü ile hesaplanacaktır.

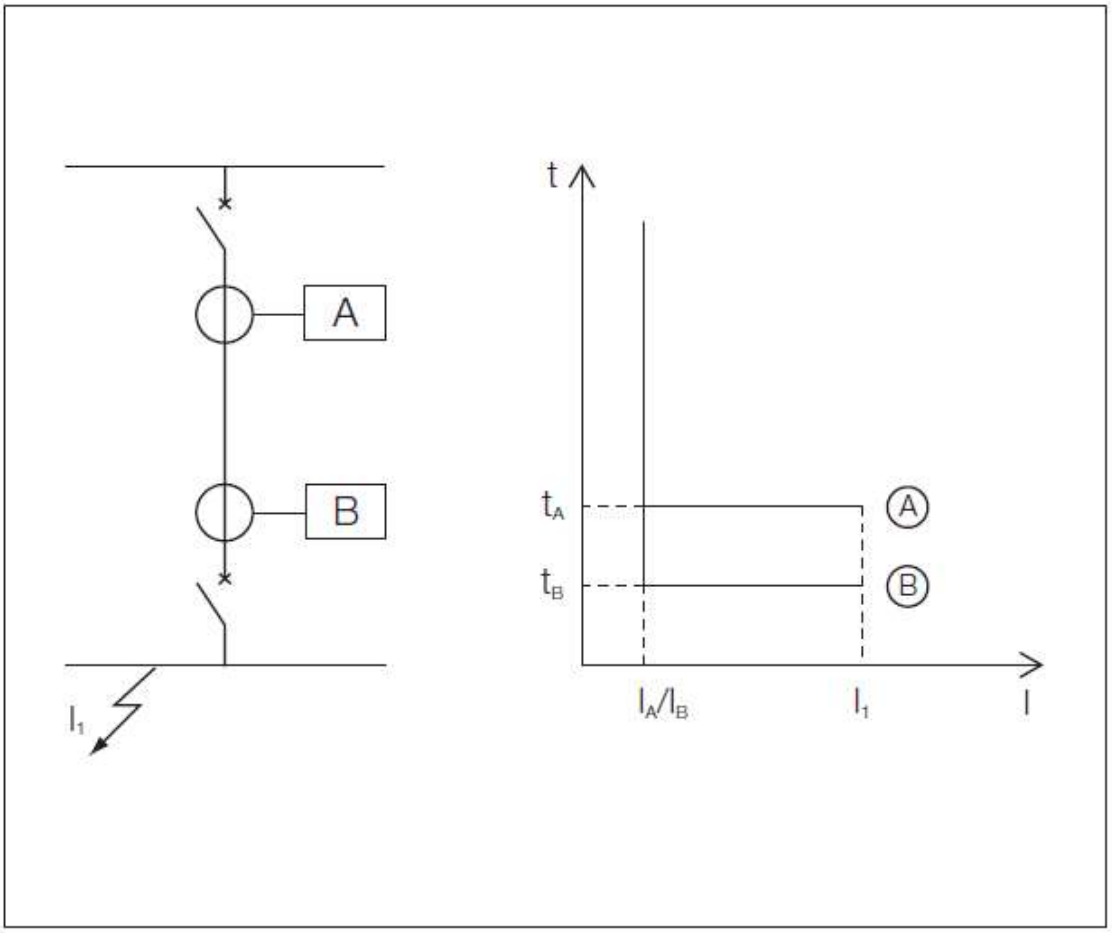
$$\Delta T \geq T_c + t_r + 2dT + m \tag{3.97}$$

T_c; Alt kademedeki rölenin ark ve kesici açma dahil toplam açma süresi

t_r; Arıza anında enerjilenen üst kademedeki kesicinin arızanın temizlenmesinden sonraki çalışma süresi

m; Güvenlik payı

dT; Zaman gecikmesi



Şekil 3. 30 Zaman temelli seçicilik

Yedekli koruma sağlanır. A rölesinin açmaması durumunda B rölesi devreyi açar. Uygulaması basittir.

Çok sayıda rölenin sıralı çalışması gereken durumlarda kaynağa yakın olanlarda uzun açma süreleri ile karşılaşılabilir [41] [42].

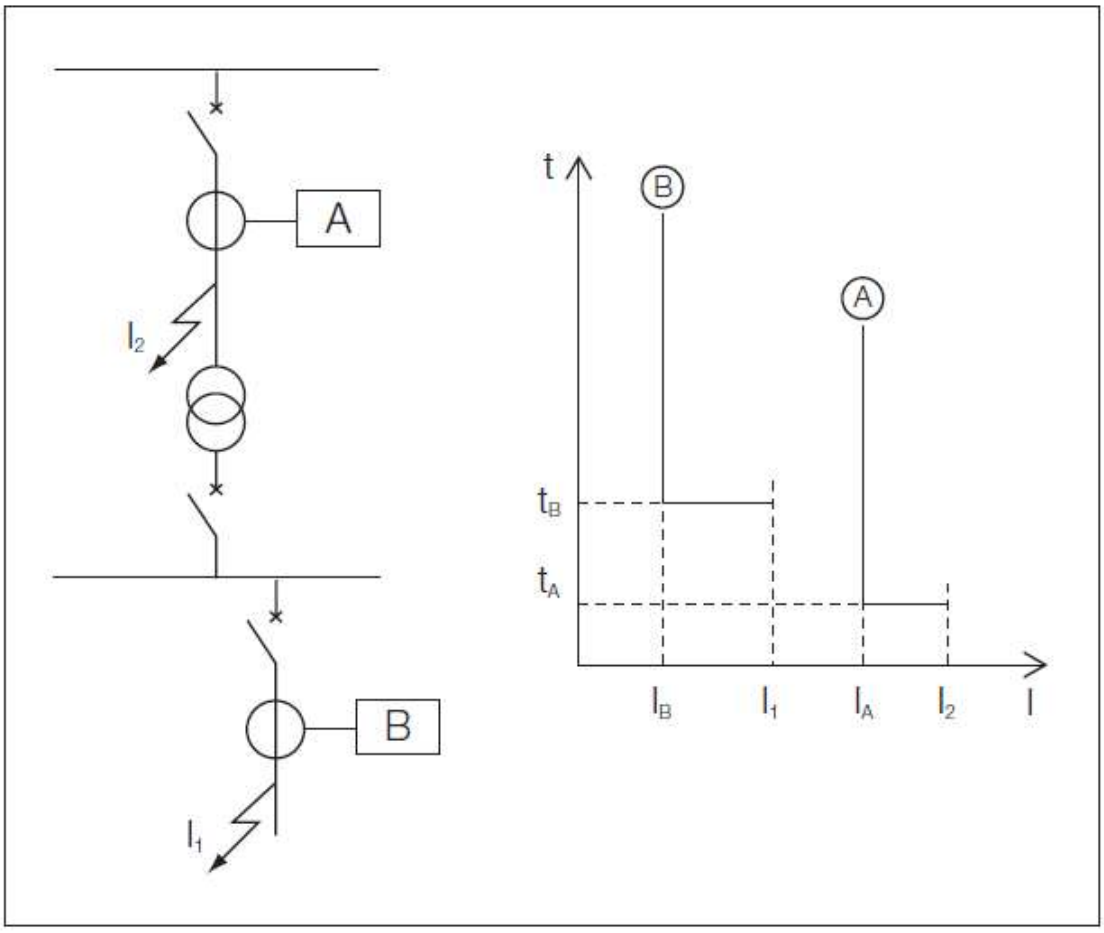
3.4.2 Akım Temelli Seçicilik

Kaynaktan uzaklaştıkça kısa devre akının azalması prensibine dayanır. A rölesinin minimum açma akımı B rölesinin maksimum açma akımından büyük olmalıdır.

Basit, ekonomik ve hızlı koruma sağlarlar. Sadece algılayabildikleri kısa devre akımlarına duyarlıdırlar.

Fakat bu röleler yedekli koruma sağlamazlar. B rölesinin çalışmaması durumunda A rölesinin minimum açma akımından daha düşük kısa devre akımlarında bu röle arızayı algılayamayacak ve dolayısıyla enerjilenmeyecektir.

Kısa devre akımlarının genliklerine bağlı olduğundan uygulanması zordur [41] [42].



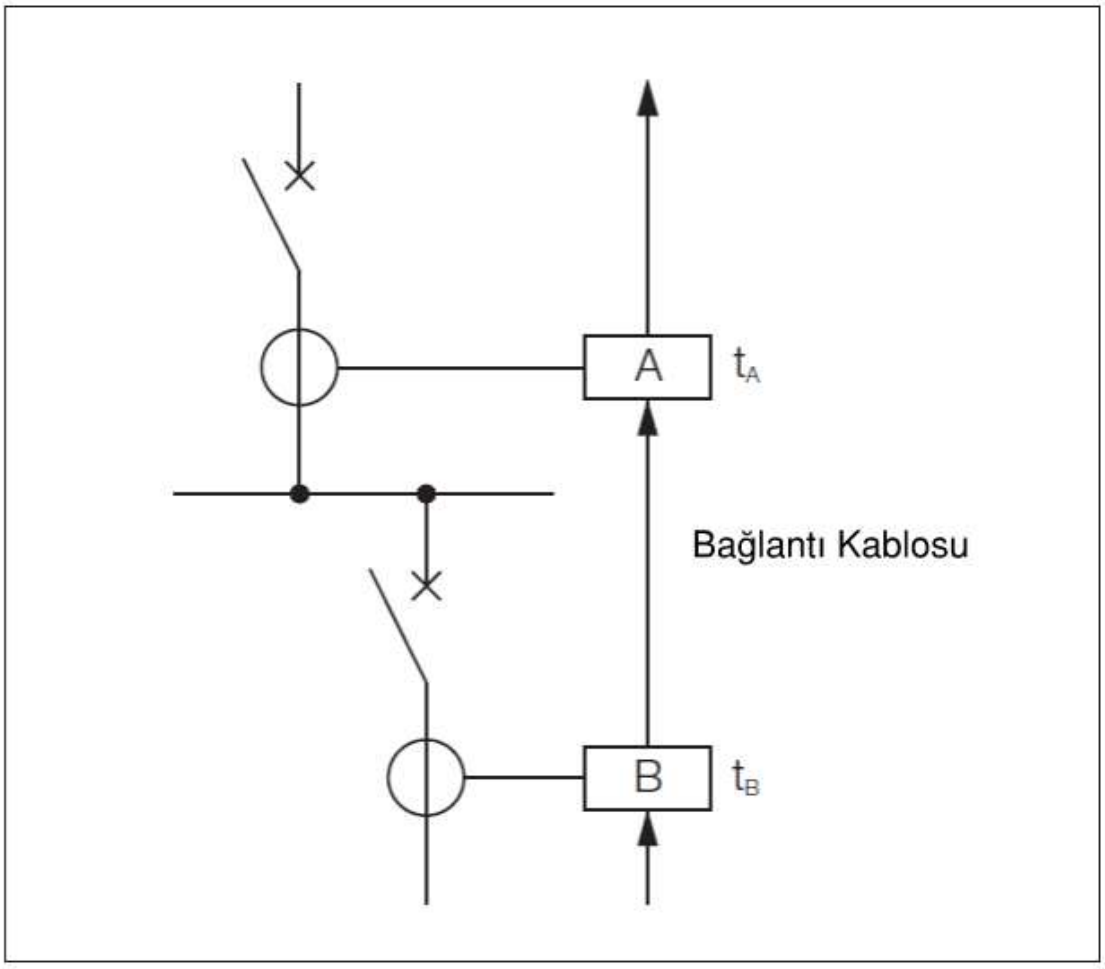
Şekil 3. 31 Akım temelli seçicilik

3.4.3 Mantıksal Seçicilik

Röleler arasında haberleşme sistemi kurularak seçicilik sağlanır. Açma sürelerini oldukça azaltır. Bir arıza durumunda enerjilenen röle üst kademedeki diğer rölelere açma durdurma sinyali iletir.

Açma süreleri arızanın nerede olduğuyla ilgili değildir. Bu sayede çok kademeli koruma sistemlerinde toplam açma sürelerinin artmasına gerek olmadan kullanılabilir.

Fakat bu seçicilik uygulamasında röleler arasında haberleşmeyi sağlayan bir kablolama gerekmektedir. Bu da uzak lokasyonlara konumlanmış dağıtım sistemlerinde uygulama zorluğu yaratmaktadır [41] [42].

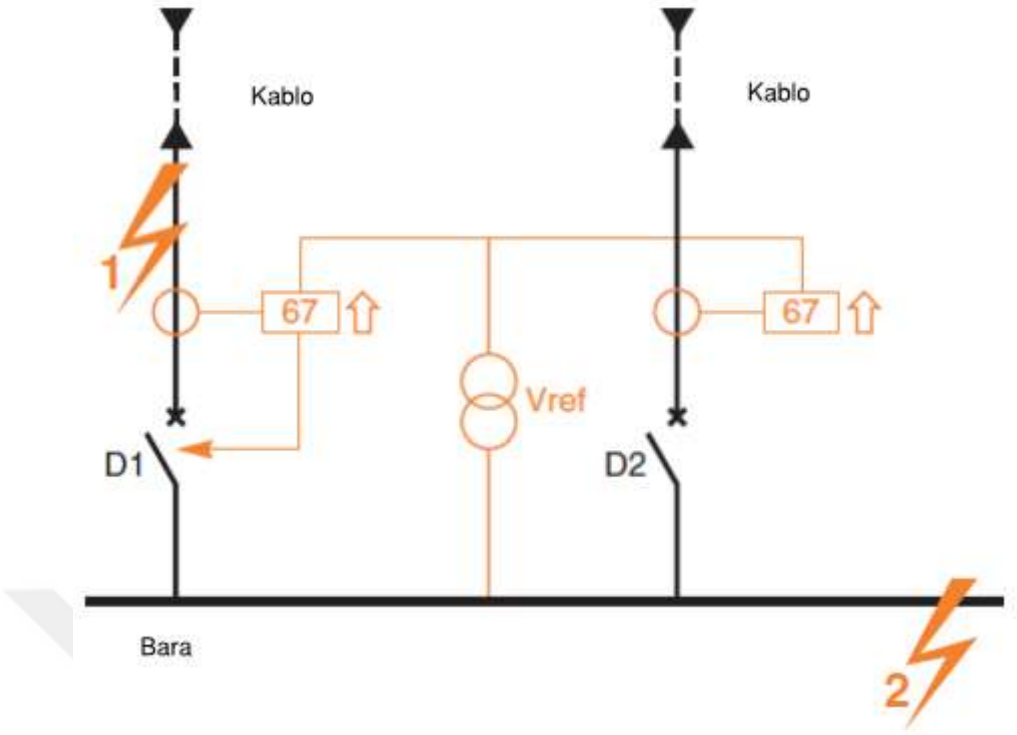


Şekil 3. 32 Mantıksal seçicilik

3.4.4 Yönlü Aşırı Akım Röleleri ile Seçicilik

Kapalı ring dağıtım sistemlerinde ve aynı anda çalışan paralel kaynak içeren dağıtım sistemlerinde sıklıkla kullanılırlar. Uygulamaları basittir ve yaygın kullanımlıdırlar.

Şekil 3. 33 de örnek bir uygulaması gösterilmiştir. 1. kısa devrede sadece D1 rölesi arızayı görecektir [41] [42].



Şekil 3. 33 Yönlü seçicilik

3.4.5 Diferansiyel Röle ile Seçicilik

Koruduğu ekipmanın giriş ve çıkış akımı arasında genlik ve faz farkı olması durumunda açma sinyali üretirler. Sadece kendi korudukları bölümde oluşan arızalara karşı duyarlıdırlar. Dış zonlardaki arızaları algılayamazlar. Bu sebepten birbirleriyle seçicidirler.

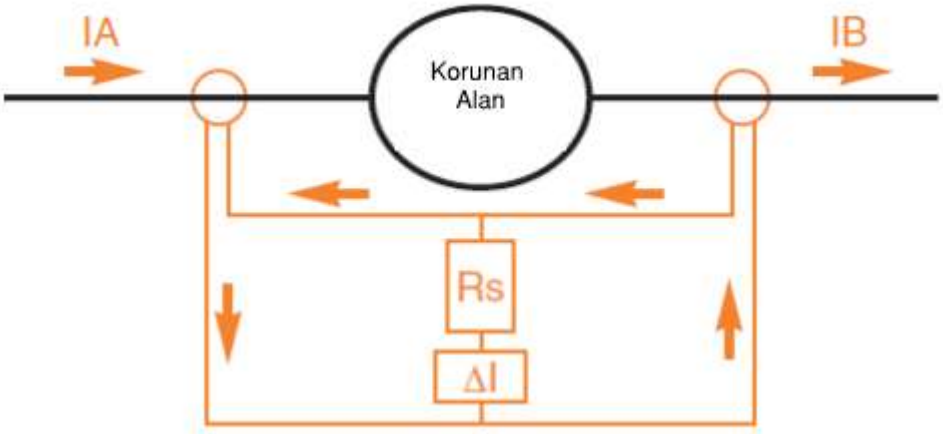
Diferansiyel rölenin sağlıklı çalışabilmesi için tasarımda aşağıdakilere dikkat edilmesi gerekmektedir;

- Transformatör enerjilendirme (in-rush) akımları
- Korunan hattın kapasitans kayıpları
- Akım transformatörlerinin doyuma gitmesi

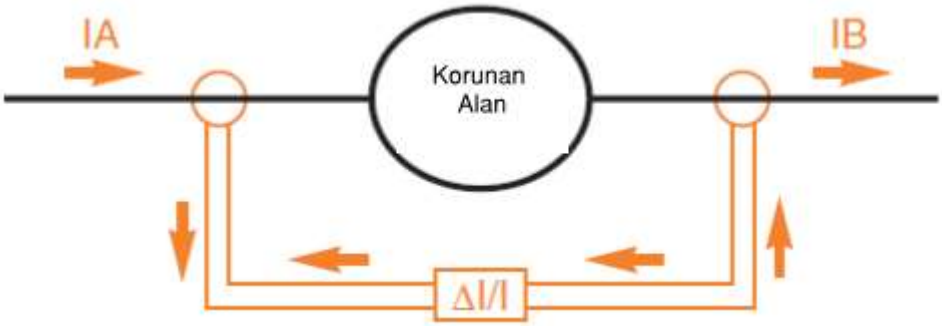
Bu durumlar dikkate alınmaz ise diferansiyel röle istenmeye açmaya sebep olabilir. İki tip uygulaması mevcuttur. Bunlar empedans üzerinden fark koruması ve oransal fark korumasıdır [41] [42].

Empedans üzerinden sağlanan korumada bir direnç kullanılır. Şekil 3. 34 de görüldüğü üzere bu direnç röleye seridir. Direncin amacı korunan bölge dışında meydana gelen

yüksek kısa devre akımlarının akım transformatörlerde doyuma sebep olmasını engellemektir.



Şekil 3. 34 Empedans üzerinden diferansiyel koruma



Şekil 3. 35 Oransal diferansiyel koruma

3.4.6 Kombine Seçicilik

Birden çok seçicilik yönteminin beraber kullanılması ile elde edilir.

Bunlardan bazıları;

- Akım + zaman
- Mantıksal + zaman
- Zaman + yönsel
- Diferansiyel + zaman

3.5 Dağıtık Üretim Kaynaklarının Elektriksel Koruması ile İlgili Çalışmalar

Dağıtık üretim kaynaklarının kullanıldığı elektrik dağıtım sistemlerinin arıza analizi ile ilgili uluslararası alanda birçok akademik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların genellikle üç ana alana odaklanmıştır.

-İletim sistemlerinde DÜK kullanımı. [43] [44] [45] bu çalışmalara örnektir.

-Tek bir dağıtık üretim kaynağının kısa devre akım katkısı. [12] [13] [14] [16] [17] [18] bu çalışmalara örnektir.

-Adaptif koruma röleleri, düşük genlikli kısa devre akımlarının algılanması, mikroşebekelerde arızanın lokasyonunun tahmini vb. araştırma geliştirme faaliyetleri içerisinde değerlendirilecek ve henüz yaygın ticari kullanımı olmayan çalışmalar. [5] bu çalışmaları konu alan bir literatür özeti sunmaktadır. Bu çalışmaların içerisinde en çok konu alınan ve öne çıkan başlıklar adaptif koruma röleleri ile gerilim temelli yeni koruma yöntemleridir. Adaptif röleler arızayı çeşitli yöntemler ile algılayarak (gerilim düşümü, empedans farkı, sıfır bileşen vb.) bir haberleşme alt yapısı ile dağıtım sisteminin yeni arıza karakteristiğine göre akım değerlerini değiştirirler. Bu sayede değişikliklere adapte olabilmektedirler. Bu röleler ile ilgili arızayı tanımlama ve haberleşme algoritmaları araştırma geliştirme faaliyetleri içerisinde devam etmektedir. Diğer önemli gelişmeler gerilim bazlı koruma sistemleri ile ilgilidir. Harmonik ve dq ekseni bilgileri kullanılarak sağlanan koruma yöntemleri en yaygınlarıdır. Birinci yöntem arıza anında ortaya çıkan toplam harmonik bozulma karakteristiğinin arıza olmayan duruma göre farklı olması prensibine dayanır. Diğeri ise rölelerin geriliminin dq eksen değerini kendi koruma zonlarında sürekli takip edip diğer rölelerinkileri ile karşılaştırması prensibine dayanır. Bu yöntem için haberleşme alt yapısı gerekmektedir.

Alçak gerilim ve orta gerilim dağıtım tesisleri en yaygın sık ve yaygın şekilde kurulan tesislerdir. Ticari olarak da benzer oranda elektrik sektöründe büyük bir hacim kaplamaktadır. Dağıtık üretim kaynaklarının yoğun olarak kullanıldığı bu tip tesisleri çalışma alanı olarak alan ve mevcut ticari koruma röleleri ile gerçekleştirilen koruma analizleri oldukça sınırlıdır. Buna benzer yapılan sınırlı çalışmalarda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır [4].

-Kuzey Amerika ve Avrupa standartlarında ada çalışmaya karşı farklı yaklaşmaktadır. Kuzey Amerika standartları ada çalışmaya karşı ile Avrupa standartlarında mümkün oldukça teşvik edilmektedir. (IEC 61850 gibi)

-Kesici IED (intelligient electronic device) lerinin akım kademelerinin ayar imkanı vardır. Bu IED' lerin GOOSE (generic object oriented subjected event) mesajları ile ayar kademeleri değiştirilerek farklı kısa devre akımlarında koruma sağlanabilmektedir. Fakat bu koruma sistemi için oldukça büyük bir haberleşme yatırımı gerekmektedir. Ayrıca alçak gerilim dağıtım sisteminde her ne kadar 100A e kadar IEC61850 ile uyumlu devre kesiciler geliştirilmiş olsa da hala birçok devre kesici haberleşme altyapısına sahip değildir.

-Yönlü koruma röleleri hatasız devrelerde meydana gelebilecek istenmeyen açma durumlarını önlemek için kullanılabilirler.

-Elektrik şebekesindeki birçok arıza kısa süreli ve kendiliğinden sönümlenebilmektedir. Bu sebepten otomatik tekrar kapamalı kesiciler şebekeyi sisteme tekrar bağlamak için sıklıkla kullanılır. Bu tekrar kapama prosesi şebeke ile şebeke olmadan ada çalışan dağıtım sisteminin senkronizasyon problemine sebep olur. Bu sebepten Kuzey Amerika standartlarında şebeke enerjisi kesildiği anda ada çalışmanın önlenmesi istenmektedir.

-Ada çalışmayı önlemek için düşük ve aşırı frekans röleleri kullanılır.

-DÜK' lerin şebeke ile tekrar senkronize olması anında transformatörlerde yüksek inrush akımları meydana gelir. Bu istenmeyen kesici açmalarına sebep olabilir. Bu durumu engellemek için inrush akımından kaynaklanan 2.harmoniklere duyarsız kesiciler kullanarak kesicilerin istenmeyen açma yapması önlenir.

BÖLÜM 4

HİBRİT ENERJİ DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KORUMA VE HABERLEŞME STANDARTLARI

4.

4.1 IEC 61850

IEC 61850 standardı ilk olarak 1995 senesinde yayımlanmıştır. İlk yayın tarihinde bugüne kadar IEC mühendisleri tarafından sürekli olarak geliştirilmektedir. IEC 61850 standardının başlıca amaçları aşağıda sıralanmıştır;

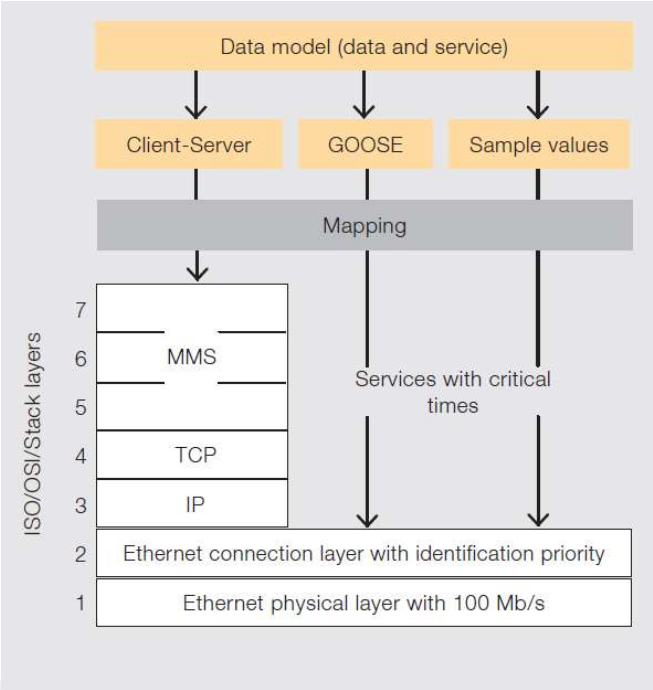
- Elektrik dağıtım sistemlerinde 1995 yılına kadar birçok farklı haberleşme protokolü kullanılmaktaydı. Her üretici farklı protokoller kullanıyor bu da farklı markaya ait ürünlerin beraber kullanılıp haberleşmesini engelliyordu. Bu sorunun üzerinden gelmek ve elektrik dağıtım sisteminde tek bir haberleşme protokolünün uygulanmasını sağlamak amacıyla yayınlanmıştır. Bugün bu haberleşme protokolüne sahip farklı markalara ait ürünler güvenli bir şekilde beraber çalıştırılabilmektedir.
- Karşılıklı haberleşme ve çalışabilme imkanı verir.
- Dağıtım sisteminde kullanılacak ekipmanların ortak bir haberleşme test prosedürüne tabi olmasını sağlar.

IEC 61850 protokolü geliştirilebilir yapıya sahiptir. Bu sebepten kapsamı ve uygulama alanı arttıkça ilgili standartları da benzer şekilde geliştirilmiştir. Bugüne kadar IEC 61850 haberleşme sisteminin farklı alanlarını konu alan 10 bölüm yayınlanmıştır.

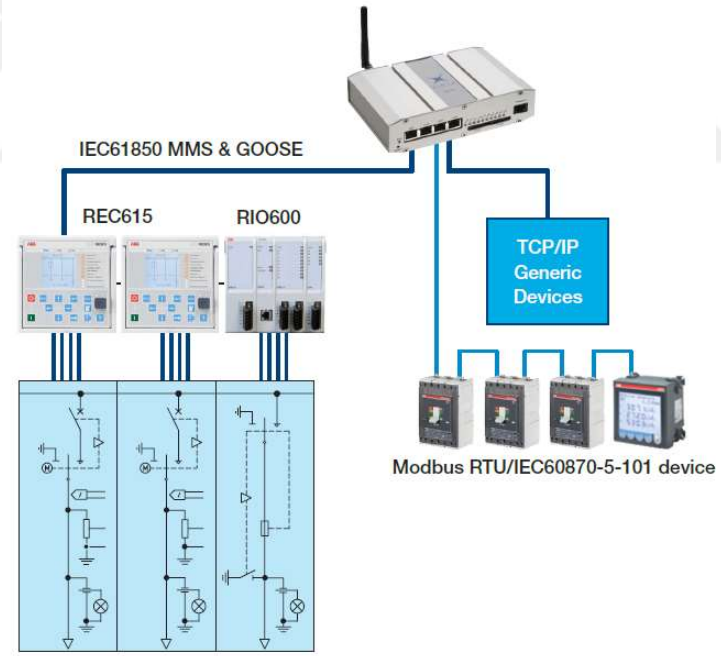
Veri modeli ile haberleşme sistemi ayrılmıştır. Her bir cihaz kendi kimlik bilgilerini içeren LN olarak kısaltılan mantıksal düğümlere sahiptir. Bunlar o ekipmanın o andaki durumuna göre güncellenir. Örneğin IED (intellegient electronic device)' nin kontrol ettiği devre kesicinin şalter konum bilgilerini içeren mantıksal düğüm o kesicinin konumu değiştiği bilgisini IED' ye aktaracaktır. IED' ler ISO/OSI katmanlı haberleşme sisteme bağlıdır. Birbirleriyle ve ana kontrol sistemi ile şekil 4.1' de gösterildiği üzere haberleşirler. Bu sistem klasik kablolu sistemlere göre (örneğin mod bus ile) çok daha hızlıdır.

IEC 61850 haberleşme sisteminin en önemli özelliklerinden biri GOOSE olarak isimlendirilen mesajlaşma sistemidir. Açılımı generic object oriented system events tir. GOOSE mesajlaşma özelliği sayesinde IED' ler birbirleri ile çok hızlı iletişim kurarlar. Bunu sağlayan en önemli etken GOOSE' un ISO/OSI yığınsal haberleşme sisteminde Ethernet bağlantı katmanı olan 2.katmanı kullanmasıdır. Bu sayede röle ayar kademelerinin değişimi, ark anında seçiciliği sağlamak amacıyla bir önceki rölenin açtırma yapmasını engelleme vb. gibi birçok operasyon kolaylıkla yapılır.

Özellikle dağıtık üretim kaynaklarını içeren ve hata akımının yönü ile genliğinin önemli oranda değiştiği elektrik dağıtım sistemleri bu haberleşme sistemi ile donatılmalıdır [46] [47].



Şekil 4. 1 IEC 61850 haberleşme şematiği



Şekil 4. 2 örnek IEC 61850 haberleşme yapısı

4.2 IEC 62898

IEC (International Electrotechnical Commmision) tarafından IEC 62898 mikroşebeke standartları yayımlanmaya başlanmıştır. Üç seriden oluşacak bu standardın amacı mikroşebekeler ile ilgili planlama, işletme, kontrol ve koruma sistemlerini standartlaştırmaktır. 2017 senesinde ilki yayınlanan standardın ikinci ve üçüncü serileri ise 2018 senesi içerisinde yayınlanması beklenmektedir. Standardın isimleri ve yayınları;

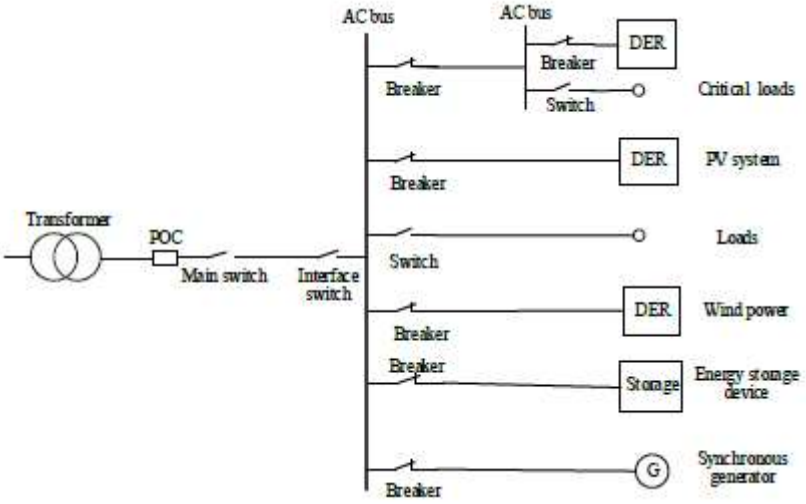
- IEC 62898-1:2017 Microgrids- Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification
- IEC 62898-2 – Microgrids – Part 2: Guidelines for Microgrid Operation (and Control); 2018 yılı içerisinde yayınlanacaktır.
- IEC 62898-3 – Microgrids – Part 3: Microgrids- Technical Requirements – Protection; 2018 yılı içerisinde yayınlanacaktır.

IEC 62898 standardı mikroşebekeri şebekeden izole ve izole olmayan şekilde ikiye ayırır.

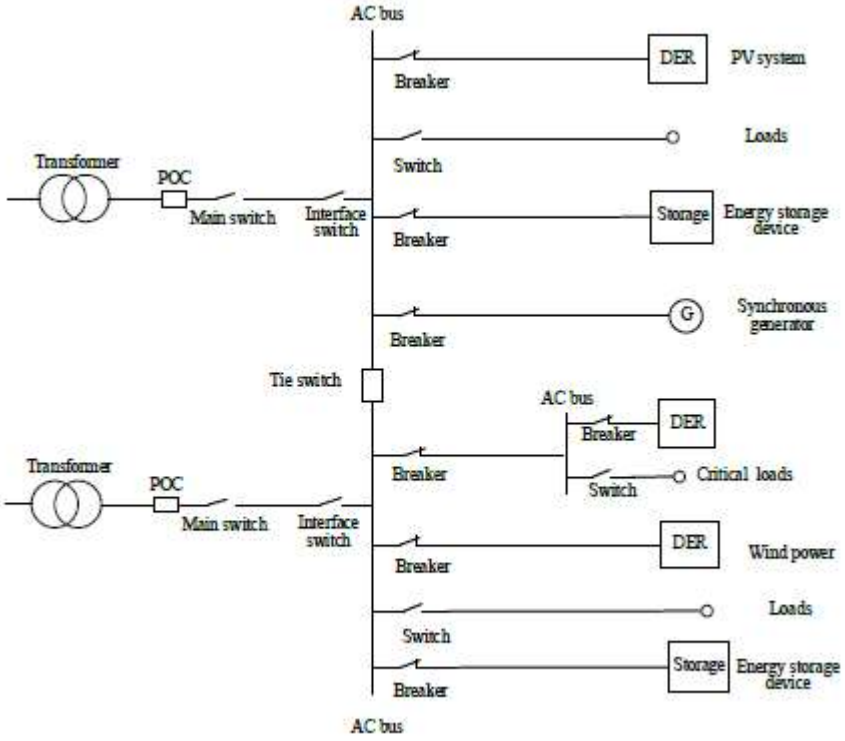
İzole mikroşebeker; birçok yük ve DÜK ten oluşan dağıtım gerilimi seviyesindeki elektrik dağıtım şebekeleridir. Enterkonnekte şebekelere bağlanmazlar.

İzole olmayan mikroşebeker; Enterkonnekte şebeke ile paralel çalışabilen mikroşebekelerdir. Enterkonnekte şebekeye bağlı ve ada olarak iki şekilde çalışabilirler.

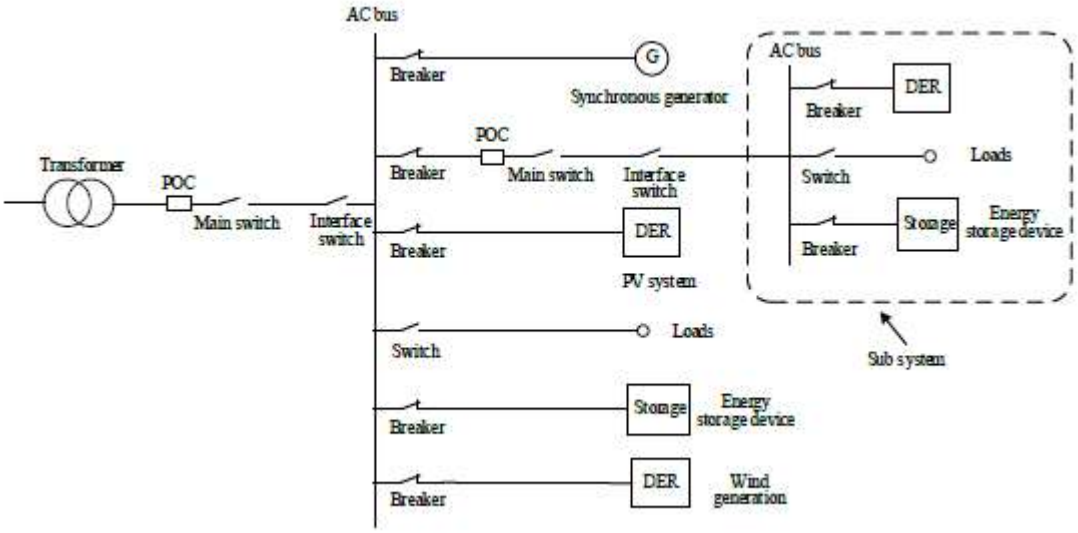
İzole olmayan mikroşebeker için IEC 62898 de sayfa 19 ve 20' de temsil edilen bara topolojileri;



Şekil 4. 3 Tek baralı sahip dağıtım prensibindeki mikroşebeke



Şekil 4. 4 Çok baralı dağıtım prensibindeki mikroşebeke



Şekil 4. 5 Çoklu kademeli baralı dağıtım prensibindeki mikroşebeke

IEC 62898-3 standardı bahsedildiği üzere henüz yayınlanmamıştır. Bu bölümde standardın taslak versiyonundaki tanımlar kullanılmıştır.

Koruma gereksinimleri izole olmayan ve izole mikroşebekeler için ayrı tanımlanmıştır.

İzole olmayan mikroşebekerde koruma gereksinimleri;

İzole olmayan mikroşebekelerde en önemli öncelik arızanın mikroşebekenin içinde ya da dışında gerçekleştiğinin tespitidir. Dış arızalarda şebeke bağlantı röleleri arızayı açarak mikrobeşeyi oluşturan yük ve DÜK' lerin güvenliğini sağlar. Uygun kontrol ve röle ayarları ile ada çalışmaya devam edilebilir. Mikroşebekeyi oluşturan ekipmanların koruması;

a. DÜK Koruması;

- Diferansiyel koruma rölesi; ana koruma ekipmanı olarak kabul edilir.
- İnverter üniteleri için yönlü güç akışı koruması
- Gerilim ve frekans kaybı rölesi
- Aşırı yük röleleri koruması; Koruma yedekliliği sağlamak için kullanılır.
- Harmonik izleme ve analizi. Anahtarlama harmonikleri ile arıza harmonikleri birbirleri ile farklıdır. THD nin analizi ile DÜK ün bir hata akımına maruz kaldığı anlaşılabilir.

b. Elektrik enerji depolama birimi

- Enerji depoluyorken hat koruması ile benzer şeklinde
- Depoladığı enerjiyi sisteme verirken DÜK koruma ile benzer şekilde

c. Transformatör koruması

- Diferansiyel koruma rölesi
- Yıldız toprağı ve nötr hatları üzerinden toprak kaçağı koruması
- Yönsel aşırı akım rölesi ve harmonik analizi. Bu röle ve harmonik analizi yedekli koruma olarak sağlanır. Ana koruma ekipmanı değildirler.

d. Hat koruması

- Enterkonnekte şebeke ile paralel veya ada çalışma moduna göre röle ayarlar değişmelidir. Bu haberleşme ve kontrol sistemi IEC 61850 haberleşme protokolü ile uyumlu röleler ile sağlanır.
- Diferansiyel koruma rölesi
- Aşırı akım koruma rölesi; ana koruma olarak değil yedeklilik sağlamak amacıyla kullanılırlar.

- Asimetrik faz toprak kısa devrelerinde sistemde görülen sıfır bileşen akımının tespiti
- Sıfır bileşen gerilimlerin tespiti; nötr noktası topraklanmamış sistemlerde hattın izolasyon korumasını sağlar.
- Harmonik izleme ve analizi; Hattın harmoniğinde aşırı değişimler olduğu ve diğer hatlara göre aşırı harmonik gözlemlediği zaman açma sinyali iletilir.
- Otomatik tekrar kapama rölesi

e. Enterkonnekte şebeke ortak bağlantı noktası

- Diferansiyel koruma rölesi
- Yönlü aşırı akım koruma rölesi; Şebekeye ve kaynağa doğru hata akımı farklı olacağından yönlü seçilmelidir.
- Ara yüz koruma röleleri; Gerilim-frekans-aşırı yük röleleri
- Ters güç rölesi; DÜK ler sadece iç ihtiyaç için ise şebekeye enerji akışını önlemek için
- Senkronizasyon rölesi

İzole mikroşebekerde koruma gereksinimleri;

İzole olmayan sistemden farklı olarak bütün DÜK' ler sürekli olarak V-f bara olarak çalıştırılırlar. Enerji depolama üniteleri yük-talep dengesini sağladıkları için sürekli olarak iki yönlü akım durumunda da korunabilmelidir.

Enterkonnekte ile bağlantısı olmadığı için bu korumalara ihtiyaç yoktur. Hat koruma rölelerinin akım koruma ayarlarının yük-kaynak senaryosuna uygun olarak değiştirilmesi gerekmektedir.

Diğer koruma sistemleri izole olmayan sistemler ile benzerdir. [46] [47].

4.3 ENA

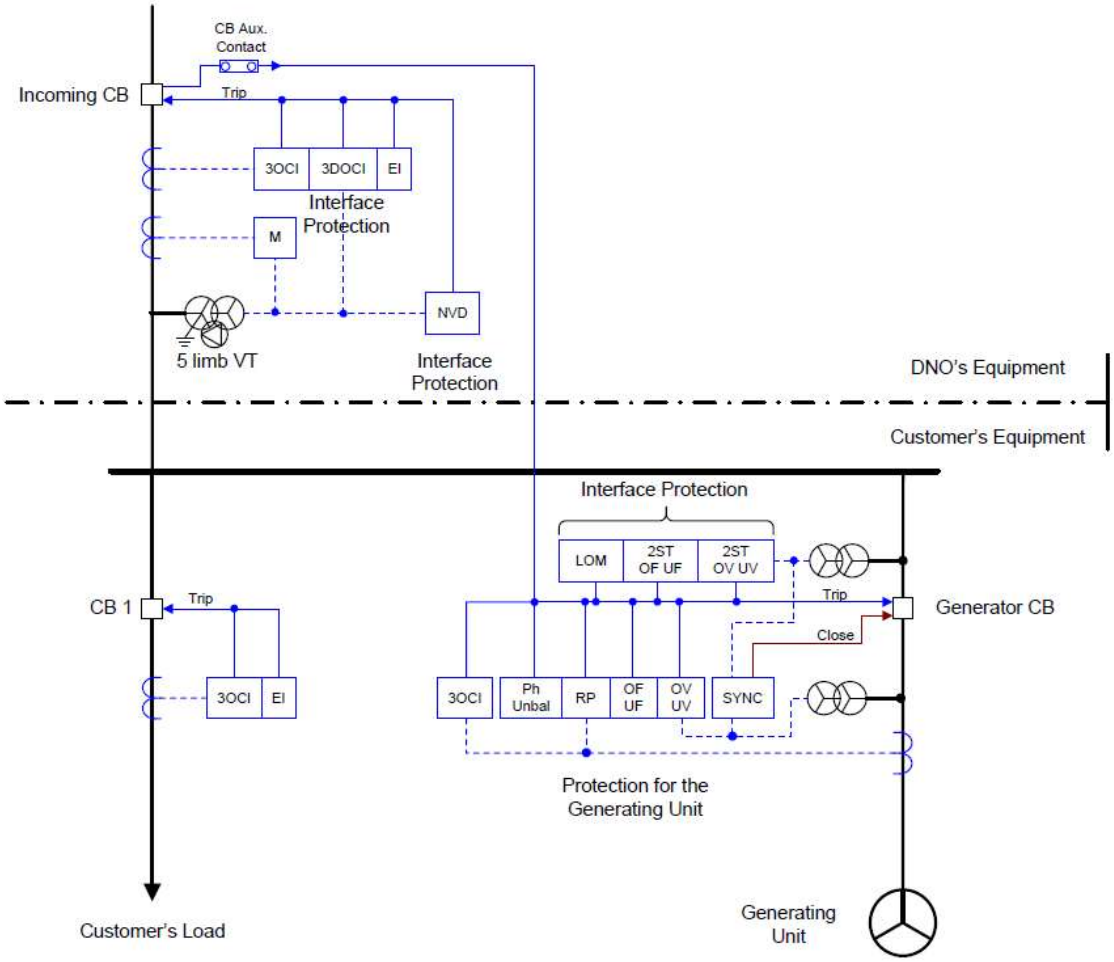
ENA electrical network association kelimelerinin kısaltmasından oluşur. Birleşik krallıkta lisans sahibi gaz ve elektrik üreticileri firmaların kurduğu bir iştiraktir. Yayınladığı yayınlar ile dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye nasıl bağlanacağı ve korunması gerektiği

konularda önerilerde bulunur. ENA tarafından üretilen yayınlar baz alınarak koruma röleleri üretilmiştir. DÜK' lerin şebeke entegrasyonu ve koruma ile ilgili ENA tarafından yayınlanan yayınlar;

- Engineering Recommendation G83/2 'Recommendations for the connection of Small-scale Embedded Generators (up to 16A per phase) in parallel with Public Low-Voltage Distribution Networks'.
- Engineering Recommendation G59/3, 'Recommendations for the connection of Embedded Generating Plant to the Regional Electricity Companies' Distribution Systems

G59 rölesi olarak adlandırılan ve Birleşik Krallıkta sıklıkla kullanılan röle bu yayınlar dikkate alınarak üretilmiştir. Temel amacı kontrolsüz ada geçişi önlemektir. G59 rölesi ENA nın tavsiye ettiği parametreleri baz alarak şebekenin gerilim ve frekansını izler. Şebekeden sağlanan enerjide kesinti görüldüğü durumda kesiciye açma sinyali ileterek DÜK' ü devre dışına çıkarır. Böylece kontrolsüz ada çalışmanın önüne geçer. G59 röleleri gerilim, frekans, ROCOF (Rate of change of frequency – frekans değişim oranı rölesi) ve faz açısı izleme ve koruma özelliklerine sahiptir. [51] [52].

ENA G59/3'den sayfa 70 örnek yüksek gerilim jeneratör şebeke ile paralel çalışma koruma örneği;



Şekil 4. 6 ENA G59/3 örnek senkron jeneratör koruma şeması

4.4 Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik

Bu yönetmelik üretim lisansı almaya gerek olmayan 1MW gücünden daha düşük güçteki dağıtık üretim kaynaklarının şebeke entegrasyonu ve koruması ile ilgilidir. İlgili standarttan kopyalanan korumayla ilgili gereklilikler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. [53]

AG seviyesinden bağlanan üretim tesisleri için koruma ayarı sınır değerleri.

Parametre	En Uzun Temizleme Süresi a	Açma Ayarı
Aşırı Gerilim (ANSI 59)	0,2 s	230 V + %15
Düşük Gerilim – Kademe 1 (ANSI 27)	1,5 s	230 V – (%15…%20) b
Düşük Gerilim – Kademe 2 (ANSI 27)	0,2 s	230 V – (%50…%75) b
Aşırı Frekans (ANSI 81/O)	0,5 s	51 Hz
Düşük Frekans (ANSI 81/U)	0,5 s	47 Hz
Vektör Kayması (ANSI 78)c	0,2 s	(6o…9o) b
ROCOF (df/dt) (ANSI 81R) c	0,2 s	(1…2,5) b Hz/s

a) Arızayı tespit ve kesici açma süresi dâhildir.

b) Verilen aralıkta uygun değer İlgili Şebeke İşletmecisi tarafından istenebilir ve ayarlanabilir.

c) Jeneratör, adalanma durumunda çalışmaya elverişli teknik özellikte ise ilave olarak bu koruma rölelerinden en az biri kullanılmalıdır.

Şekil 4. 7 Lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmelik AG seviyesindeki tesisler için koruma sınır değerleri

Parametre	Temizleme Süresi	Açma Ayarı [a]
Aşırı Gerilim (ANSI 59) –Kademe 1	0,2 s	V≥ 120
Aşırı Gerilim (ANSI 59) – Kademe 2	1,0 s	110 < V < 120
Düşük Gerilim – Kademe 1 (ANSI 27)	2,0 s	50 ≤ V < 88
Düşük Gerilim – Kademe 2 (ANSI 27)	0,2 s	V< 50
Aşırı Frekans (ANSI 81/O)	0,2 s	51 Hz
Düşük Frekans (ANSI 81/U)	0,2 s	47 Hz
Düşük Frekans (ANSI 81/U)	İlgili Şebeke İşletmecisi görüşüne uygun olarak 0,2–300 sn aralığında ayarlanabilir.	İlgili Şebeke İşletmecisi görüşüne uygun olarak 47–49,5 Hz aralığında ayarlanabilir.
Vektör Kayması (ANSI 78) [c]	0,2 s	(6o…9o) [b]
Frekans değişim Oranı (ROCOF) (df/dt) (ANSI 81R) [c]	0,2 s	(0,5…2,5) [b] Hz/s
Artık Gerilim (ANSI 59N) [d]	d	d

[a)] Gerilim ayarları anma geriliminin yüzdesi olarak verilmiştir.

[b)] Verilen aralıkta uygun değer İlgili Şebeke İşletmecisi tarafından ayarlanabilecektir.

[c)] İlgili Şebeke İşletmecisinin yapacağı etüt çalışmasına göre İlgili Şebeke İşletmecisi tarafından gerek görülmesi halinde bu korumalardan birisi istenebilir.

[d)] Topraklama sistemine bağlı olarak gerektiği durumda İlgili Şebeke İşletmecisi tarafından istenebilir. Statik jeneratörler için uygulanabilir değildir. Bu koruma talep edildiğinde, temizleme süresi ve açma ayar değerleri İlgili Şebeke İşletmecisi tarafından belirlenir.

Şekil 4. 8 Lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmelik YG seviyesindeki tesisler için koruma sınır değerleri

BÖLÜM 5

DAĞITIK ÜRETİM KAYNAKLARINI İÇEREN ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ ANALİZ PROGRAMLARI İLE YÜK AKIŞI-KISA DEVRE HESABI-KORUMA KOORDİNASYONU VE KARARLILIK ANALİZLERİ

5.

Bu bölümde ERACS ve ETAP güç analizi paket programları ile orta gerilim ve alçak gerilim seviyesinde dağıtık üretim kaynaklarını içeren örnek elektrik dağıtım sistemleri modellenmiş ve yük akışı-kısa devre hesapları-koruma koordinasyonu gerçekleştirilmiştir.

Sırasıyla orta gerilim ve alçak gerilim seviyesindeki dağıtım sistemleri modelleri alt başlıklarda açıklanacaktır.

Orta gerilim modeli ERACS ve ETAP güç sistem analizi paket programları ile simüle edilmiştir.

Alçak gerilim modeli ise ETAP programı ile modellenmiştir.

Öncelikle her bir modelde dağıtım sistemini oluşturan kaynaklar, iletkenler ve koruma röleleri tanımlanmıştır.

Ardından dağıtık üretim kaynaklarının şebeke ile paralel çalışma ve ada çalışma senaryoları ile çeşitli kısa devre senaryoları tanımlanmıştır.

Aşırı akım rölesi, yönlü aşırı akım rölesi, diferansiyel rölesi, gerilim temelli koruma, frekans temelli koruma ve arızayı kompanzasyonu gibi yöntemler ile bu çalışma senaryoları için koruma koordinasyonu yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak özet bir tablo halinde sunulmuştur.

5.1 ERACS ve ETAP Yazılımı ile Modellenen Orta Gerilim Seviyesinde Hibrit Bir Enerji Dağıtım Sisteminin Koruma ve Koordinasyon Analizi

ERACS yük akışı, hata, harmonik, koruma koordinasyonu, ark flaş ve geçici durum kararlılık analizlerinin yapılabildiği grafik ara yüzlü bir programdır. Küçük, orta ve yüksek boyuttaki güç sistemleri (10-50-100-300-500&1500 baralı versiyonları vardır) modellenebilir. 1999' da geliştirilmiş ve bugüne kadar özellikle Birleşik Krallık' ta birçok uygulamada kullanılmıştır.

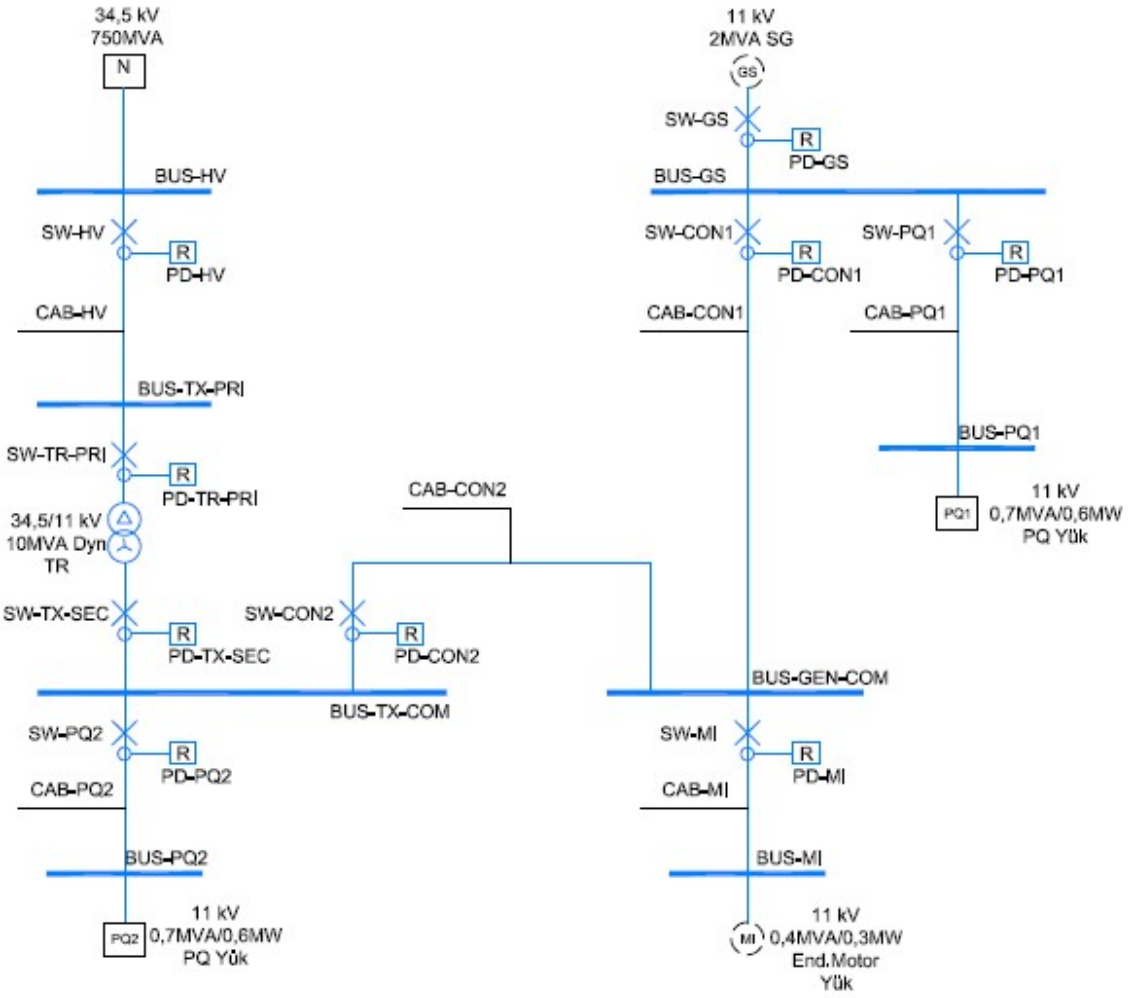
Başlıca uygulama alanları bina uygulamaları (havaalanları, raylı sistemler), üretim tesisleri, elektrik dağıtım ve iletimi, endüstri uygulamaları (çelik, petrokimya fabrikaları vb.) vb.dir [54].

5.1.1 Model Tanıtımı

ERACS yazılımı ile modellenen elektrik dağıtım şeması şekil 5. 1 de gösterilmiştir.

Örnek modelimiz şebeke, senkron jeneratör, IADÜK, transformatör, pasif PQ yükü ve endüksiyon motorundan oluşmaktadır.

Alt başlıklarda sırasıyla kaynaklar, yükler ve iletkenler ile çalışma senaryoları açıklanacaktır.



Şekil 5. 1 Simülasyonu gerçekleştirilen dağıtım sisteminin tek hat şeması

5.1.1.1 Enerji Kaynakları

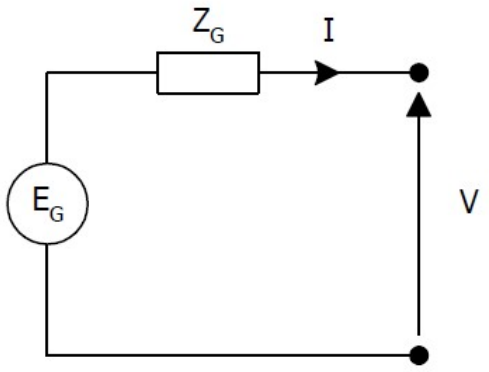
ERACS program ile modellediğimiz orta gerilim dağıtım sisteminde kullanılan kaynaklar aşağıdadır. Enterkonnekte elektrik şebekesi, senkron jeneratör ve inverter ara yüzlü sabit PQ kaynağı ERACS simülasyonlarında kullanılmıştır. Hangi kaynağın hangi çalışma senaryosunda devrede olduğu ilerideki bölümlerde belirtilmiştir.

- Enterkonnekte şebeke – GRID-1
- Senkron Jeneratör – GS-1
- İnvertör ara yüzlü kaynak – INV-PQ-01

a. Enterkonnekte Şebeke-GRID-1;

34.5kV gerilim kademesinde 750MVA üç fazlı kısa devre gücündedir.

- **Yük akış modeli şekil 5. 2' deki gibidir;**



Şekil 5. 2 Şebeke yük akış modeli

$$E_G = V + I.Z_G \quad (5.1)$$

$$F_3 = \sqrt{3}.|V_N|.|I_3| \quad (5.2)$$

$$Z_G = R_1 + jX_1 \quad (5.3)$$

- **IEC 60909' a göre empedanslar;**

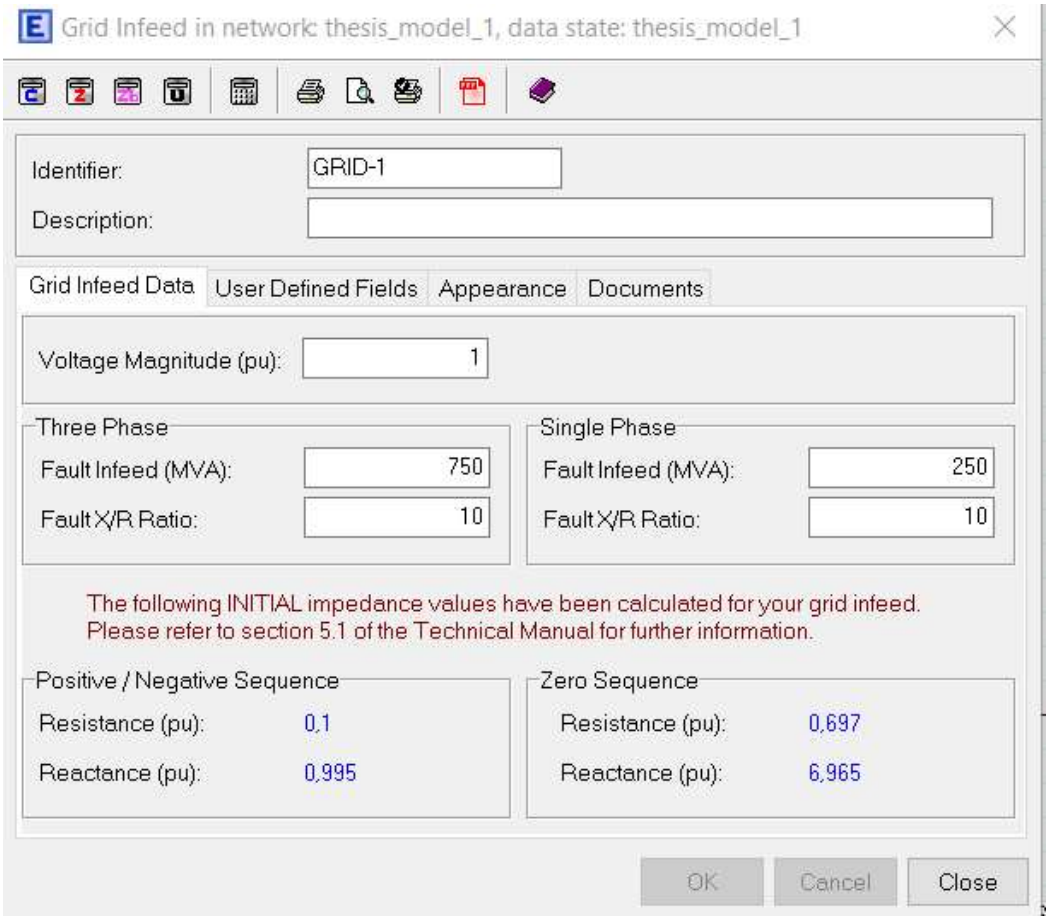
Çizelge 5. 1'deki empedans değerleri pozitif ve negatif empedans bileşenleri için kullanılabilir.

Çizelge 5. 1 Enterkonnekte şebeke empedansları

Nominal Gerilim (V_n)	Z_1	R_1	X_1
V_n =230V veya V_n =400V	1.00	R1=0,0995 . Z1	R1=0,995 . Z1
1kV< V_N ≤ 34.5kV	1.1	R1=0,0995 . Z1	R1=0,995 . Z1
35kV< V_N ≤ 230kV	1.1	R1=0,0995 . Z1	R1=0,995 . Z1
Diğer Gerilimler	1.05	R1=0,0995 . Z1	R1=0,995 . Z1

Sıfır bileşen empedansı (5.4) formülü ile hesaplanır;

$$Z_0 = Z_1.\left[3.\frac{F_3}{F_1} - 2\right] \quad (5.4)$$



Şekil 5. 3 ERACS şebeke verileri

b. Senkron Makinalar – GS-1

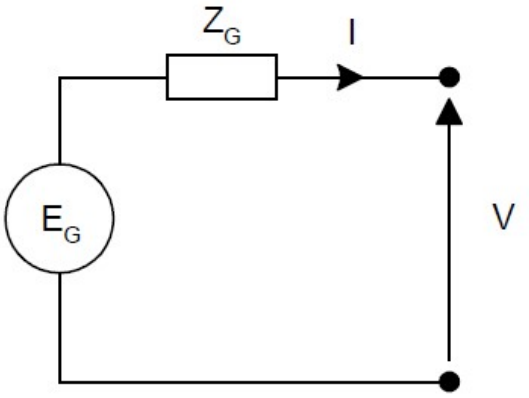
Koruma koordinasyonu yapılan elektrik dağıtım sistemi modelinde ERACS kütüphanesinde bulunan 11kV-2MVA-1.6MW nominal gücünde senkron jeneratör kullanılmıştır. Bu jeneratör faz-toprak ve iki faz toprak kısa devre akımlarının, üç faz kısa devre akımından daha az olmasını sağlamak için yıldız noktasından iki ohm değerindeki direnç ile topraklanmıştır.

ERACS programında iki farklı senkron jeneratör modeli bulunmaktadır. Bunlar basit gerilim-empedans modeli ile Park eşitliği modelidir. Gerilim-empedans modeli çok daha az bilgi gerektiren ve basit bir modeldir. Yük akış analizlerinde bu modelin tercih edilmesi kolaylık açısından daha uygundur.

Park modeli ise daha fazla bilgi gerektirir ve dq dönüşümü ile ifade edilir. Bu modelde otomatik gerilim regülatörlerinin kullanılması mümkündür. Aynı doğrultuda geçici durum analizi de Park modeli kullanılarak gerçekleştirilir [55].

- **Yük akış modeli**

Senkron jeneratörler yük akış analizinde şekil 5. 4' deki basit model ile ifade edilirler.



Şekil 5. 4 Senkron makine yük akış modeli

$$E_G = V + I.Z_G \tag{5.5}$$

$$Z_G = R_1 + jX_1 \tag{5.6}$$

Senkron makinalarda iç empedans kısa devre analizinde oldukça önemlidir. Fakat yük akış analizinde bu empedansın önemli bir etkisi yoktur. Pozitif bileşen sub-transient empedansı güç akışı modelinde senkron makina empedansı olarak kullanılabilir.

Senkron makinalar yük akış analizinde üç farklı çalışma durumunda olabilirler [55].;

- Salınım makinası; Güç sisteminde sabit güç veren jeneratörler tarafından karşılanamayan yükleri ve kayıpların ihtiyaçları salınım jeneratörleri tarafından karşılanır. Yük akış analizi yapmadan hangi yüklerin karşılanamayacağını bilmek mümkün değildir. Her güç sisteminde mutlaka bir salınım modunda çalışan jeneratör bulunmalıdır.
- PV makinası; Jeneratör sisteme belirli bir gerilim genliğinde ve açısında sabit aktif güç sağlar. Otomatik gerilim regülatörü kullanılması gereklidir. Makinanın karşılayacağı reaktif güç yük akış analizine göre belirlenir.

- PQ makinası; Jeneratör sabit aktif güç ve reaktif güç verir. Gerilimin genliği ve açısı otomatik gerilim regülatörleri ile belirlenir. Şebeke ile paralel olan jeneratörler PQ modunda çalıştırılırlar.

- **Arıza Empedansları**

Senkron makina arıza analizinde gerilim ve empedans modeli ile ifade edilebilir.

Pozitif bileşen empedansları;

$$Z_G = R_1 + jX_1 \tag{5.7}$$

(5.7) kararlı durum pozitif bileşen empedansı. Yük akışı analizinde de kullanılırlar.

$$Z_G = R_S + jX'_d \tag{5.8}$$

(5.8) transient durum pozitif bileşen empedansı

$$Z_G = R_S + jX''_d \tag{5.9}$$

(5.9) sub-transient durum pozitif bileşen empedansı

Negatif bileşen empedansı;

$$Z_G = R_2 + jX_2 \tag{5.10}$$

(5.10) negatif bileşen empedansı

Sıfır bileşen empedansı;

$$Z_G = R_0 + jX_0 + 3.(R_{neut} + X_{neut}) \tag{5.11}$$

(5.11) sıfır bileşen empedansını ifade eder.

- **IEC 60909 empedans modeli**

IEC 60909 standardına göre de empedanslar tanımlanırken senkron jeneratör gerilim ve empedans modelinde kabul edilir.

Pozitif bileşen empedansı;

$$Z_{1G} = K_G.Z_G = K_G.(R_G + jX_G) \tag{5.12}$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}}.\frac{c_{max}}{1+X''_d.\sin\emptyset_{rG}} \tag{5.13}$$

Çizelge 5. 2 IEC60909 gerilim faktörü

Nominal gerilim, U_n	Gerilim Faktörü, c_{max}
Alçak gerilim 100V ile 1000V arası 230V / 400V Diğer gerilimler	 1.0 1.05
Orta gerilim, >1kV 35kV a kadar	1.1
Yüksek gerilim, >35kV 230kV a kadar	1.1

Jeneratör stator direnci R_G IEC 60909 da aşağıdaki gibi ifade edilir;

$\mathrm{R_G} = 0.05\ \mathrm{X_d^{"}}\ \ \mathrm{U_{rG}} > 1\mathrm{kV}$ ve $\mathrm{MVA}\ \geq 100$ olan makinalar için

$\mathrm{R_G} = 0.07\ \mathrm{X_d^{"}}\ \ \mathrm{U_{rG}} > 1\mathrm{kV}$ ve $\mathrm{MVA}\ < 100$ olan makinalar için

$\mathrm{R_G} = 0.15\ \mathrm{X_d^{"}}\ \ \mathrm{U_{rG}} \leq 1000\mathrm{V}$ olan makinalar için

Negatif bileşen empedansı;

$$\mathrm{Z_{2G}} = \mathrm{K_G}.(\mathrm{R_G} + \mathrm{jX_2}) \tag{5.14}$$

Negatif bileşen empedansı;

$$\mathrm{Z_{2G}} = \mathrm{K_G}.(\mathrm{R_G} + \mathrm{jX_0}) \tag{5.15}$$

- **Geçici durum modeli ve analizi**

Senkron makinaların giriş bölümünde bahsedildiği üzere ERACS programı iki farklı senkron makina modeline sahiptir. Gerilim-empedans modeli ve Park modeli Her iki modelde de elektriksel dinamik eşitlikler bulunmaktadır. Fakat sadece Park modelinde mekaniksel dinamik eşitliklere sahiptir. Yani geçici durum analizi için gereken atalet momenti vb. bilgiler sadece park modelindeki makinalarda bulunmaktadır [55].

Mekaniksel dinamik eşitlikleri;

Sürtünme kaybını ihmal ettiğimizde mekaniksel hareket denklemi aşağıdaki şekilde verilebilir;

$$\frac{d_\omega}{d_t} = \frac{1}{J}.(T_e - T_m) \quad (5.16)$$

Makinanın atalet momenti sabiti;

$$H = \frac{\frac{1}{2}.J.\omega_S^2}{VA} + H_{ml} \quad (5.17)$$

Denklem (5.17) denklemini J ye göre tekrar düzenlediğimiz ve (5.17) de yerinde kullandığımızda

$$\frac{d_\omega}{d_t} = \frac{\omega_S}{2.H.VA}.(T_e - T_m) \quad (5.18)$$

Eğer senkron makina modelinde herhangi bir türbin regülatörü yok ise makinanın sağladığı güç yük akış analizinde hesaplanan değerde sabit kalır. Fakat bir regülatör mevcut ise mekanik güçte değişiklik yapmak mümkündür. Aynı şekilde çıkış gücü veya hız da değiştirilebilir [55].

Gerilim empedans modeli;

Gerilim empedans modeli şekil 5. 4 de gösterilen devre ile ifade edilir. Senkron jeneratör iç gerilim E_G geçici durum analizinde sabit kalacaktır. Z_G ise senkron makina modelinde transient reaktans X'_d tanımlı olmasına bağlı olarak geçici durum analizinde dikkate alınır [55].

Eğer transient endüktans tanımlı ise, senkron makine empedansı transient analizde aşağıda eşitlikteki şekilde dikkate alınır;

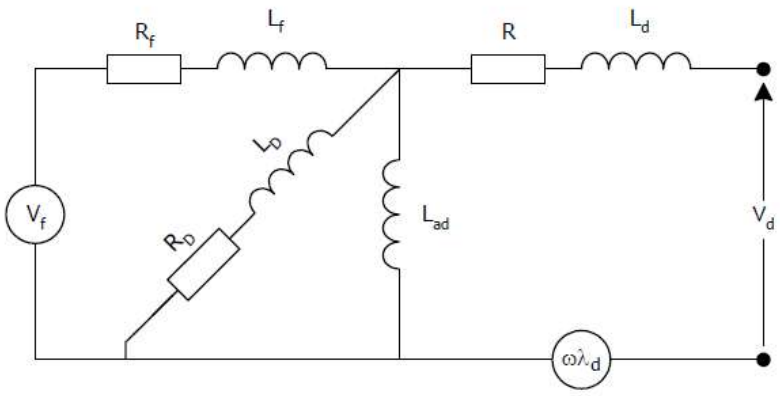
$$Z_G = R_S + j.X'_d = K_G.(R_G + jX_G) \quad (5.19)$$

Aksi durumda;

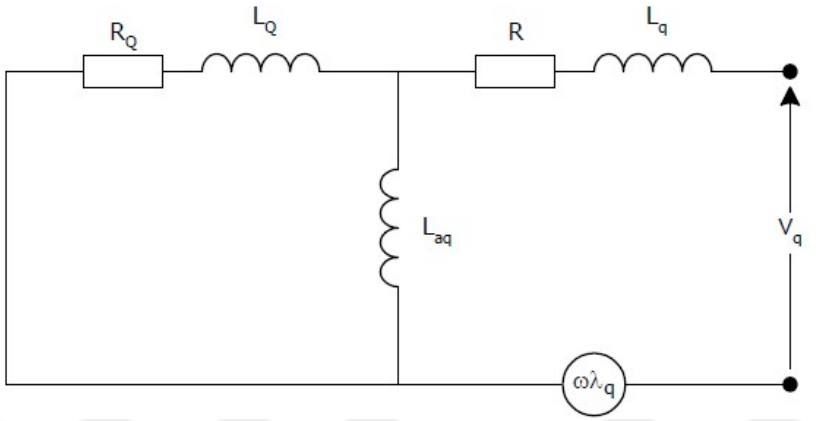
$$Z_G = R_1 + j.X_1 \quad (5.20)$$

Park Modeli;

Park eşitlikleri ve modeli senkron makina analizlerinde sıklıkla kullanılırlar. Senkron makine diferansiyel eşitliklerinin alan sargısı ile aynı doğrultuda senkron hızda dönen d/q koordinasyon sistemine dönüştürülmesi prensibine dayanır. Böylelikle makine dq koordinasyon eşitlikleri ile ifade edilir. Direk ve Kuadro aksları eşdeğer devreleri aşağıda gösterilmiştir [55].



Şekil 5. 5 Senkron makine park modeli-d aksı



Şekil 5. 6 Senkron makine park modeli q aksı

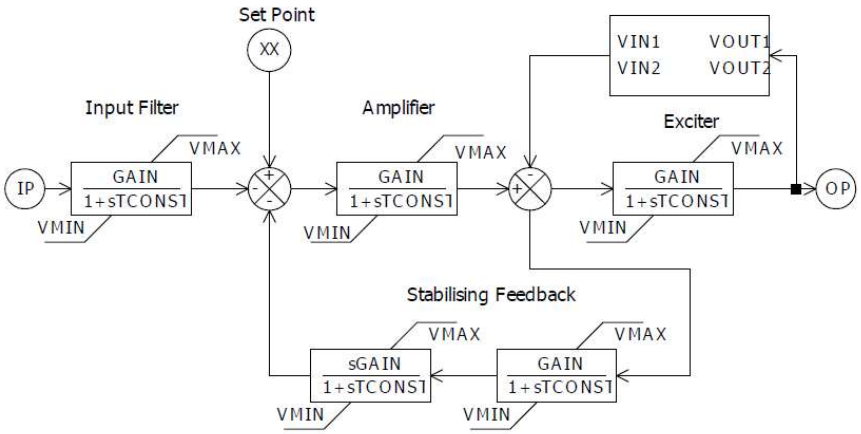
- **Otomatik gerilim ve türbin regülatörleri**

Senkron makinaların geçici durum analizlerinde otomatik gerilim regülatörü (AVR) ve türbin regülatörleri (governer) oldukça önemlidir.

AVR ile tahrik sargı akımı kontrol edilerek makinanın gerilim seviyesi ayarlanır. Mekanik regülatör ise mekanik gücü değiştirerek jeneratörün çıkış gücünü veya hızını değiştirir.

ERACS programının UDM paketinde bulunan kontrol blokları ile bu regülatörleri modellemek mümkündür. Biz analizimizde ERACS kütüphanesinde tanımlı regülatörleri kullanacağız. Bunlar sırasıyla;

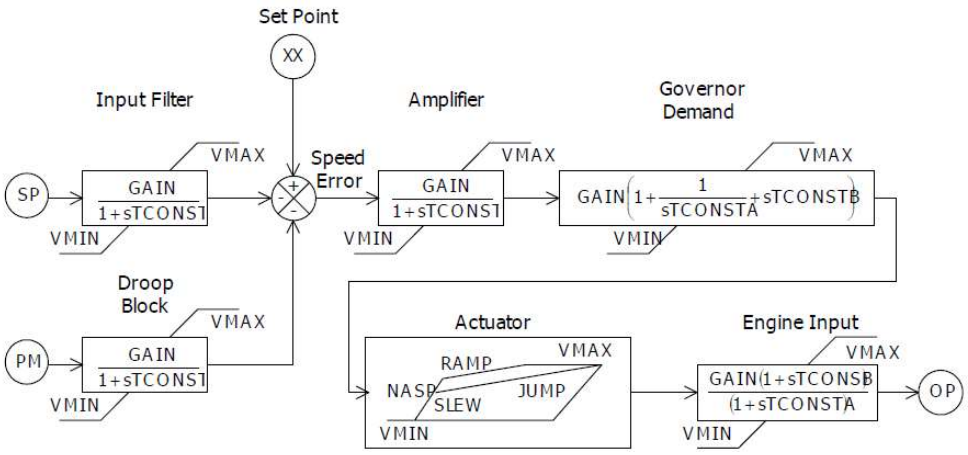
- Otomatik gerilim regülatörü olarak IEEE Tip 2 kullanılmıştır. AC2A olarak ta isimlendirilir. Alan kontrollü alternatör-doğrultucu tahrik regülatörüdür. Doğrultucu kontrollü değildir. Blok diyagramı aşağıda gösterilmiştir [56].



Şekil 5. 7 AC2A gerilim regülatörü blok diyagramı

- Türbin regülatörü

  Mekanik gücü sıcaklık, yakıt vanası vb. yöntemler ile ayarlayarak senkron makinanın hızını ve elektriksel gücünü değiştirmede kullanılırlar. Simülasyonumuzda ERACS kütüphanesinde bulunan PID kontrollü bir regülatör kullanılmıştır. Blok diyagramı aşağıda gösterilmiştir.

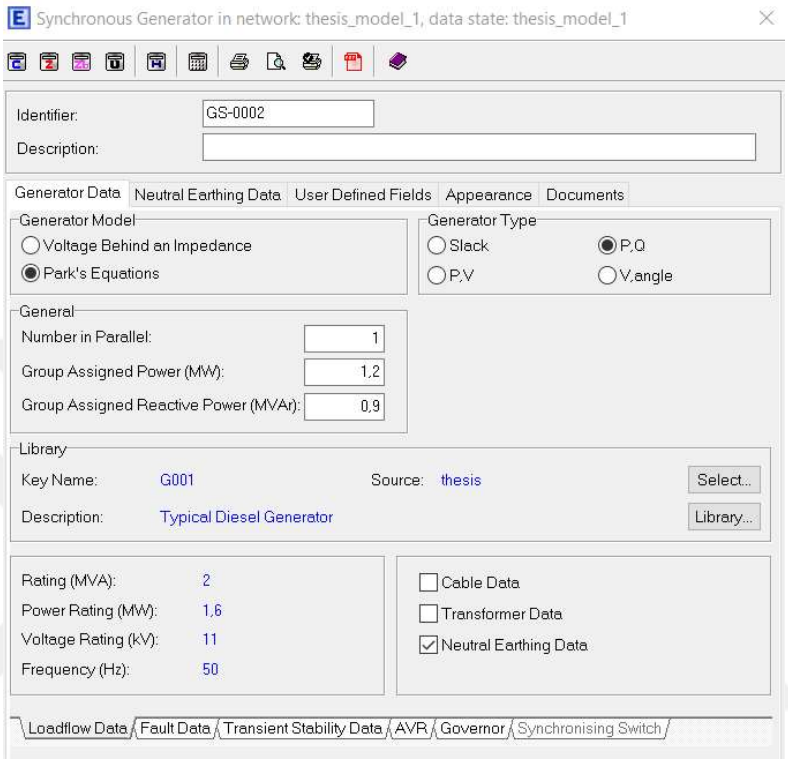


Şekil 5. 8 PID kontrollü türbin regülatörü blok diyagramı

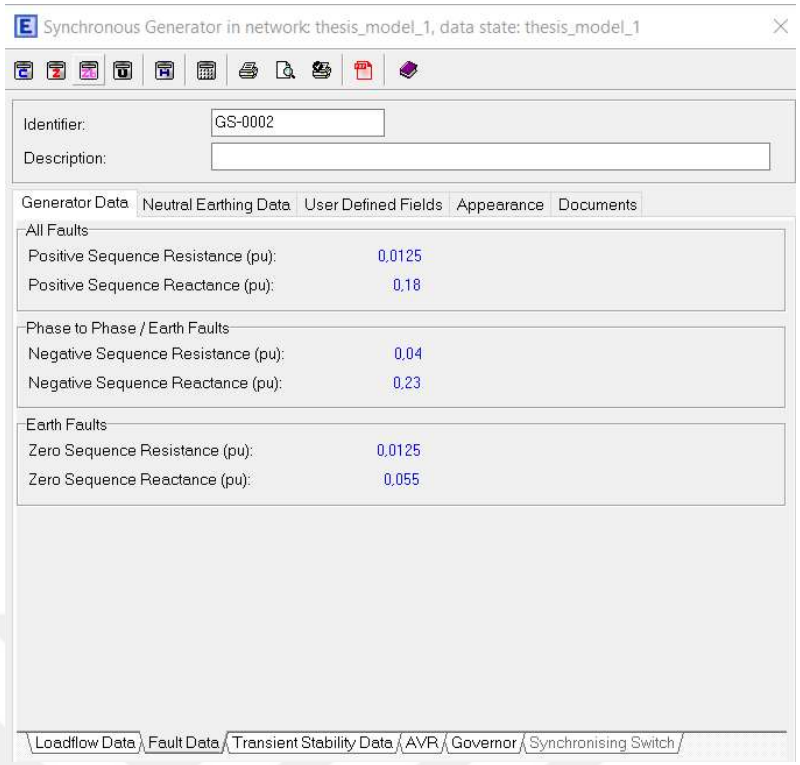
Kararlılık analizi bu tezin kapsamında olmadığından regülatörler ile ilgili daha detaylı bilgi verilmemiştir.

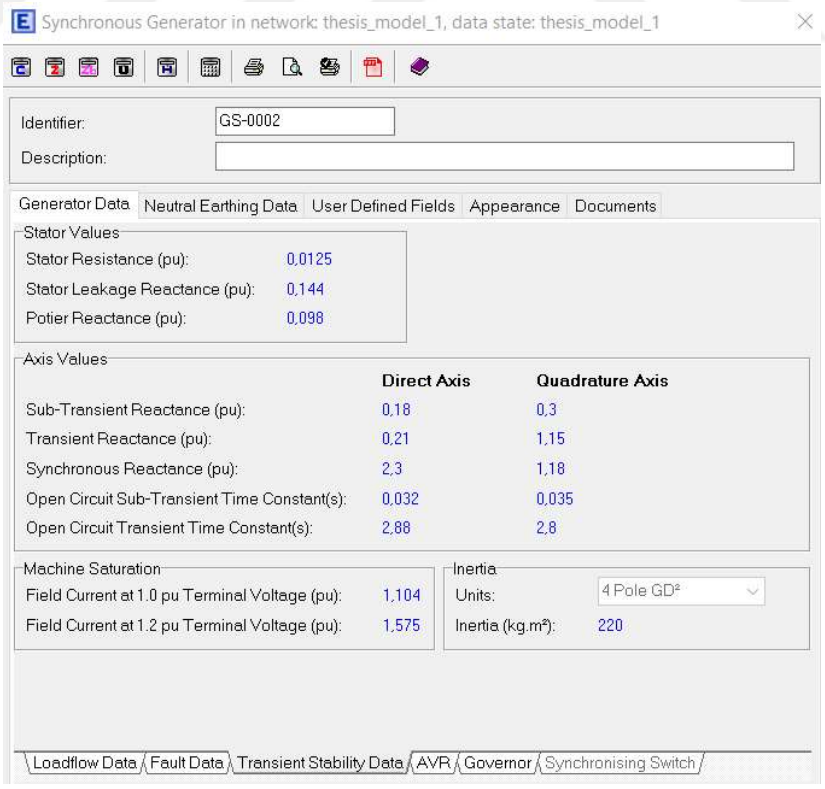
- **Senkron makina parametreleri;**

Koruma koordinasyon analizi yapılan dağıtım sisteminde ERACS kütüphanesinden örnek bir 11kV senkron jeneratör kullanılmıştır. Bu jeneratörün parametreleri aşağıdaki resimlerde gösterilmiştir;



Şekil 5. 9 ERACS modeli senkron makine parametreleri

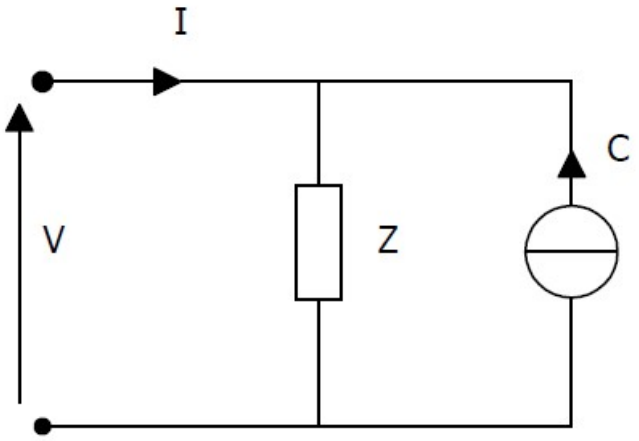




Şekil 5. 9 ERACS modeli senkron makine parametreleri (Devamı)

c. Invertör ara yüzlü dağıtık üretim kaynağı (IADÜK);

IADÜK içeren dağıtım sistemi ETAP yazılımında modellenmiştir. Modelde PQ kontrollü sabit akım kaynağı olarak çalışan invetör ara yüzlü PV tarlası kullanılmıştır. Çizelge 2. 3 de belirtildiği üzere IADÜK ler sabit akım veya gerilim kaynakları olarak modellenebilirler. Örnek dağıtım sistemimizde PQ kontrollü IADÜK ü temsilen PQ paralel elemanı kullanılmıştır. Kısa devre analizindeki aktif güç yük akışında kullanılandan nominal gücün %125'i olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 5. 10 IADÜK yük akış modeli

5.1.1.2 Transformatör – TX-1

Koruma koordinasyonu yapılan örnek dağıtım sistemimizde kullanılan transformatörün özellikleri;

34,5kV/11kV

Dyn sargılı. Faz-toprak kısa devre akımını azaltmak için nötr noktasından 2 ohm direnç ile topraklanmıştır.

10MVA anma gücünde

%X = 11

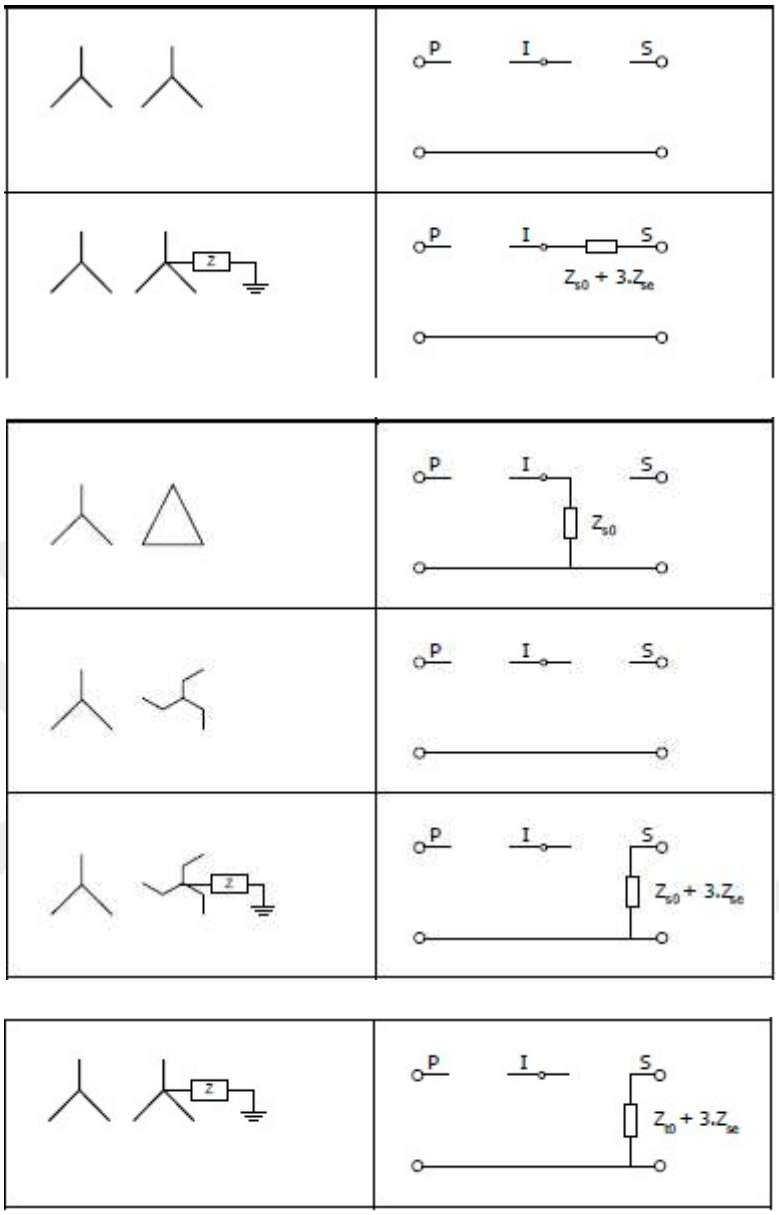
%R = 1

Sıfır bileşen empedanslar;

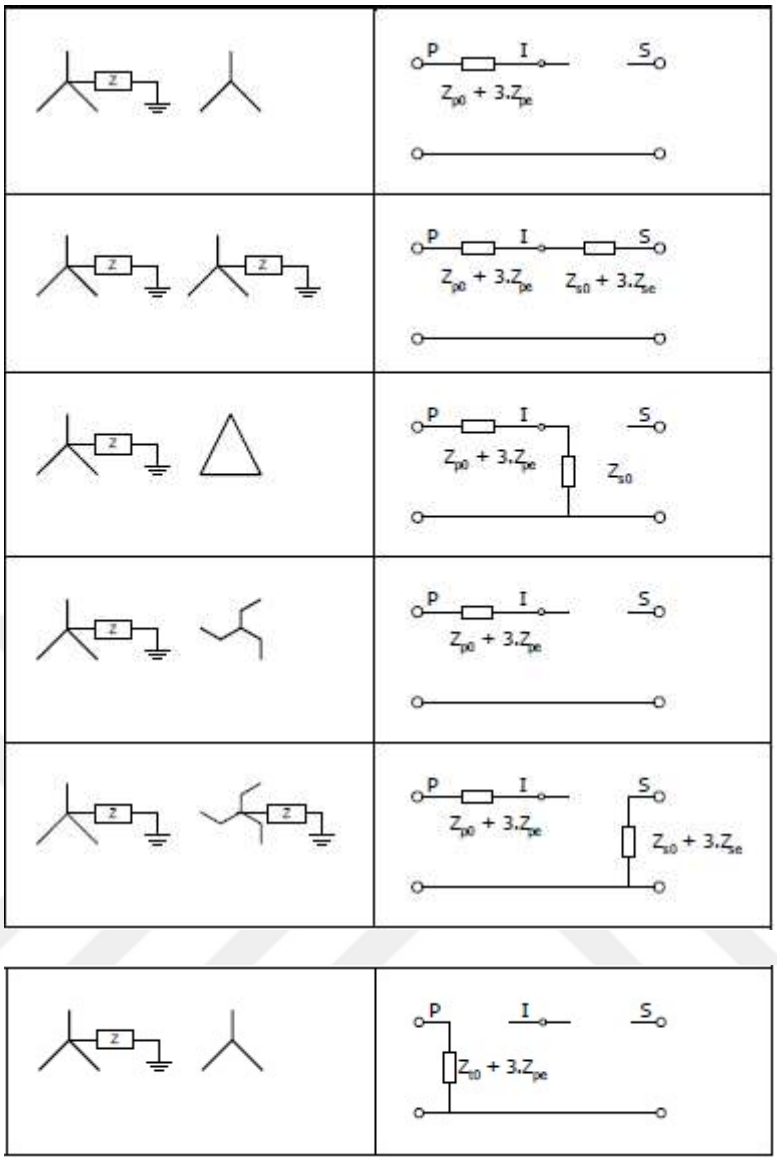
%X = 11

%R = 1

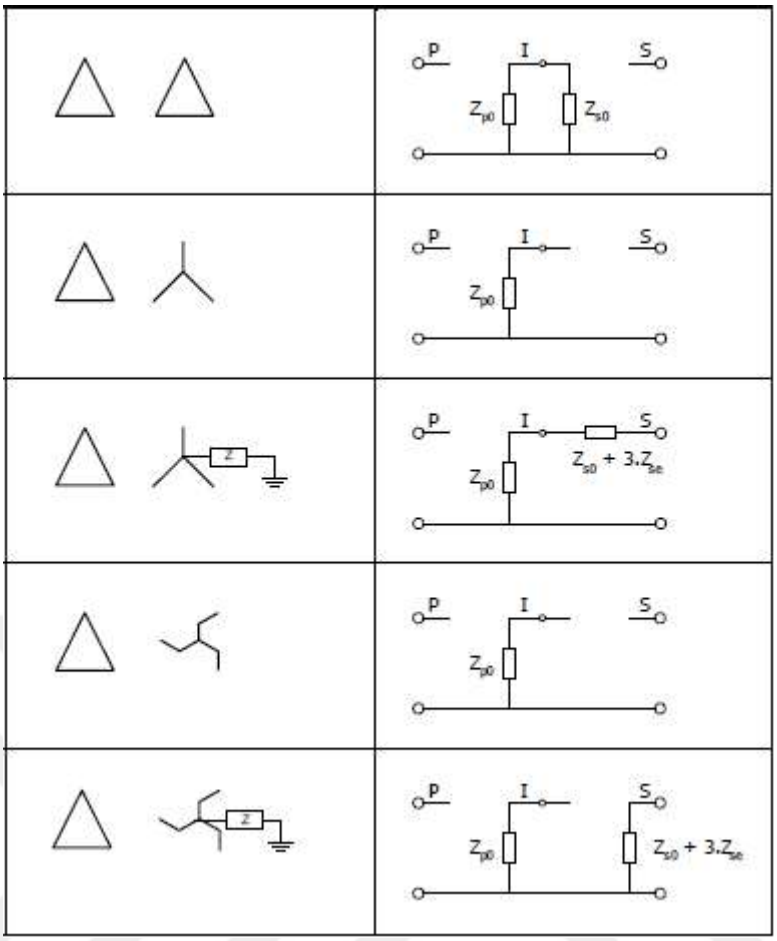
Transformatör sargılarına göre sıfır bileşen empedansı eşdeğer devreleri;



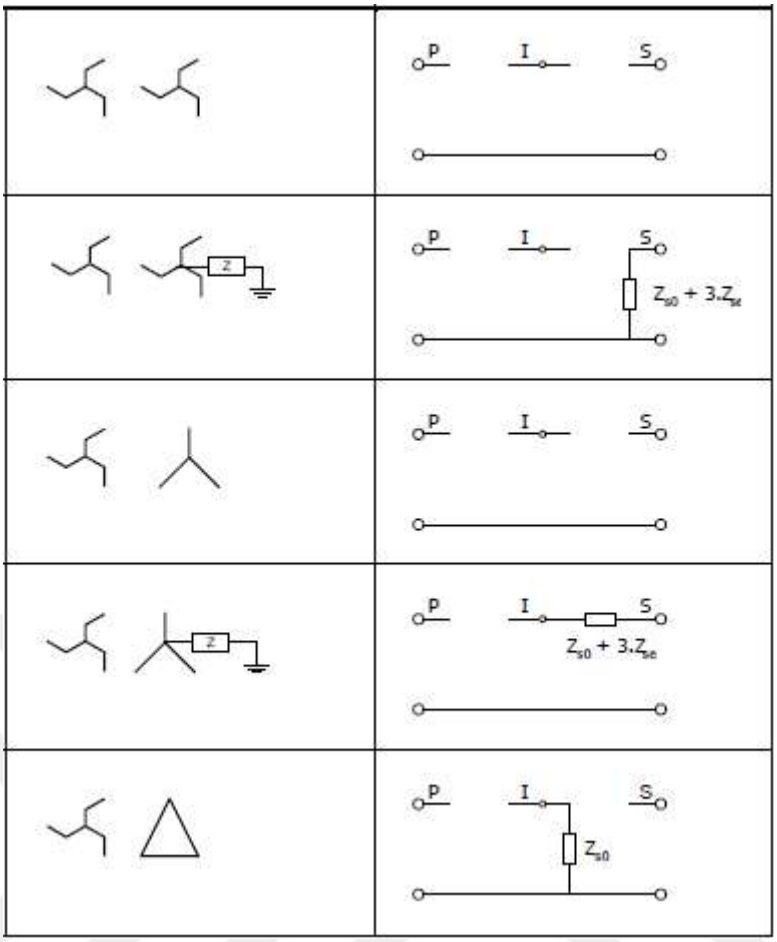
Şekil 5. 11 Transformatör sargılarına göre sıfır bileşen empedansları



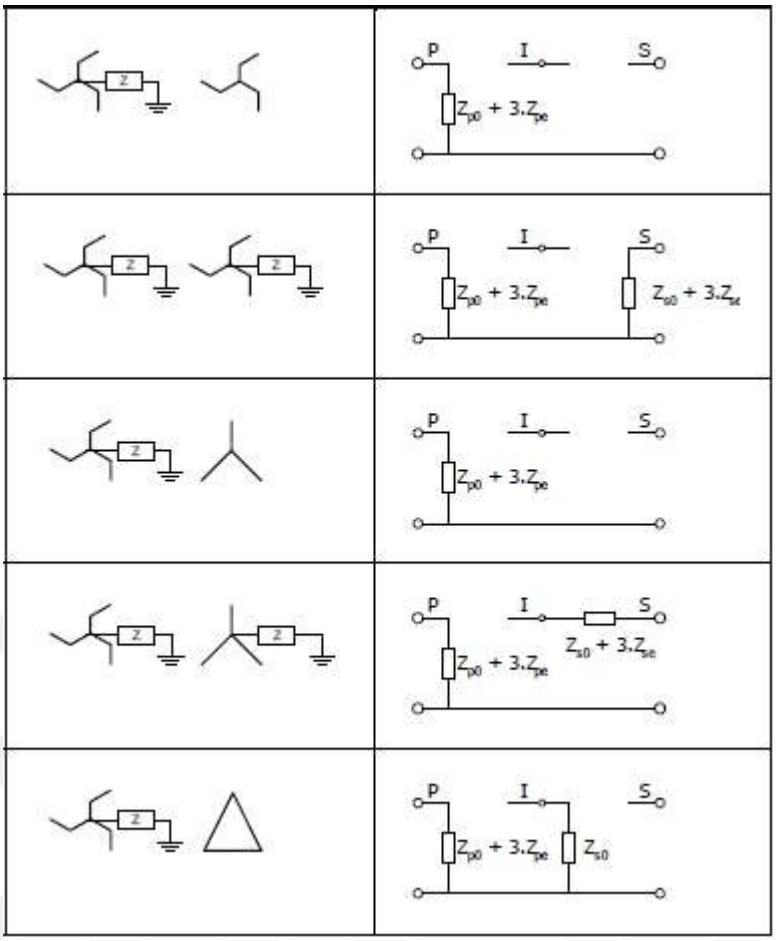
Şekil 5. 11 Transformatör sargılarına göre sıfır bileşen empedansları (Devamı)



Şekil 5. 11 Transformatör sargılarına göre sıfır bileşen empedansları (Devamı)

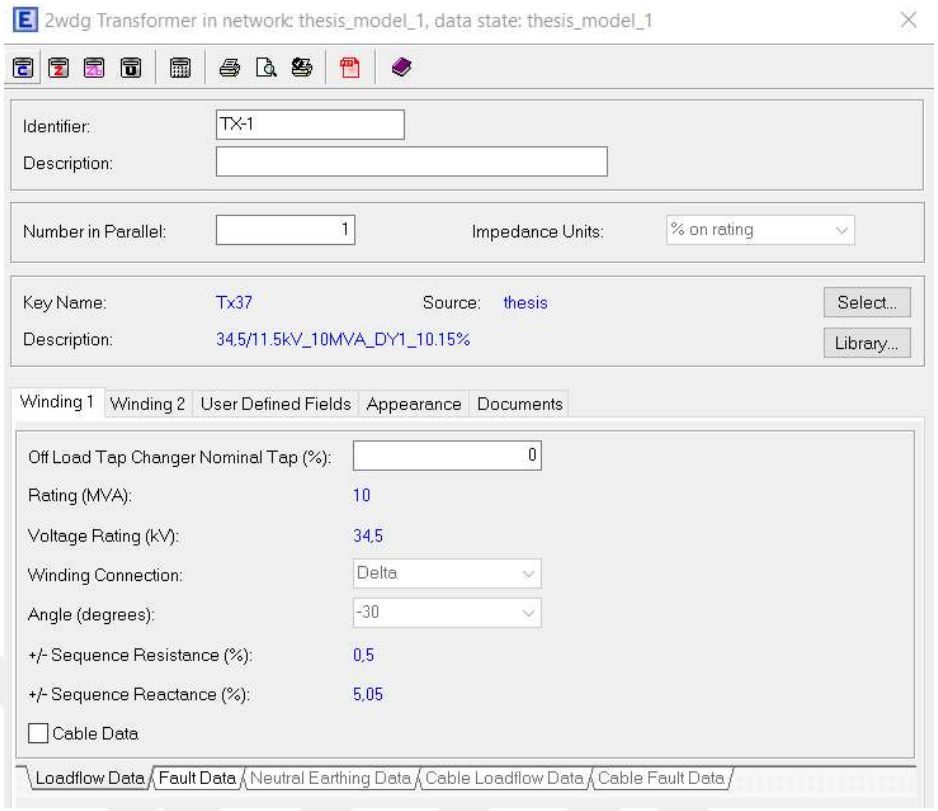


Şekil 5. 11 Transformatör sargılarına göre sıfır bileşen empedansları (Devamı)



Şekil 5. 11 Transformatör sargılarına göre sıfır bileşen empedansları (Devamı)

ERACS modelimizde yıldız noktasından 2 ohm direnç ile topraklı Dyn sargılı transformatör kullanılmıştır. Yukarıdaki şekillerde Dyn sargının eşdeğer sıfır bileşen empedansı görülebilir. Yıldız noktasının topraklanması ile yük tarafında faz-toprak ve iki faz Toprak kısa devresinin üç faz kısa devresinden daha düşük bir değerde olması sağlanır.



Şekil 5. 12 ERACS modeli transformatör parametreleri

5.1.1.3 Yükler

Örnek dağıtım sistemimizde iki adet sabit PQ yükü ve bir adet asenkron motor kullanılmıştır.

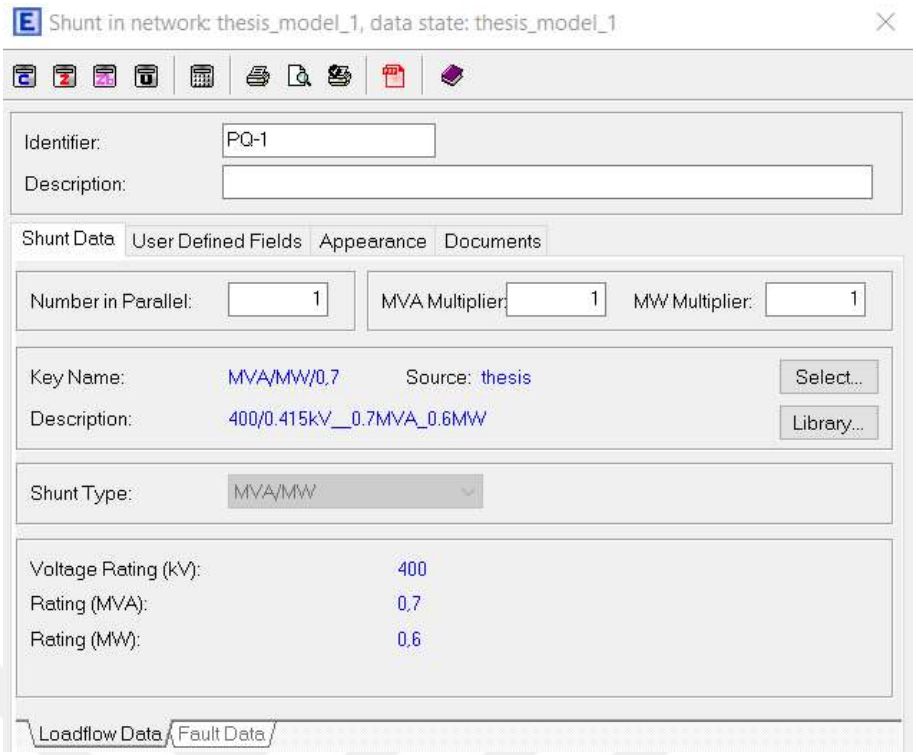
- PQ-1
- PQ-2
- MI-1

a. PQ-1

0,7 MVA ve 0,6MW gücünde sabit PQ yüküdür.

b. PQ-2

PQ-1 yükü ile aynı özelliklere sahiptir.



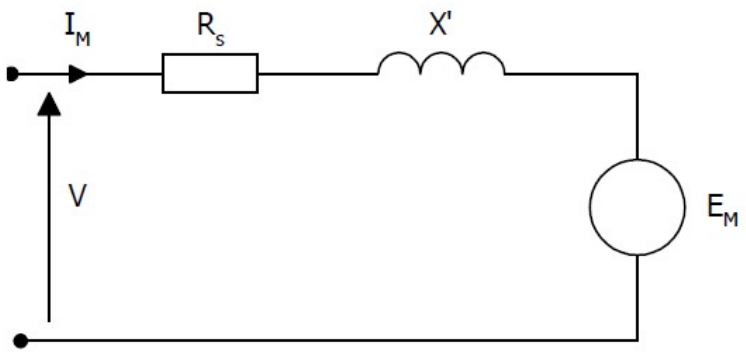
Şekil 5. 13 ERACS modeli yük parametreleri

Arıza analizinde oluşturulan kısa devreler yük giriş baralarında gerçekleştirildiğinden PQ yüklerinin empedansları dikkate alınmamıştır.

c. Asenkron Motor – MI-1

0,4MVA / 0,35MW anma gücünde 11kV gerilim seviyesinde MI olarak isimlendirilen ERACS kütüphanesinden bir asenkron motor kullanılmıştır.

Endüksiyon motorlarını tanımlamak için kullanılan gerilim empedans modeli şekil 5. 14 de gösterilmiştir [55].



Şekil 5. 14 Asenkron motor modeli

X' makinanın transient empedansıdır ve aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$X' = X_s + \frac{X_m . X_r}{X_m + X_r} \quad (5.21)$$

R_s ; Stator rezistansı

X_s ; Stator reaktansı

X_m ; Manyetik reaktans

X_r ; Rotor reaktansı

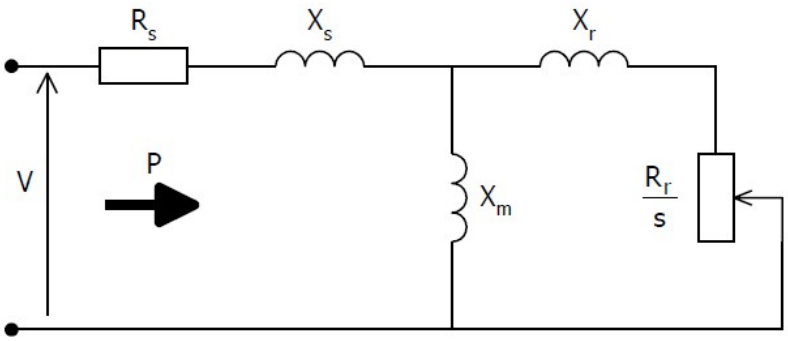
I_M ; Makina giriş akımı

E_M ; Makina iç gerilimi

V ; Terminal gerilimi

- **Yük akış modeli**

Endüksiyon makinaların yük akış analizinde şekil 5. 15'deki model kullanılabilir.



Şekil 5. 15 Asenkron motor yük akış modeli

ERACS endüksiyon motor modelinde sabit ve hareketli durum rotor empedans değerlerinin de tanımlanması gerekmektedir. Yük akışı için bu empedansların çok önemi olmamakta beraber arıza anında motorun kısa devreye katkısını belirlerken önemlidirler.

Yük akışında kullanılan rotor empedansının denklemi;

$$X' = X_s + \frac{X_m . X_{rs}}{X_m + X_{rs}} \quad (5.22)$$

$X_{rs} =$ Durağan durum rotor reaktansı

Çalışma halinde kullanılan rotor empedansları;

$X_r = X_{rr} = \text{Rotor çalışma reaktansı}$

$R_r = R_{rr} = \text{Rotor çalışma rezistansı}$

$s = \text{Motor kayma değeri}$

- **Arıza Empedansları**

Yük akışı ile benzer empedanslar kullanılabilir.

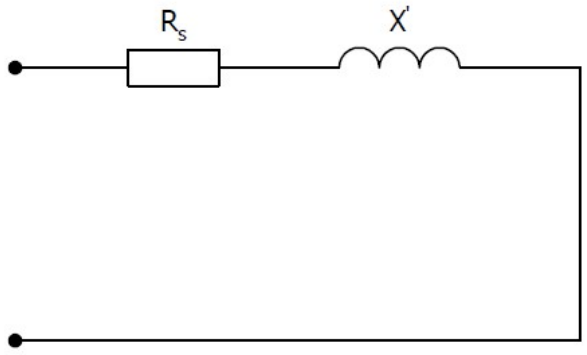
Pozitif bileşen modeli;

$$I_M = \frac{V - E_M}{R_s + jX'_d} \quad (5.23)$$

$$X' = X_s + \frac{X_m . X_{rs}}{X_m + X_{rs}} \quad (5.24)$$

Negatif bileşen modeli;

Şekil 5. 16 de negatife bileşen empedans modeli görünmektedir.



Şekil 5. 16 Asenkron motor negatif bileşen empedans modeli

Sıfır bileşen modeli;

Endüksiyon makinaları çok büyük çoğunlukla üçgen sargılıdır. Bu sebepten sıfır bileşen empedans modelleri açık devre şeklindedir. Sıfır bileşen modeline dahil edilmezler.

- **IEC 60909 empedans modeli**

IEC 60909 standardına göre endüksiyon makina empedans formülleri;

$$Z_M = Z_s + \frac{X_m . Z_{rs}}{X_m + Z_{rs}} \quad (5.25)$$

$Z_s =$ Stator empedansı

$Z_{rs} =$ Durağan durum rotor empedansı

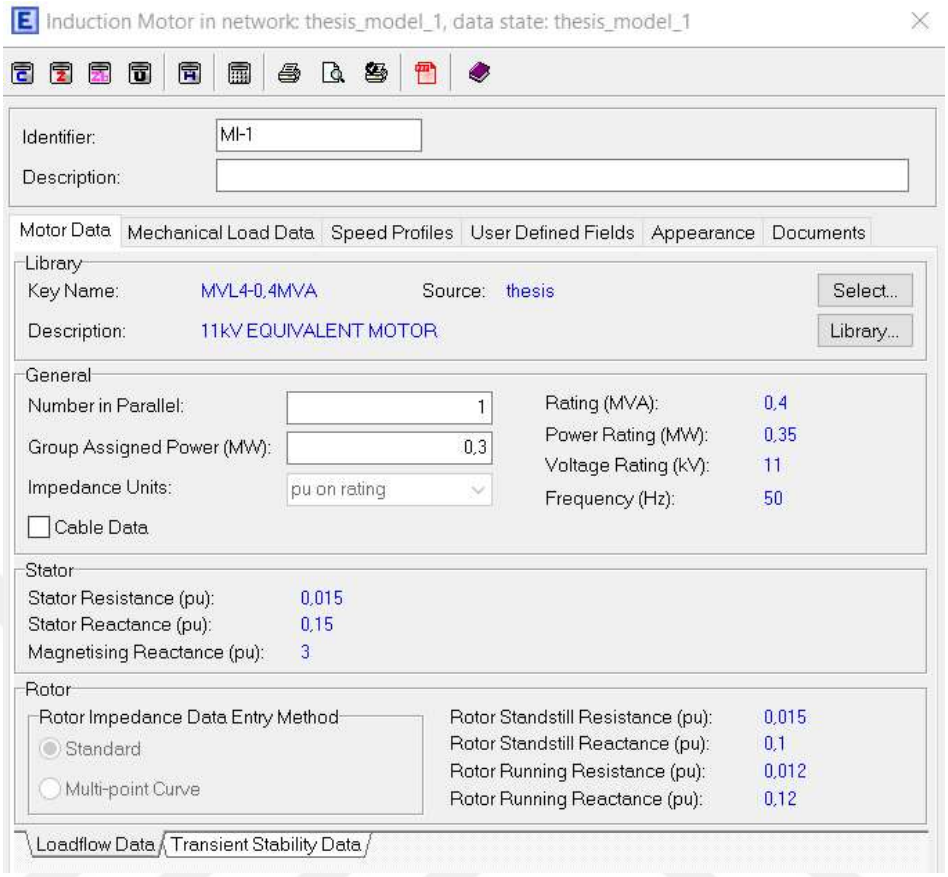
$X_m =$ Manyetik reaktans

X_M ve R_M motor kilitlenme rezistans ve reaktansı olarak ta ifade edilir. IEC 60909' da aşağıda ifade edildiği şekilde tanımlanmıştır.

Çizelge 5. 3 motor X_M ve R_M empedansları

$\frac{R_M}{X_M} = 0{,}1$	$X_M = 0{,}995 . Z_M$	1MW dan büyük güçte yüksek gerilim seviyesindeki motorlar için
$\frac{R_M}{X_M} = 0{,}15$	$X_M = 0{,}989 . Z_M$	1MW dan daha düşük güçte yüksek gerilim seviyesindeki motorlar için
$\frac{R_M}{X_M} = 0{,}42$	$X_M = 0{,}922 . Z_M$	Alçak gerilim seviyesindeki motorlar için

ERACS modelindeki endüksiyon makinası değerleri;



Şekil 5. 17 ERACS modeli asenkron motor parametreleri

5.1.1.4 Kablolar

ERACS modelinde kullanılan kablolar isimlendirmeleri, kesitleri ve empedans bilgileri aşağıdaki gibidir;

Çizelge 5. 4 ERACS modeli kablo listesi

Kablonun bağlı olduğu baralar	Kablolar	Kablo kesit ve gerilim seviyesi	Mesafe (km)
Ent. Konnekte Şebeke çıkış barası (NETWORK) ile Transformatör giriş barası (TX-PRI) arasında	CAB-HV	34,5kV 3 x (1x70mm^2 Cu XLPE AWA)	10
Transformatör dağıtım barası (TX-CON) ile ve Jeneratör dağıtım barası (GEN-CON) arasında	CAB-CON2	11kV 3 x (1x70mm^2 Cu XLPE)	0,1
Jeneratör çıkış barası ile (GS) jeneratör dağıtım barası (GS-CON) arasında	CAB-CON1	11kV 3 x (1x70mm^2 Cu XLPE)	0,2
Jeneratör çıkış barası (GS) ile PQ-1 yükü giriş barası (PQ1) arasında	CAB-PQ1	11kV 3 x (1x70mm^2 Cu XLPE)	0,2
Jeneratör dağıtım barası (GS-CON) ile endüksiyon motoru giriş barası arasında (MI-1)	CAB-MI	11kV 3 x (1x70mm^2 Cu XLPE)	0,2
Transformatör dağıtım barası (TX-CON) ile PQ-2 yükü giriş barası arasında (PQ)	CAB-PQ2	11kV 3 x (1x70mm^2 Cu XLPE)	0,2

Kablolar yük akış analizinde ve arıza analizlerinde seri rezistans ve endüktans olarak modellenirler.

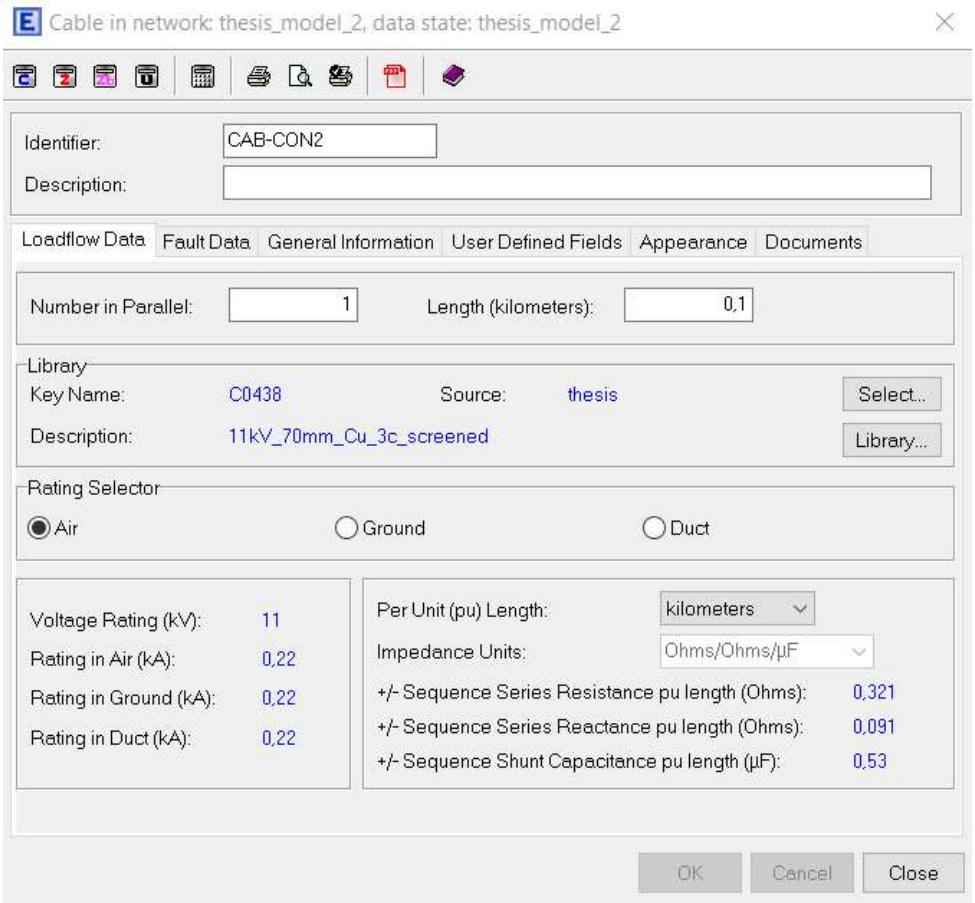
Herhangi bir bilgi bulunmaması durumunda kablo sıfır bilen empedansı (5.26) ve (5.27) formülleri ile bulunabilir;

$$R_{0L} = R_L + 3.R_{nötr} \tag{5.26}$$

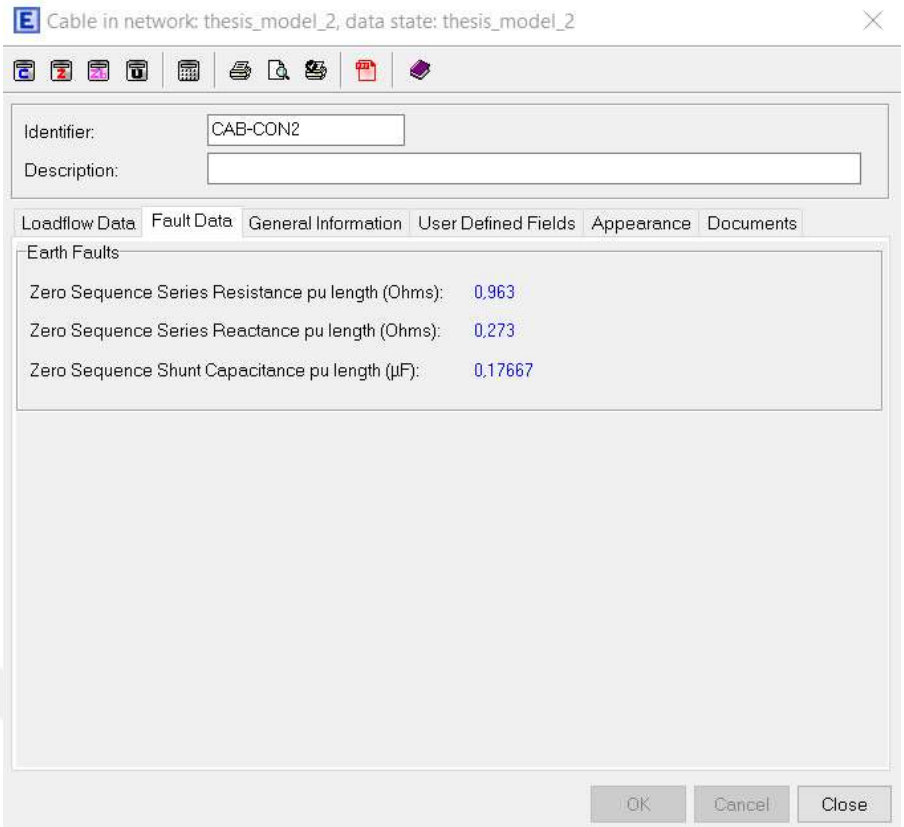
$$\mathrm{X_{0L}} \approx (3{,}5 \dots 4)\mathrm{X_L} \tag{5.27}$$

Analizi yapılan dağıtım sisteminde ERACS kütüphanesinde bulunan güç kabloları modelleri kullanılmıştır.

Şekil 5. 18 de 11 kV gerilim seviyesindeki kabloların pozitif, negatife ve sıfır bileşen empedans değerleri verilmiştir.



Şekil 5. 18 ERACS modeli 34,5kV kablo parametreleri



Şekil 5. 18 ERACS modeli 34,5kV kablo parametreleri (Devamı)

5.1.1.5 Koruma röleleri ve kesiciler

a. Kesiciler

Modelde kullanılan kesicilerin listesi çizelge 5. 4 de verilmiştir.

Modelde Schneider Electric firmasının hava izoleli SF6 kesicili RMU tipi orta gerilim hücreleri kullanılmıştır.

I_{cu} = Kesicinin arızayı açma-bekleme-kapama sırasıyla iki kez kesebileceği maksimum kısa devre kesme kapasitesidir.

I_{cs} = Kesicinin arızayı açma-bekleme-kapama-bekleme-kapama sırasıyla üç kez kesebileceği maksimum kısa devre kesme kapasitesidir.

$Shunt\ Trip$=Kesicinin koruma rölesinden açma komutu almasının ardından kontaklarının ayrılarak arkın sönme süresidir.

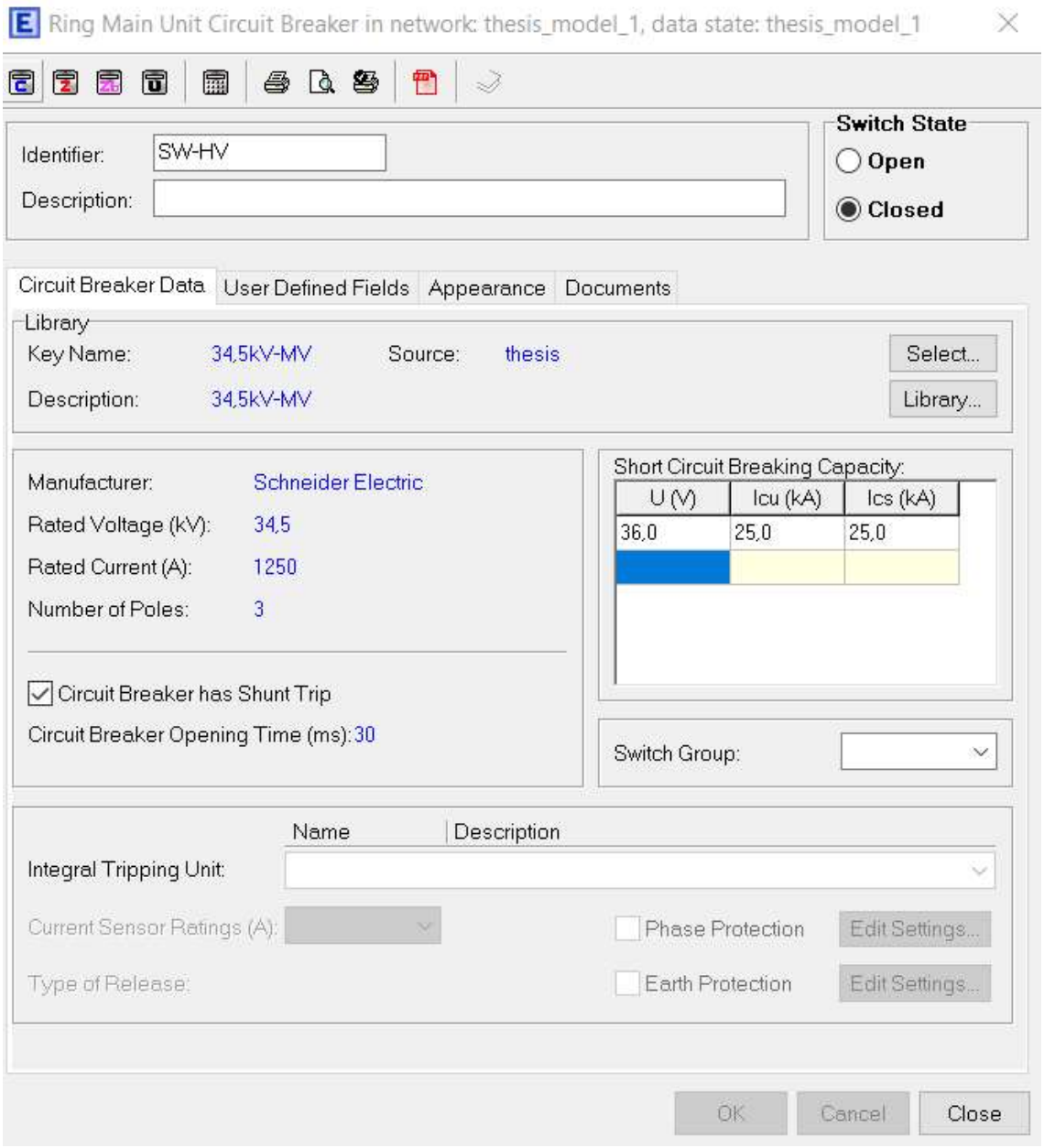
Modelde kullanılan kesicilerin bilgileri;

Çizelge 5. 5 ERACS modeli kesici listesi

Açıklama	İsimlendirme	Elektriksel Değerleri
Enterkonnekte şebeke çıkış kesicisi	SW-HV	Nominal gerilim; 36kV Nominal Akım; 1250A I_{cu}=25kA I_{cs}=25kA Açma süresi; 30 ms
Transformatör giriş kesicisi	SW-TX-PRI	Nominal gerilim; 36kV Nominal Akım; 1250A I_{cu}=25kA I_{cs}=25kA Açma süresi; 30 ms
Transformatör çıkış kesicisi	SW-TX-SEC	Nominal gerilim; 13,8kV Nominal Akım; 630A I_{cu}=21kA I_{cs}=21kA Açma süresi; 95 ms
Jeneratör çıkış kesicisi	SW-GS	Nominal gerilim; 13,8kV Nominal Akım; 630A I_{cu}=21kA I_{cs}=21kA Açma süresi; 95 ms
Jeneratör dağıtım barası giriş kesicisi	SW-CON2	Nominal gerilim; 13,8kV Nominal Akım; 630A I_{cu}=21kA I_{cs}=21kA Açma süresi; 95 ms.
Transformatör ve jeneratör dağıtım baraları arası kesici	SW-CON1	Nominal gerilim; 13,8kV Nominal Akım; 630A I_{cu}=21kA I_{cs}=21kA Açma süresi; 95 ms

Çizelge 5. 5 ERACS modeli kesici listesi (Devamı)

PQ-1 yükü giriş kesicisi	SW-PQ1	Nominal gerilim; 13,8kV Nominal Akım; 630A I_{cu}=21kA I_{cs}=21kA Açma süresi; 95 ms
PQ-1 yükü giriş kesicisi	SW-PQ1	Nominal gerilim; 13,8kV Nominal Akım; 630A I_{cu}=21kA I_{cs}=21kA Açma süresi; 95 ms
MI-1 yükü giriş kesicisi	SW-MI	Nominal gerilim; 13,8kV Nominal Akım; 630A I_{cu}=21kA I_{cs}=21kA Açma süresi; 95 ms



Şekil 5. 19 ERACS modeli 34,5kV orta gerilim kesici parametreleri

b. Koruma röleleri

ERACS yazılımı çeşitli firmaların aşırı akım, ters zamanlı aşırı akım ve yönlü aşırım akım rölelerini içeren geniş bir koruma rölesi kütüphanesi vardır.

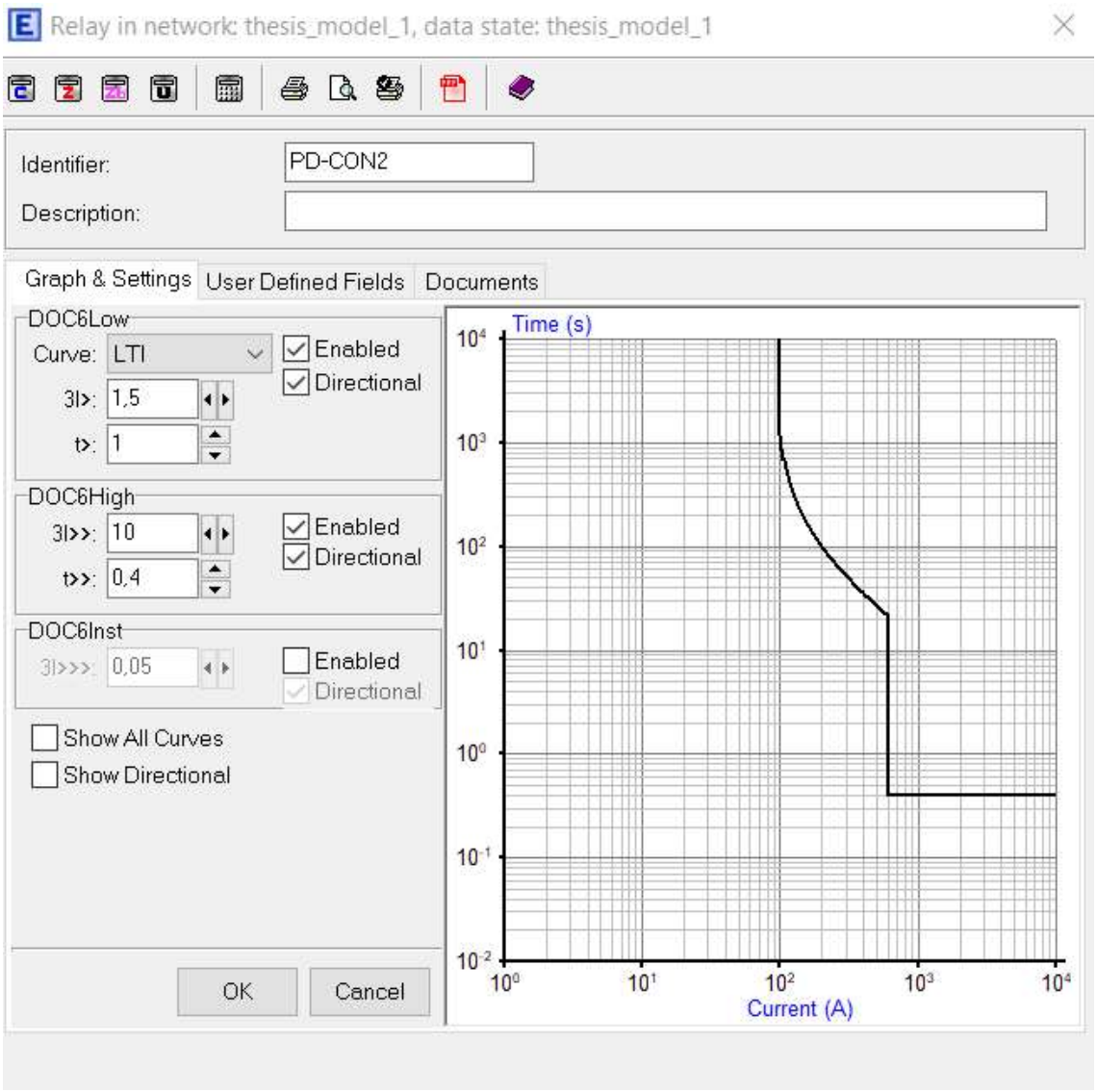
Analizimizde IEC61850 haberleşme protokolü ile uyumlu ve birbirleri ile GOOSE (Generic object oriented system event) mesajlaşması gerçekleştirebilen, oldukça esnek ve markette sıklıkla kullanılan ABB firmasının RE615 serisi röleleri kullanılmıştır. Rölenin örnek bir resmi şekil 5. 20 de verilmiştir.



Şekil 5. 20 REF615 Orta gerilim rölesi

REF615 rölelerinin yönlü koruma, toprak kaçağı koruması, ters zaman aşırı akım koruma, kademeli aşırı akım koruma ve anlık kısa devre koruma özellikleri bulunmaktadır.

ERACS modelimizde PD-CON2 olarak isimlendirdiğimiz REF615 rölesinin örnek ayarları ve akım zaman eğrisi;



Şekil 5. 21 ERACS modeli röle akım-zaman ayaları

Modelde kullanılan rölelerin isimlendirmesi çizelge 5. 5 de verilmiştir.

Çizelge 5. 6 ERACS modeli röle listesi

Enterkonnekte şebeke çıkış rölesi	PD-HV
Transformatör giriş rölesi	PD-TX-PRI
Transformatör çıkış rölesi	PD-TX-SEC
Jeneratör çıkış rölesi	PD-GS

Çizelge 5. 6 ERACS modeli röle listesi (Devamı)

Jeneratör dağıtım barası giriş rölesi	PD-CON2
Jeneratör ve transformatör dağıtım baralarını rölesi	PD-CON1
PQ-1 barası giriş rölesi	PD-PQ1
PQ-2 barası giriş rölesi	PD-PQ2
MI-1 barası giriş rölesi	PD-MI

Röle set değerleri bir sonraki bölümde tanımlanan arıza ve çalışma senaryolarına göre belirlenmiştir.

5.2 ERACS ve ETAP Yazılımları ile Gerçekleştirilen Orta Gerilim Seviyesinde Hibrit Bir Enerji Dağıtım Sisteminin Aşırı ve Yönlü Aşırı Akım Röleleri ile Gerçekleştirilen Arıza ve Koruma Analizleri

Bu bölümde çeşitli çalışma senaryoları belirlenecek ve bu senaryolara göre yük akışı, kısa devre analizi, IEC 60909 standardına göre kısa devre analizi, koruma ve koordinasyon analizleri gerçekleştirilecek ve son olarak kesici açma süreleri dikkate alınarak transient analizde yük baralarının gerilim ve frekansları izlenecektir.

Çalışma senaryosu 1 de enterkonnekte ve senkron jeneratör paralel çalışmaktadır. 2.senaryoda senkron jeneratör ada modunda çalıştırılmaktadır. Sonra olarak 3. Senaryoda ise sadece IADÜK devrede iken ada çalışmada analiz yapılmıştır.

Çalışma senaryolarını özetleyen tablo çizelge 5. 7’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 7 çalışma senaryoları

Çalışma senaryosu (ÇS)	Enterkonnekte şebeke (N)	Senkron Jeneratör (GS)	IADÜK Sabit PQ
ÇS-1	Devrede	Devrede	-
ÇS-2	-	Devrede Ada modu	-
ÇŞ-3	-	-	Devrede Ada modu

Her bir çalışma senaryosunu için sırasıyla

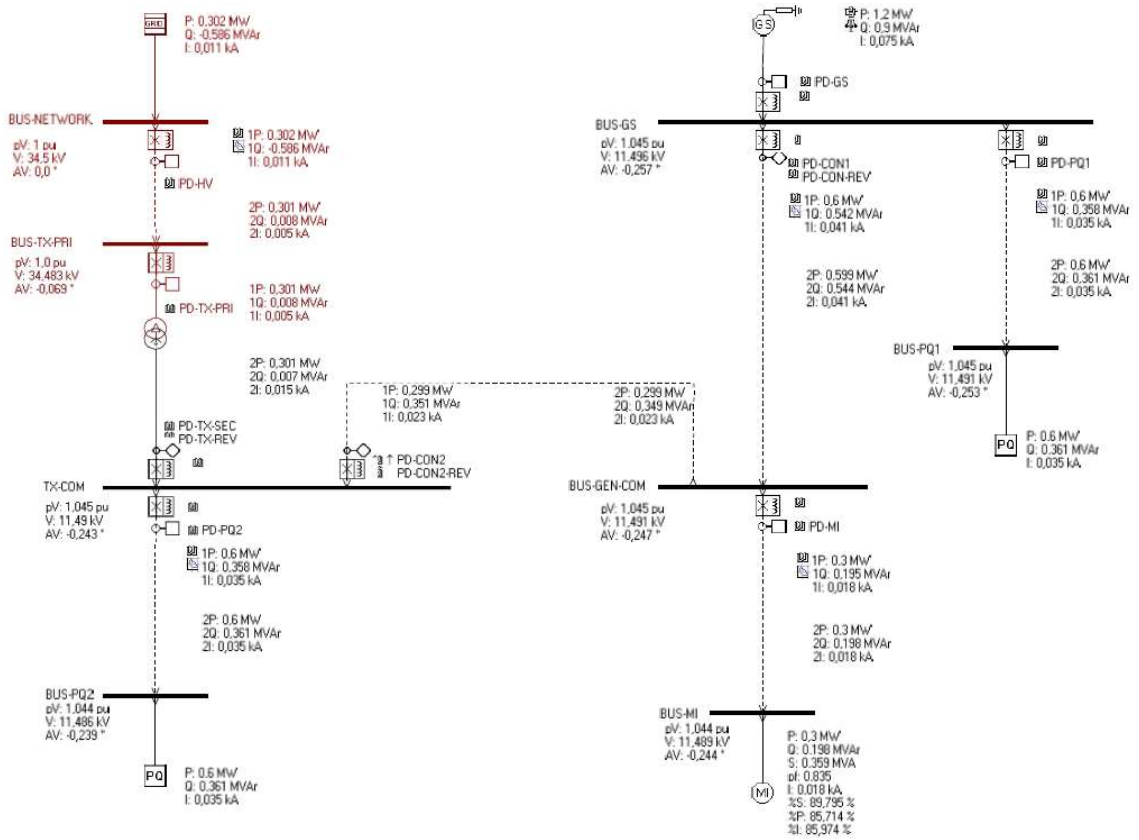
- Yük Akış Analizi
- Kısa Devre Analizi
- IEC 60909 Kısa Devre Analizi
- Koruma Koordinasyonu Analizi
- Geçici Durumda V-f Analizi Gerçekleştirilecektir.

5.2.1 Çalışma Senaryosu-1 (ÇS-1)

5.2.1.1 Yük Akış Analizi

Senkron jeneratör enterkonnekte şebeke ile paralel ve sabit 1.2MW ve 0.9MVAr (PQ modunda) sağlayacak şekilde çalıştırılır.

Simülasyon sonuç diyagramı şekil 5. 22 de gösterilmiştir.



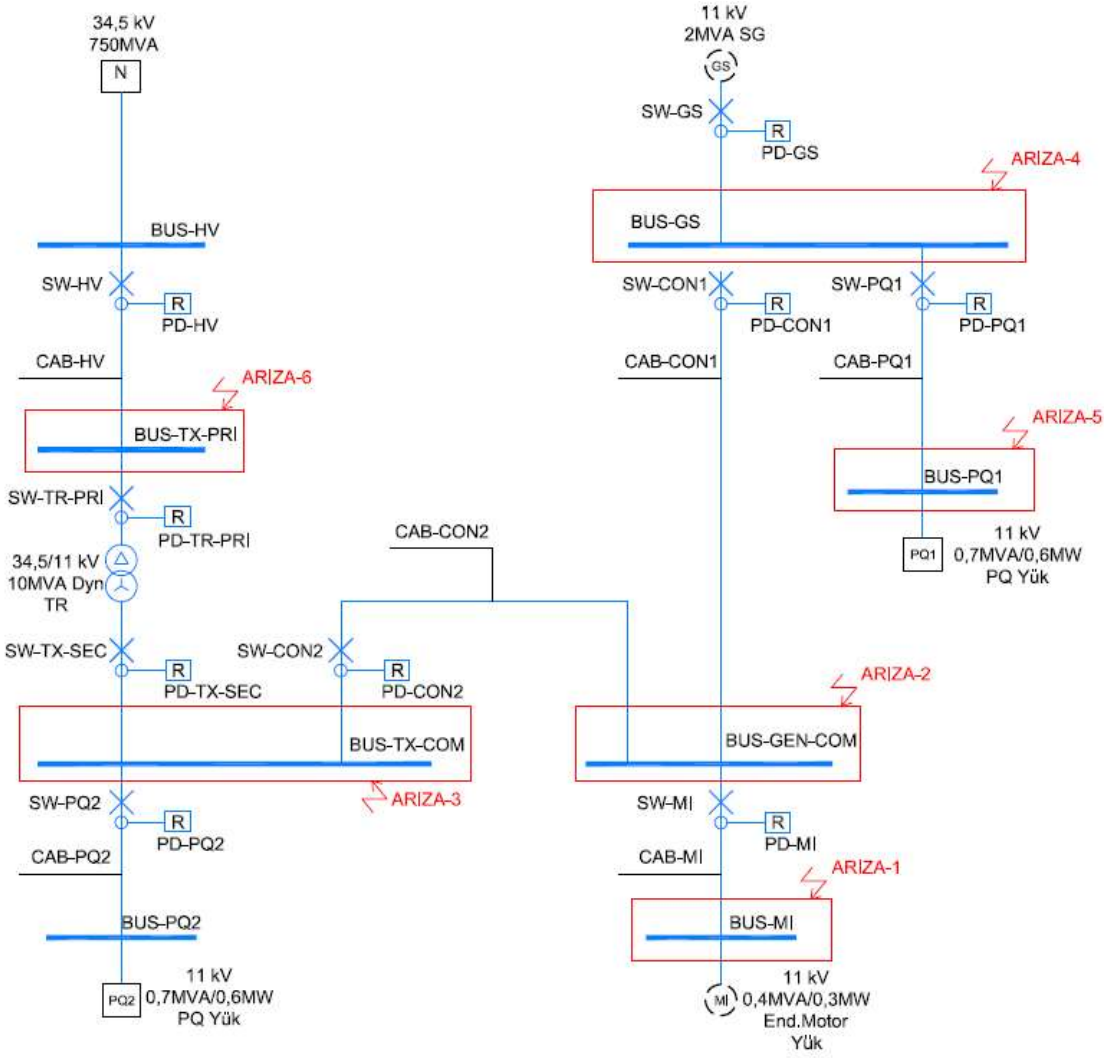
Şekil 5. 22 ÇS-1 yük akışı simülasyonu sonuçları

Senkron jeneratör PQ modunda çalıştırılması sebebiyle sisteme sürekli ve sabit güç sağlar. Yük talebi ağırlıklı olarak bu kaynak tarafından sağlanır. Enterkonnekte şebeke salınım barası olarak vazife görür ve artan yük talebini karşılar. Yük talebinin jeneratörün üretim değerinin altına düşmesi durumunda ise artık enerji enterkonnekte şebekeye yönelir. Gerilim-açı veya salınım barası modunda çalıştırılması durumunda ise makina yükün talebini takip edebilir. Uygulamada enerji verimliliğini artırmak amacıyla kombine ısı ve güç sistemleri gibi dağıtık üretim kaynakları şebeke ile sabit güç sağlayacak şekilde çalıştırırlar.

Kesici ve kablo nominal akımları yük akış analizlerine uygundur. Koruma rölelerin düşük kademe akımlarını ayarlarken yük akış analizi sonuçları dikkate alınmıştır. Bu akımların minimum set değeri akış analizi sonucunda hesaplanan akımlardan büyük olacak şekilde seçilmiştir.

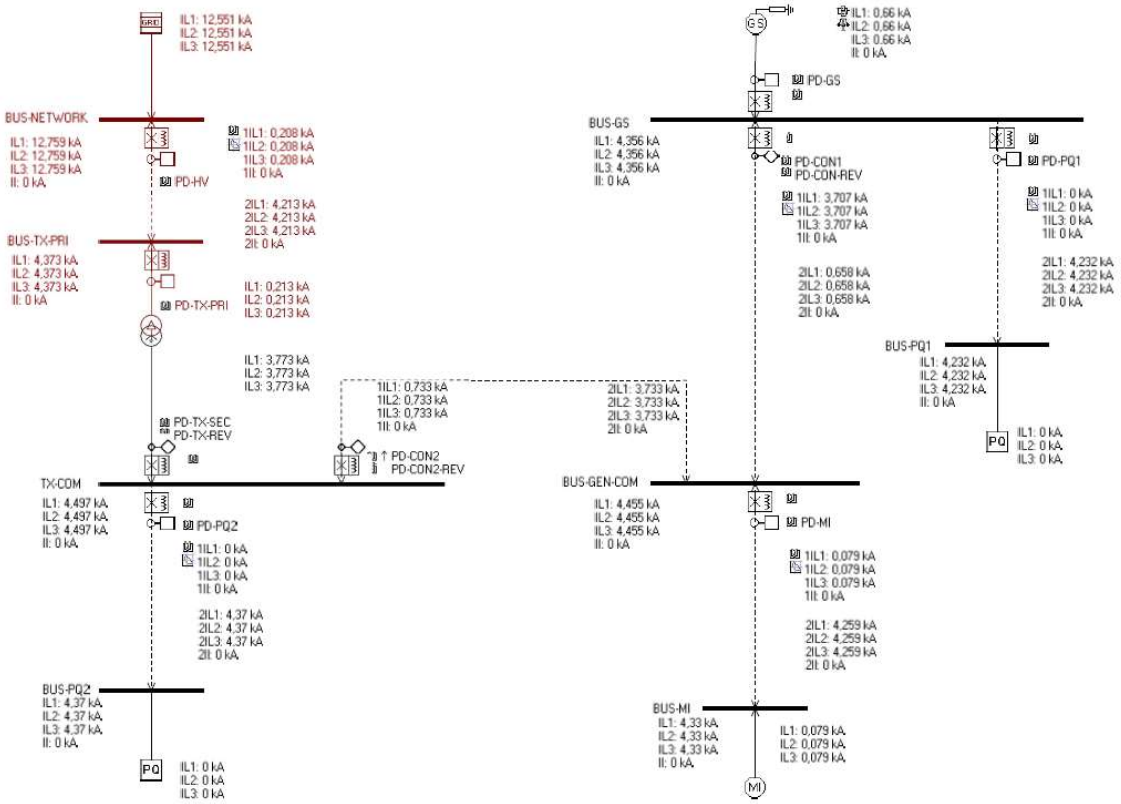
5.2.1.2 Kısa Devre Analizi

Bu bölümde şekil 5. 23 de gösterilen 6 adet bara için üç faz ve faz toprak kısa devre hesapları simüle edilmiştir.



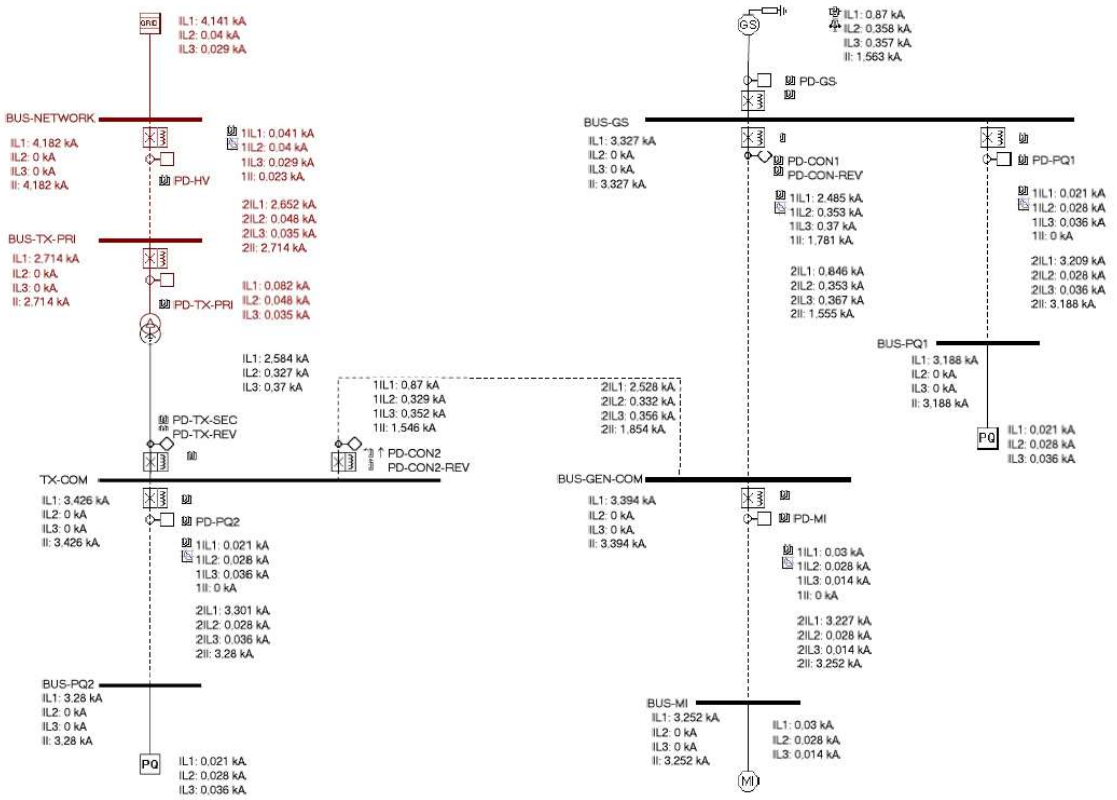
Şekil 5. 23 ÇS-1 kısa devre arıza noktaları

- **Üç faz kısa devre hesabı**



Şekil 5. 24 ÇS-1 üç fazlı kısa devre analizi sonuçları

- **Faz toprak kısa devre hesabı**



Şekil 5. 25 ÇS-1 faz toprak kısa devre analizi sonuçları

<u>Bara kısa devre arıza analizi sonuçlarının yorumlanması;</u>

Şekil 5. 24 ve 5. 25 de görüleceği üzere arıza noktaları enterkonnekte şebeke ve senkron jeneratör tarafından beslenmektedir. Bu durum ilgili devrenin iki farklı yönde farklı değerde kısa devre akımlarına maruz kalmasına sebep olur. Şebekenin arıza katkı akımının senkron jeneratörden daha büyük olduğu da açıkça görülmektedir. Asenkron motor da arıza anında depoladığı enerjiyi arızaya doğru geri boşaltmakta ve kısa devre akımını ters yönlü beslemektedir.

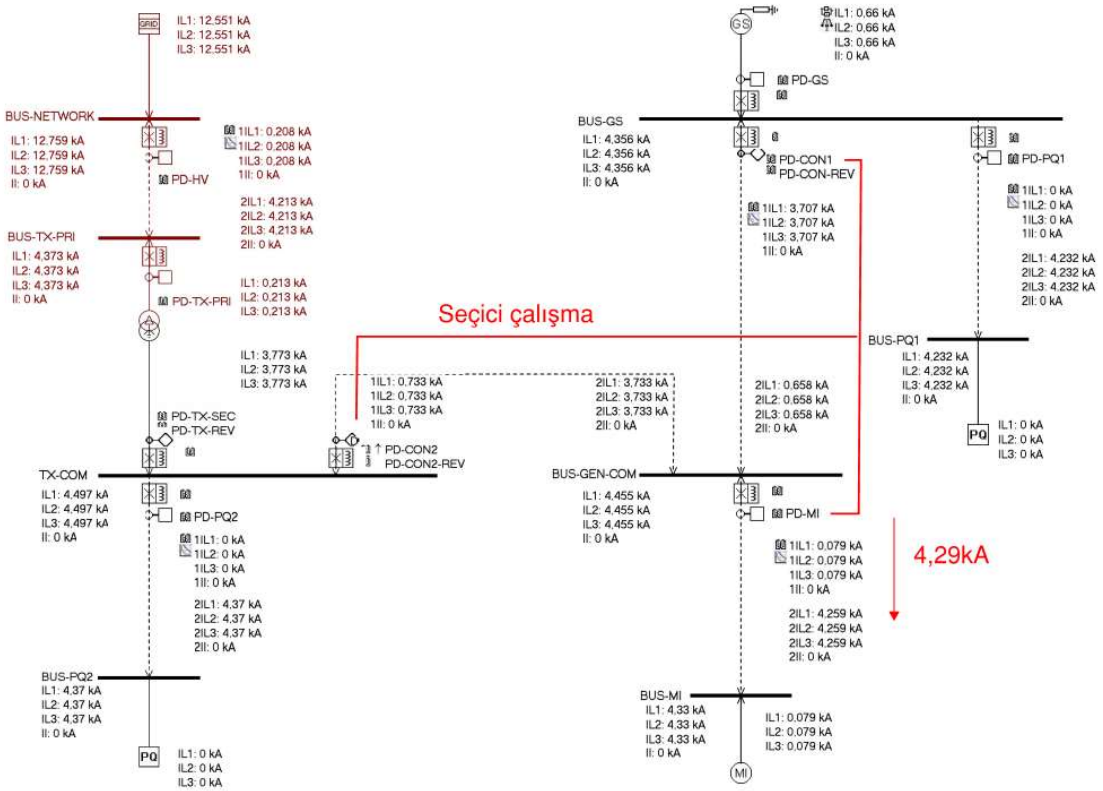
5.2.2 Koruma ve Seçicilik Koordinasyonu

Bu bölümde kısa devre analizi yapılan 6 arıza noktası için koruma koordinasyonu ve seçicilik çalışması yapılacaktır.

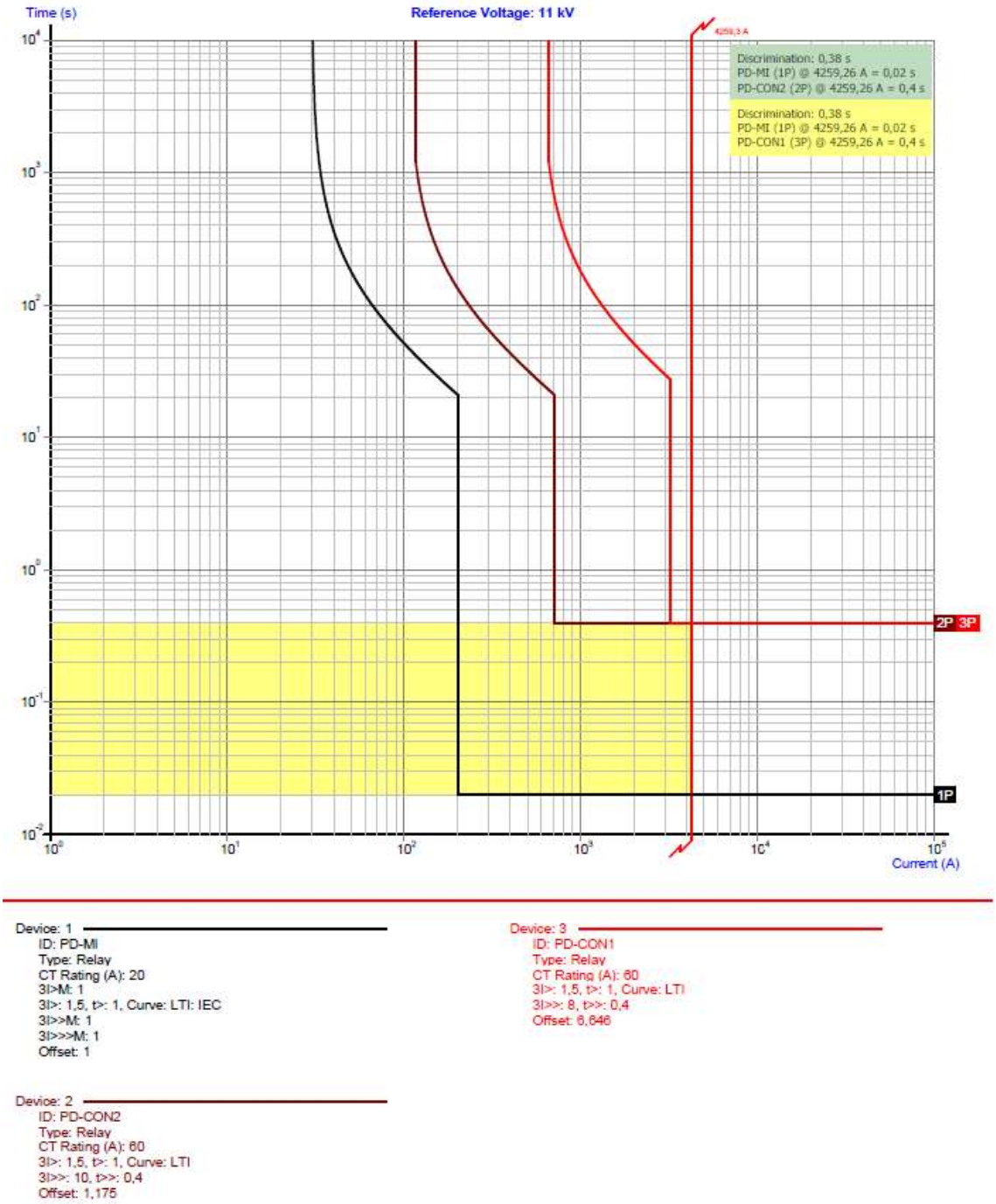
- **Arıza-1**

Arıza-1 MI barasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5. 26'den görüleceği üzere bu baradaki kısa devre şebeke ve jeneratörden beslenmektedir.

Koruma rölesinden beklenen arızayı en kısa sürede temizlemektir. Böylece kaynağa daha yakın üst sıradaki röleler ile seçici çalışabilecek ve sistemin kararlılığının sürmesini sağlayacaktır.



Şekil 5. 26 ÇS-1 1.arıza çalışması tek hat şeması

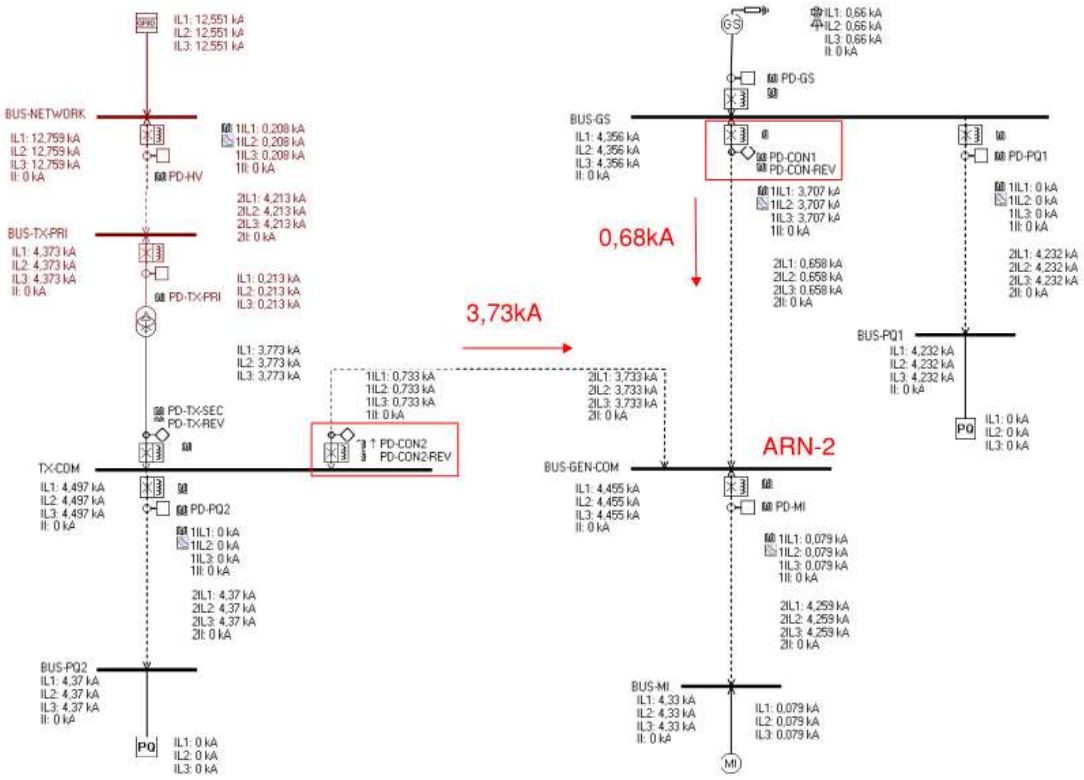


Şekil 5. 27 ÇS-1 1.arıza çalışması akım-zaman eğrileri

PD-MI rölesi ayar sahası ve PD-CON2 ile PD-CON1 röleleri ile zaman bazlı seçici çalışması şekil 5. 27'de gösterilmiştir. PD -MI rölesi bu seçicilik sağlamak için anlık açma yapmaktadır. Röle 0,02 sn. de kesiciye açtırma sinyali gönderir. Kesici 0,95 ms. de devreyi ayırır. Toplam 0,115 sn. de operasyon tamamlanır.

- **Arıza-2**

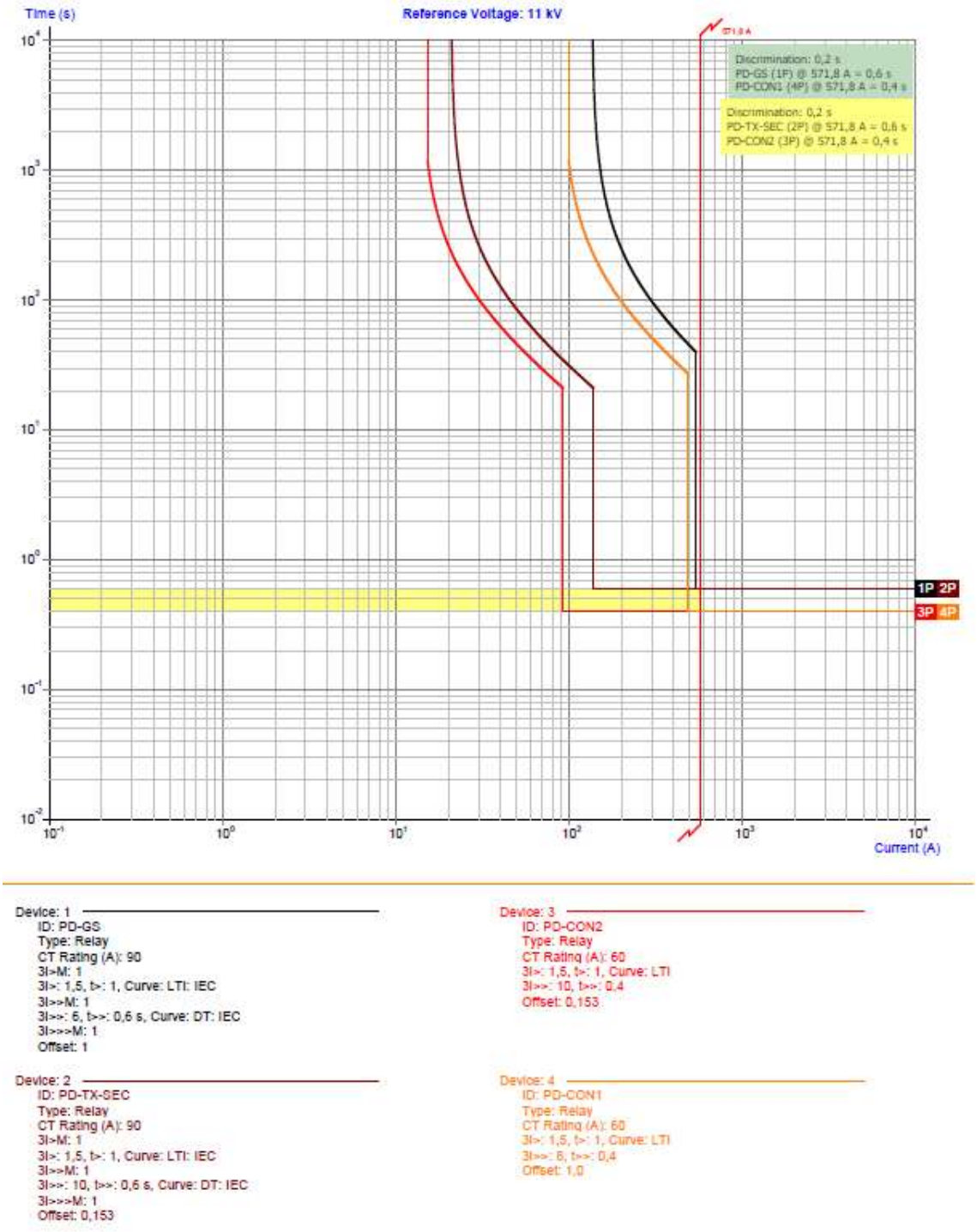
Arıza-2 GEN-COM barasında gerçekleştirilmiştir. Bu kısa devre arızasında enerji sürdürülebilirliği ve koruma koordinasyonu açısından beklenen PD-CON1 ve PD-CON2 röle ve kesicilerinin arızayı en kısa sürede temizlemesidir. Bu sayede sistemindeki sağlıklı baralarda enerji sürekliliği devam edecektir.



Şekil 5. 28 ÇS-1 2.arıza çalışması tek hat şeması

PD-CON1 ve PD-CON2 aşırı akım röleleri bir üst sıradaki PD-TXSEC ve PD-GS röleleri ile seçici çalışmaktadır. Bu röleler arasında zaman bazlı seçicilik sağlanmıştır. CON1 ve CON2 röleleri yüke daha yakın röleleri ile seçicilik sağlamak için aşırı akım açma zamanları 0,2 sn. gecikmelidir. Arıza-2 çalışmasında 0,2 sn. içerisinde bu röleler tarafından açma sinyali verilir. Kesici 0,95 sn. de arızayı temizler. 2,95 sn. içerisinde hata giderilir.

TX-SEC ve TC-GEN röleleri de CON1 VE CON2 röleleri ile seçici çalıştırılması gerekmektedir. Bu rölelerin seçici çalışabilmesi için minimum güvenli zaman farkı 0,2 sn.dir. Şekil 5. 29 de akım-zaman eğrileri verilmiştir.



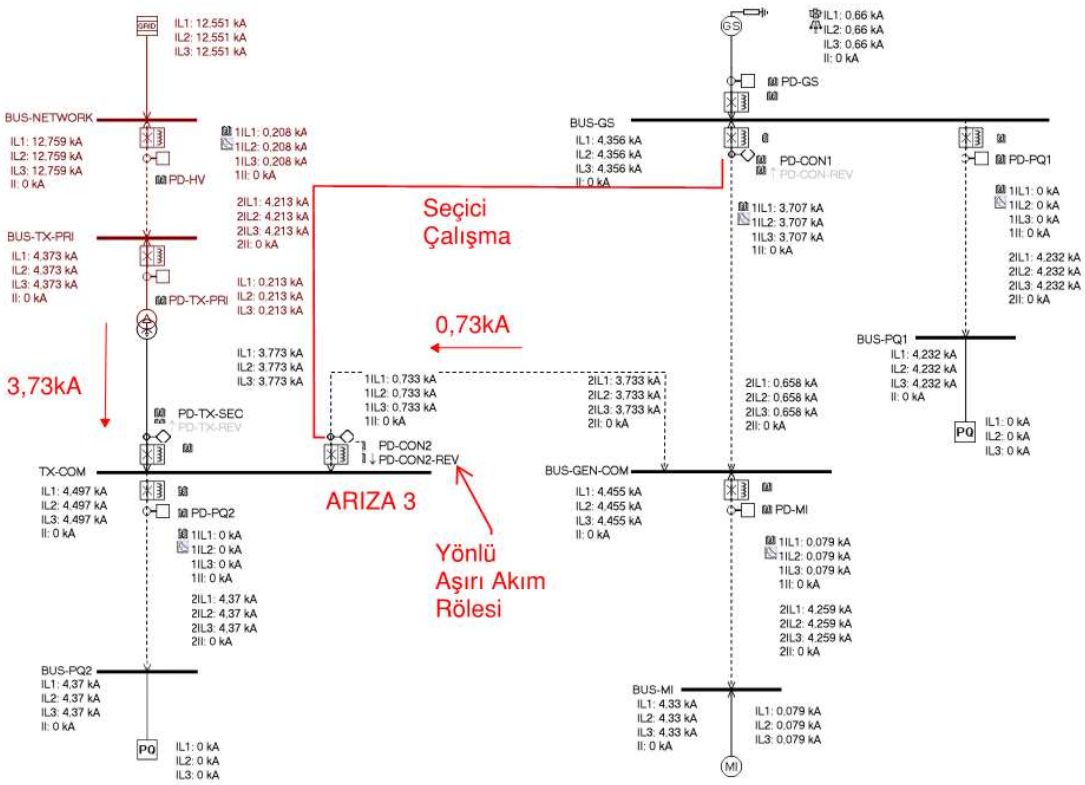
Şekil 5. 29 ÇS-1 2.arıza çalışması akım-zaman eğrileri

- **Arıza-3**

Arıza 3 TX-CON barasında faz toprak kısa devresi gerçekleştirilmiştir. Bu kısa devre arızasında koordinasyonu sağlanmış bir sistemden beklenen hataya en yakın kesicilerin devreyi temizlemesi ve sağlıklı baralarda enerji sürekliliğinin sağlanmasıdır. Hatayı izole edecek koruma röleleri PD-TX-SEC ve PD-CON2 röleleridir. Bu röleler şebeke ve senkron

jeneratörün hata yolundaki devrelerini açarlar. Senkron jeneratör ada çalışma modunda GN-CON1 ve PQ baralarına enerji sağlamaya devam eder.

Arıza-3 koruma koordinasyonun özellikle dikkat edilmesi gereken PD-CON2 rölesi iki farklı yönde farklı kısa devre akımlarına maruz kalır. Arıza 1 ve 2 de hata noktası doğru 3,7kA geçiyorken arıza 3 de 0,67kA geçmektedir. Bu durumda yönsüz koruma olmaksızın seçiciliği sağlamak mümkün değildir. CON1 rölesi ile seçiciliği sağlamak amacıyla CON2 rölesi yönlü aşırı akım olarak seçilmiştir. Tek hatta rölenin yönlü özelliği CON2-REV olarak isimlendirilmiştir. Enterkonnekte şebekeye doğru olan aşırı akım beslemelerinde yönlü role 0,2 saniyede anlık açma yapacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede CON1 rölesi açma sinyali iletemeden jeneratörden beslenen hata akımı temizlenmiş olur. Şekil 5. 30 de kısa devre akımları verilmiştir.



Şekil 5. 30 ÇS-1 3.arıza çalışması tek hat şeması

CON2 yönlü aşırı akım rölesi 0,2 saniye zaman gecikmeli seçilmiştir. Bu süre sonunda kesiciye açma sinyali iletir. Kesici 0,95 sn. içerisinde arızayı temizler. Hata noktası 2,95 sn. içerisinde senkron jeneratörden izole edilir. Böylece senkron jeneratöre bağlı sağlık baralarda gerilim ve frekans sürekliliği sağlanmaya çalışılır.

TX-SEC rölesi ise 0,6 saniye zaman gecikmelidir. Bu sürenin ardından açma sinyali iletir ve 0,695 sn. içerisinde arıza şebekeden de izole edilir.

Şekil 5. 31 de seçicilik sonuçları görünmektedir.

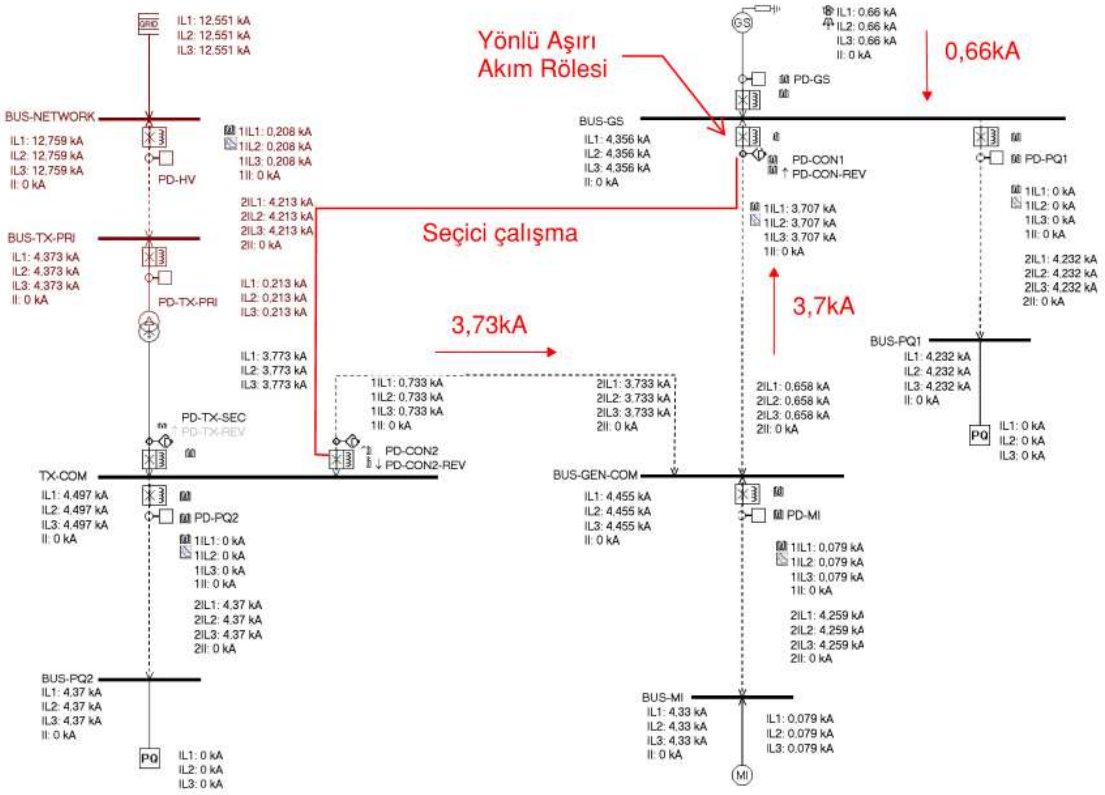
```
ERACS Protection Module by RINA Consulting. ERACS Version: 3.9.8. Protection Version: 3.9.8
Run on 11-May-2018 by Supervisor from data set up on 11-May-2018 by Supervisor
Network Name    : thesis_model_1
Data State Name : thesis_model_1
Study Name      : SM_3F_TX_COM
Stage Number = 1. Stage Duration = 0.200(s). Stage Finish Time = 0.200(s).
Device with ID PD-CON2-REV is about to operate
Stage Number = 2. Stage Duration = 0.095(s). Stage Finish Time = 0.295(s).
Circuit breaker with ID SW-CON2 is about to operate
Stage Number = 3. Stage Duration = 0.305(s). Stage Finish Time = 0.600(s).
Device with ID PD-TX-SEC is about to operate
Stage Number = 4. Stage Duration = 0.095(s). Stage Finish Time = 0.695(s).
Circuit breaker with ID SW-TX-SEC is about to operate
Stage Number = 5. Stage Duration = 0.000(s). Stage Finish Time = 0.695(s).
No devices operating - the fault has been cleared
Calculation successful
```

Şekil 5. 31 ÇS-1 3.arıza çalışması sonuçları

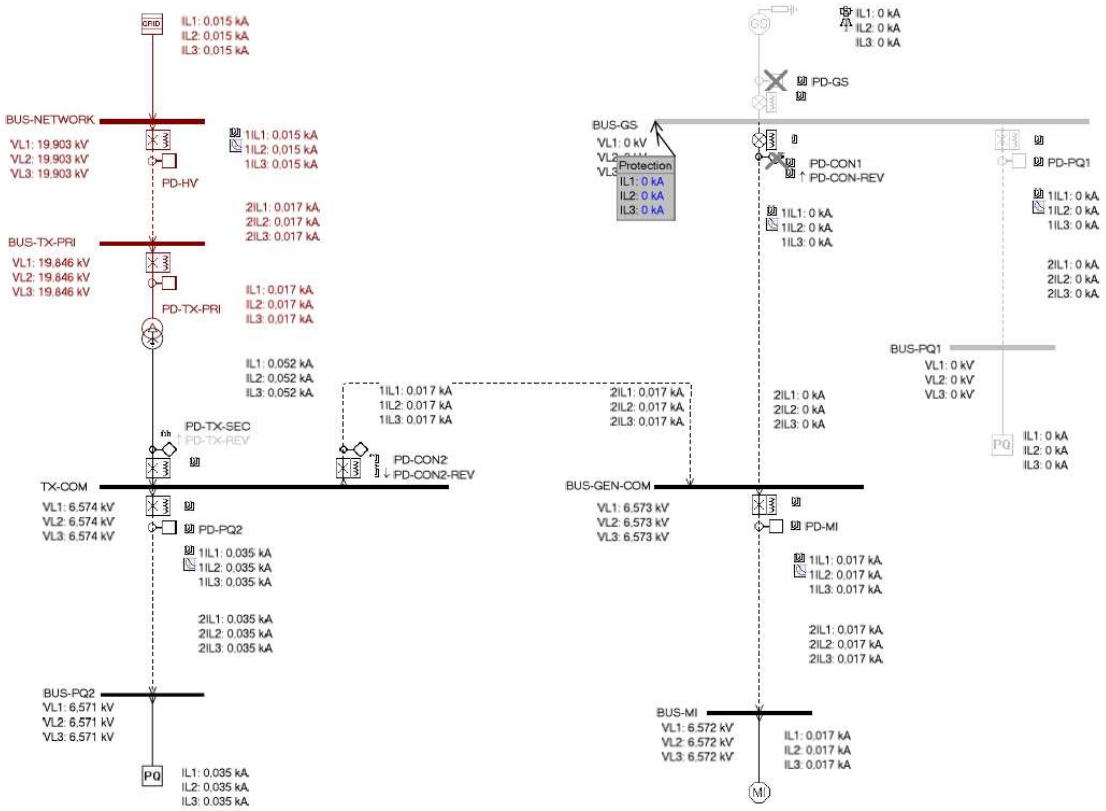
- **Arıza-4**

Arıza 4 GS barasında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada koruma sisteminden beklenen GS barasıdaki hatanın en hızlı şekilde şebekeden izole edilmesidir. Bu sayede şebekeden beslenen baralarda enerji sürekliliği sağlanır. Bir önceki çalışmada CON2 rölesine benzer şekilde CON1 rölesi de iki farklı yönde farklı kısa devre akımına maruz kalmaktadır. CON2 ile arasında seçiciliği sağlamak amacıyla CON1 rölesi yönlü tip seçilmelidir. Diyagramda bu yönlü röle CON1-REV olarak isimlendirilmiştir. Jeneratöre doğru olan aşırı akımlarda daha hızlı açma sağlayacak bir ayar kademesi ile bu seçicilik sağlanır. Bu sayede TX-COM ve GS-COM barasına bağlı yükler enerji kesintisine maruz kalmazlar. CON1 yönlü aşırı akım rölesinin arızayı şebekeden izole etmesinin ardından hata sadece senkron jeneratör tarafından beslenmeye devam eder. GS rölesi 0,6 saniye gecikmeli olarak açma sinyali göndererek hatanın tamamen izole edilmesini sağlar. Şekil 5. 32 de akım yönleri

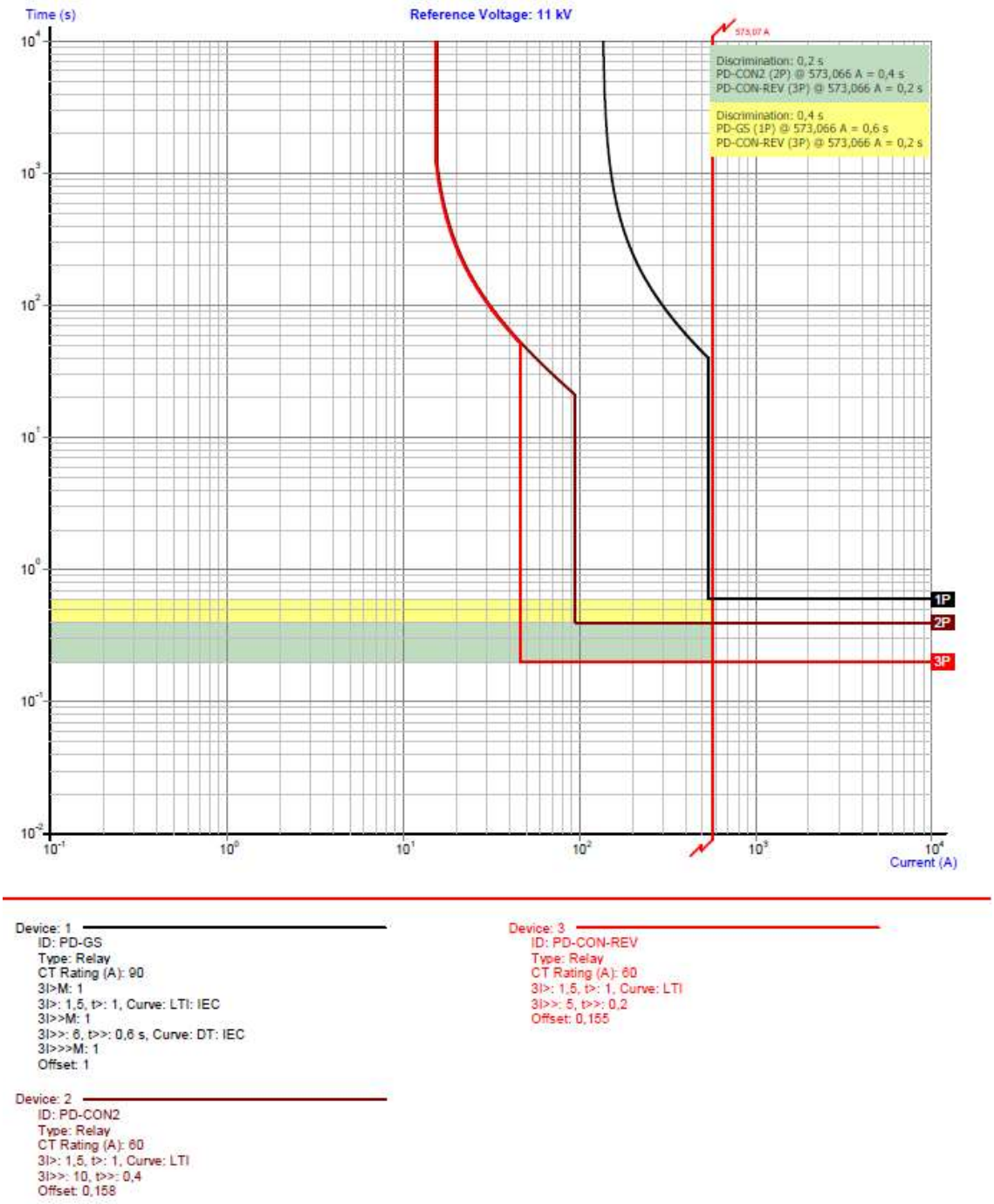
ve seçici çalışma gösterilmiştir. Şekil 5. 33 de 0,695sn ardından hata noktası izole edilmiş dağıtım sistemi gösterilmiştir.



Şekil 5. 32 ÇS-1 4.arıza çalışması tek hat şeması



Şekil 5. 33 ÇS-1 4.arıza çalışması koruma simülasyonu sonucu



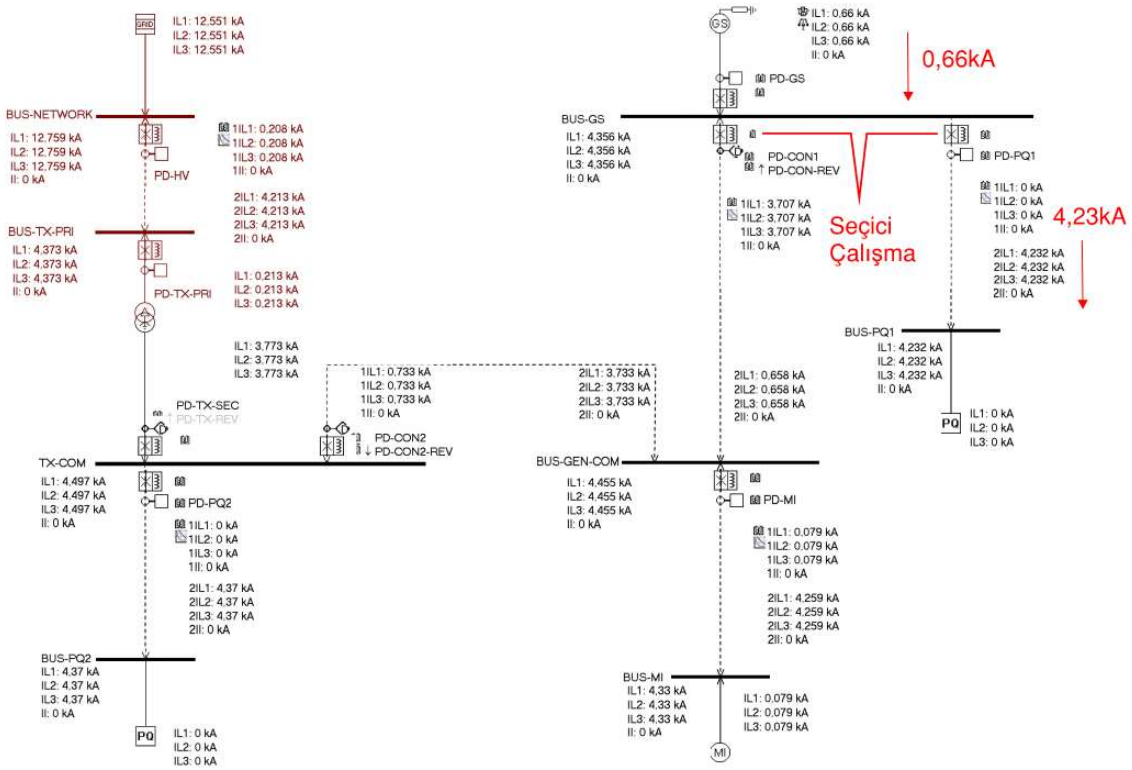
Şekil 5. 34 ÇS-1 4.arıza çalışması akım-zaman eğrileri

Şekil 5. 34 de hataya maruz kalan CON1-REV, CON2 ve GS aşırı akım rölelerinin seçicilikleri akım zaman eğrisinde gösterilmiştir.

- **Arıza-5**

Arıza 5 PQ1 barasında gerçekleştirilmiştir. Bu arıza analizinde koordinasyonlu koruma sisteminden beklenen çalışma hatanın en hızlı şekilde sistemden izole edilmesidir. Böylece enterkonnekte şebeke ve jeneratörden beslenen diğer baralarda enerji sürekliği sağlanacaktır. Bu sebepten PD-PQ1 aşırı akım koruma rölesi, hataya maruz kalan diğer röleler açtırma sinyali iletmeden hatayı temizlemelidir.

Hata devresinin üst sırasındaki röleler ile seçiciliği sağmak için PQ1 rölesinin aşırı akım anlık açtırma kademesi aktif edilmiştir.



Şekil 5. 35 ÇS-1 5.arıza çalışması tek hat şeması

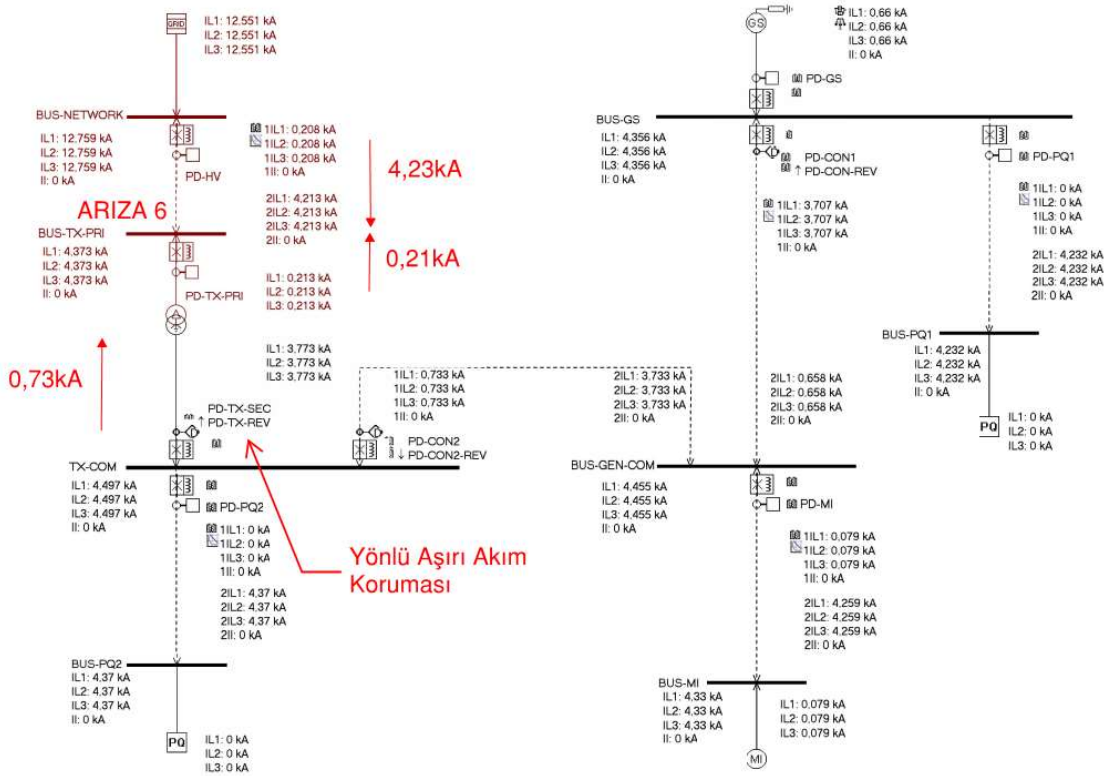
```
ERACS Protection Module by RINA Consulting. ERACS Version: 3.9.8. Protection Version:
3.9.8
Run on 11-May-2018 by Supervisor from data set up on 11-May-2018 by Supervisor
Network Name     : thesis_model_1
Data State Name  : thesis_model_1
Study Name       : SM_3F_PQ1
Stage Number = 1. Stage Duration = 0.020(s). Stage Finish Time = 0.020(s).
Device with ID PD-PQ1 is about to operate
Stage Number = 2. Stage Duration = 0.095(s). Stage Finish Time = 0.115(s).
Circuit breaker with ID SW-CON1 is about to operate
Stage Number = 3. Stage Duration = 0.000(s). Stage Finish Time = 0.115(s).
No devices operating - the fault has been cleared
Calculation successful
```

Şekil 5. 36 ÇS-1 4.arıza çalışması sonuçları

- **Arıza-6**

Arıza 6 transformatörün primer tarafında giriş barasında gerçekleştirilmiştir. Koruma sistemi arızayı senkron jeneratörün çalışmasını etkilemeyecek şekilde izole etmelidir. Bu sayede jeneratöre bağlı baralarda enerji sürekliliği sağlanır.

PD-TX-SEC yönlü aşırı akım rölesi olarak belirlenmelidir. Yönlü koruma özelliği ile arıza 6 noktasına doğru ters kısa devre akımı hızı bir şekilde senkron jeneratörden izole edilir. Daha sonra PD-HV aşırı akım rölesi arızayı enterkonnekte şebekeden izole eder.



Şekil 5. 37 ÇS-1 5.arıza çalışması tek hat şeması

Şekil 5. 38'deki ERACS koruma analizi raporundan görüleceği üzere yönlü aşırı akım rölesi PD-TX-REV hata akımına maruz kalmasının ardından anlık olarak açtırma sinyalini kesiciye iletir. 0.125 sn. içerisinde hata noktası jeneratör beslemesinden izole edilir. Ardından yüksek gerilim rölesi ve kesicisi devreyi 1,03 saniyede tamamen izole eder.

```
ERACS Protection Module by RINA Consulting. ERACS Version: 3.9.8. Protection Version:
3.9.8
Run on 11-May-2018 by Supervisor from data set up on 11-May-2018 by Supervisor
Network Name    : thesis_model_1
Data State Name : thesis_model_1
Study Name      : SM_3F_TX_PRI
Stage Number = 1. Stage Duration = 0.030(s). Stage Finish Time = 0.030(s).
Device with ID PD-TX-REV is about to operate
Stage Number = 2. Stage Duration = 0.095(s). Stage Finish Time = 0.125(s).
Circuit breaker with ID SW-TX-SEC is about to operate
Stage Number = 3. Stage Duration = 0.875(s). Stage Finish Time = 1.000(s).
Device with ID PD-HV is about to operate
Stage Number = 4. Stage Duration = 0.030(s). Stage Finish Time = 1.030(s).
Circuit breaker with ID SW-HV is about to operate
Stage Number = 5. Stage Duration = 0.000(s). Stage Finish Time = 1.030(s).
No devices operating - the fault has been cleared
Calculation successful
```

Şekil 5. 38 ÇS-1 4.arıza çalışması sonuçları

5.2.3 Geçici Durum Gerilim-Frekans Analizi

Bu bölümde bölüm 5.2 de detaylıca tanımlanan arıza çalışmaları için devre kesme süreleri dikkate alınarak geçici durum analizi yapılacaktır.

Her arıza çalışması için geçici durum analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde 1. saniyede simetrik üç fazlı kısa devre oluşturulmuş ve kesicilerin koruma koordinasyonunda belirlenen sürelerde devreyi açarak arızayı temizlemesi sağlanmıştır. Bu geçici durum süresince yük baralarının ve senkron jeneratörün gerilim-frekans eğrileri izlenmiştir.

Arıza-1, arıza-4 ve arıza-5 analizleri benzer sonuçlar vermiştir. Tanımlanan sürede temizlenen hatanın ardından sistem kararlı bir şekilde çalışmasına devam etmiştir.

Arıza-2, arıza-3 ve arıza-6 da kendi içlerinde benzer sonuçlar vermiştir. Bu üç analizde jeneratör ada modunda sistemi beslemeye devam etmiştir.

Benzer sonular sebebiyle bu bölümde arıza-1 ve arıza-2 geçici durum analizleri tanımlanacaktır.

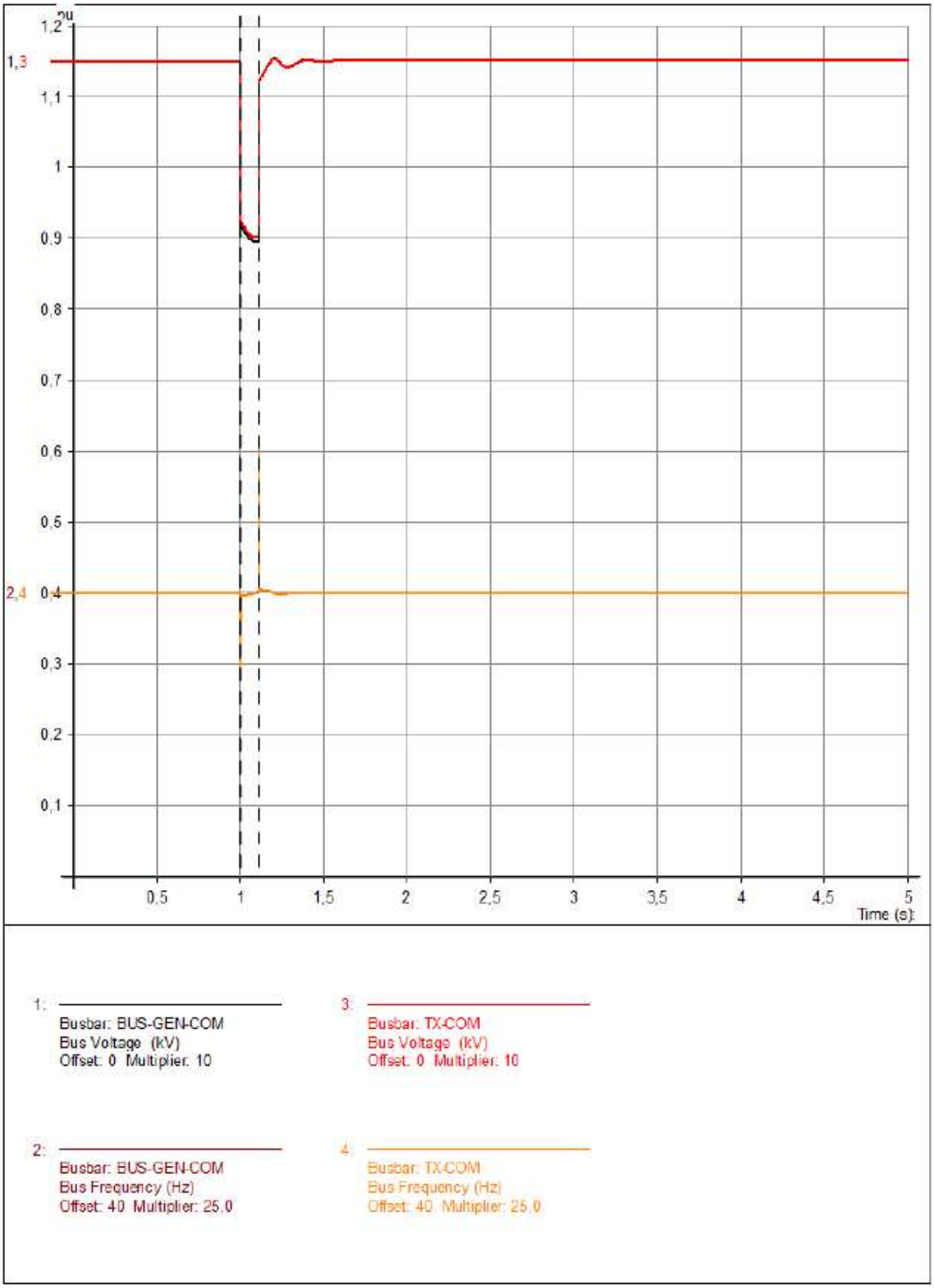
- **Arıza-1 Geçici Durum Analizi**

Hata koruma analizi bölümünde tanımlandığı üzere 0,115sn. içerisinde temizlenmektedir.

Bu çalışmanın TX-COM barasındaki V-f ile senkron jeneratörün V-f-P-Q etkisi aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Faklı birimlerin aynı eğride gösterilmesini sağlamak amacıyla pu-sn kartezyeni kullanılmıştır.

Çizelge 5. 8 ÇS-1 arıza-1 geçici durum olay-zaman senaryosu

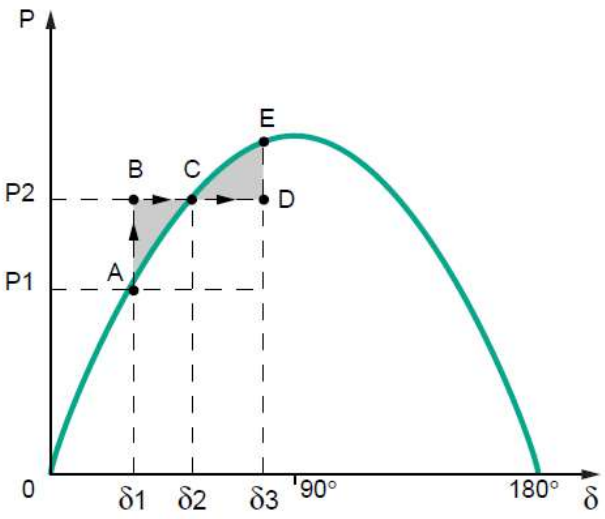
Zaman	Olay
1.sn	BUS-MI barasında simetrik arıza
1.115sn.	SW-MI kesicinin devreyi açarak arızayı kaldırılması
5sn	Simülasyonun sonlandırılması



Şekil 5. 39 ÇS-1 1. geçici durum analizi V-f eğrileri

Her iki barada da kısa devre anında gerilim ve frekansta düşme gözlemlenmiştir. Kısa devrenin hızlı bir şekilde elimine edilmesi ise gerilim salınım yaparak kararlı hale gelmiştir. Frekans da benzer şekilde arızanın temizlenmesinin ardından yükselmiş ve tekrar kararlı duruma gelmiştir.

Senkron jeneratörler kararlılık de basitçe ifade edilirse $P-\delta$ güç ve mekanik açı arasındaki eş alan kriterine göre analiz edilir. Şekil 5. 40' da görüleceği üzere örnek bir sistemde mekanik güç değişimi takip eden jeneratörün P1 gücünden P2 gücüne çıkması beklenmektedir. Atalet momenti sebebiyle makine sırasıyla B-C-D noktalarına ardından yavaşlayarak tekrar C noktasına dönecektir. Gri ile taralı alanların birbirlerine eşit olması makinenin kararlığı olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 5. 40 $P-\delta$ senkron makine kararlılık eğrisi

Senkron jeneratörler mekanik güç regülatörleri droop kontrol olarak isimlendirilen $P-f$ güç frekans regülasyonu sağlarlar. Güç ve frekans arasında ters orantı vardır.

Otomatik gerilim regülatörleri ise benzer şekilde droop kontrol ile $Q-V$ reaktif güç – gerilim kontrolü sağlarlar [57].

Tezin kapsamı ve amacı içerisinde olmadığı için kararlılık konusunda daha fazla bilgi verilmeyecektir.

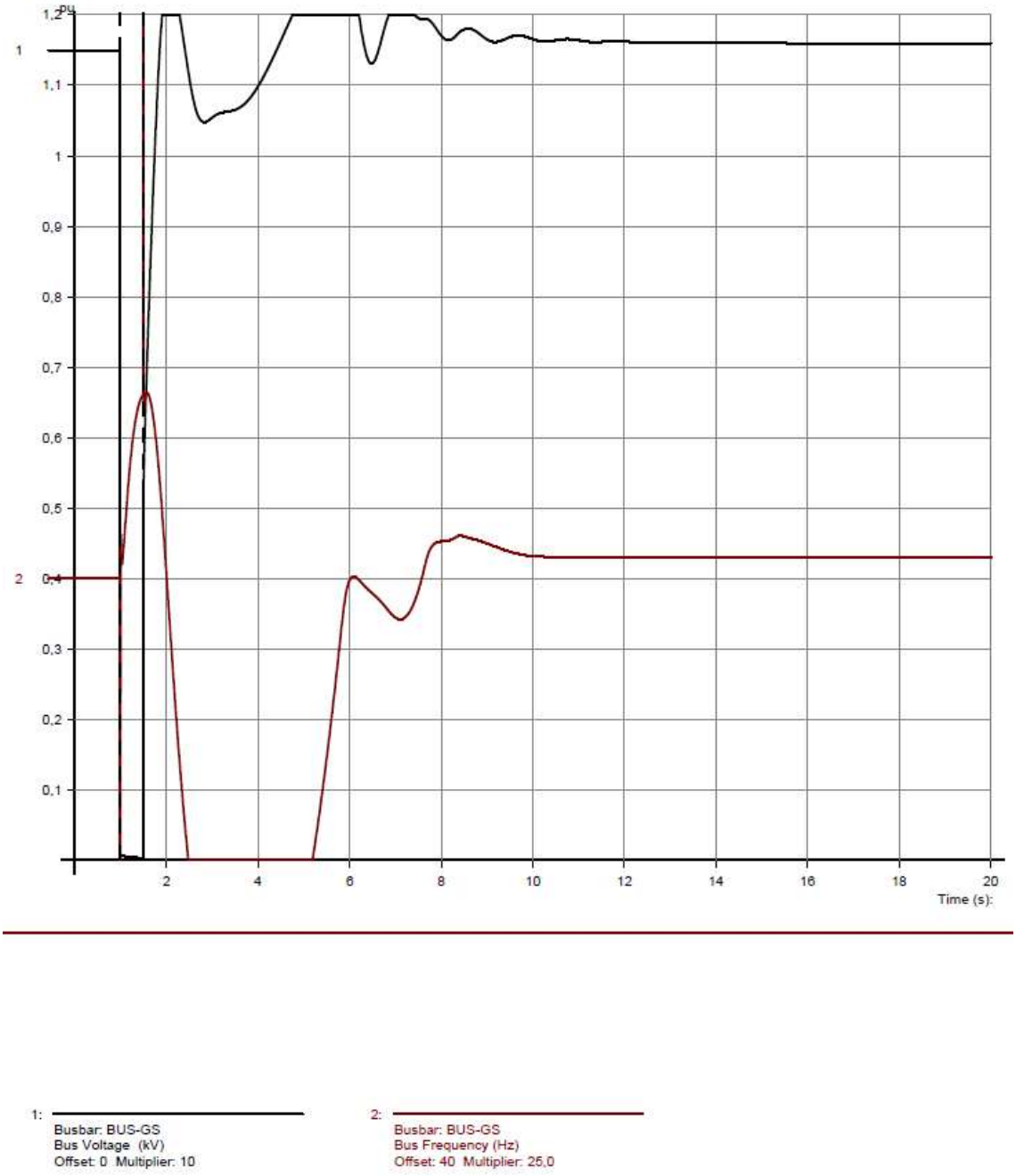
- **Arıza-2 Geçici Durum Analizi**

Bu çalışmada TX-CON barasındaki arıza PD-CON1 rölesi tarafından temizlenir. Hatanın temizlenmesinin ardından jeneratörün şebeke ile senkronizasyonu biter ve PQ1 barasını tek enerji kaynağı olarak besler.

Senkron jeneratör hatadan önce sabit $P - Q$ modunda çalıştırılmaktaydı. Ada çalışmada jeneratörün bu çalışma modundan çıkıp $V - \alpha$ gerilim-açı modunda veya salınım kaynağı olarak çalıştırılması gerekmektedir. Her iki çalışma modu için de geçici analiz yapılmış ve jeneratör çıkış baralarının gerilim ve frekansı izlenmiştir.

Çizelge 5. 9 ÇS-1 arıza-2 geçici durum olay-zaman senaryosu

Zaman	Olay
1 sn.	BUS-CON1 barasında simetrik arıza
1,495 sn.	SW-CON1 kesicinin devreyi açarak arızayı kaldırılması
20 sn.	Simülasyonun tamamlanması



Şekil 5. 41 ÇS-1 2.arıza geçici durum analizi BUS-GS barası V-f eğrileri

Jeneratör $V-\alpha$ çalışmada arızanın ardından 8. saniyeye kadar salınım yaptıktan sonra gerilim ve frekans kararlılığı sağlamıştır.

$P-Q$ çalışmada ise salınım 1. saniyelere kadar sürmüş ve gerilim-frekans değerleri sistemin kararlı durumundan $(11kV-50hz)$ daha yüksek bir değerde stabil kalmıştır. Buradan anlaşılacağı üzere istenmeyen ada çalışma durumlarında enerji sürekliliğinin

sürekli gereken hallerinde jeneratörün çalışma modu değiştirilmelidir. Ayrıca geçici durum analizleri ile oluşabilecek maksimum ve minimum gerilim-frekans değerleri yük açısından enerji kalitesi boyutuyla değerlendirilmelidir.

5.2.4 Çalışma Senaryosu-1 Sonuç

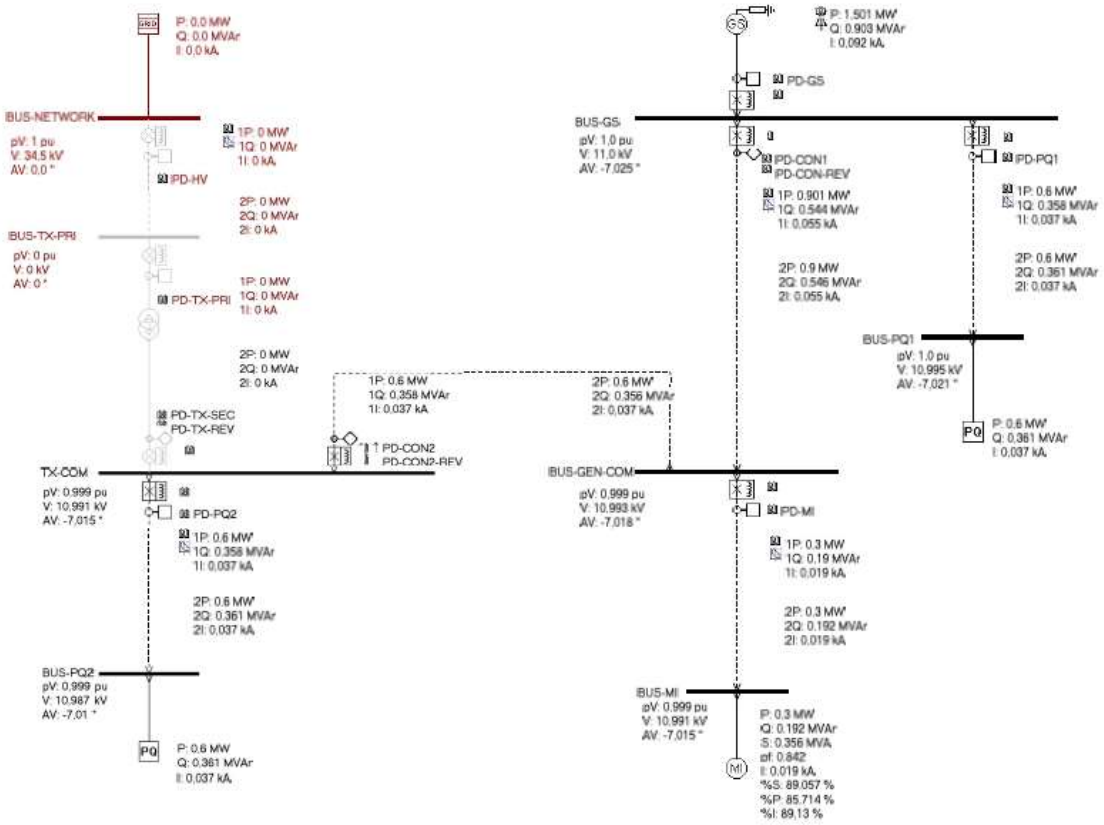
Aşırı akım ve yönlü aşırı akım röleleri ile şebeke ve senkron jeneratör gibi döner alanlı dağıtık üretim kaynaklarının koruma koordinasyonu güvenli bir şekilde sağlanmıştır.

5.3 Çalışma Senaryosu-2 (ÇS-2)

Çalışma senaryosu 2 de senkron jeneratör ada modunda çalıştırılmıştır. 1.senaryoda uygulanan bütün analizler sırasıyla 2. çalışma senaryosu için de gerçekleştirilmiştir.

5.3.1 Yük Akışı

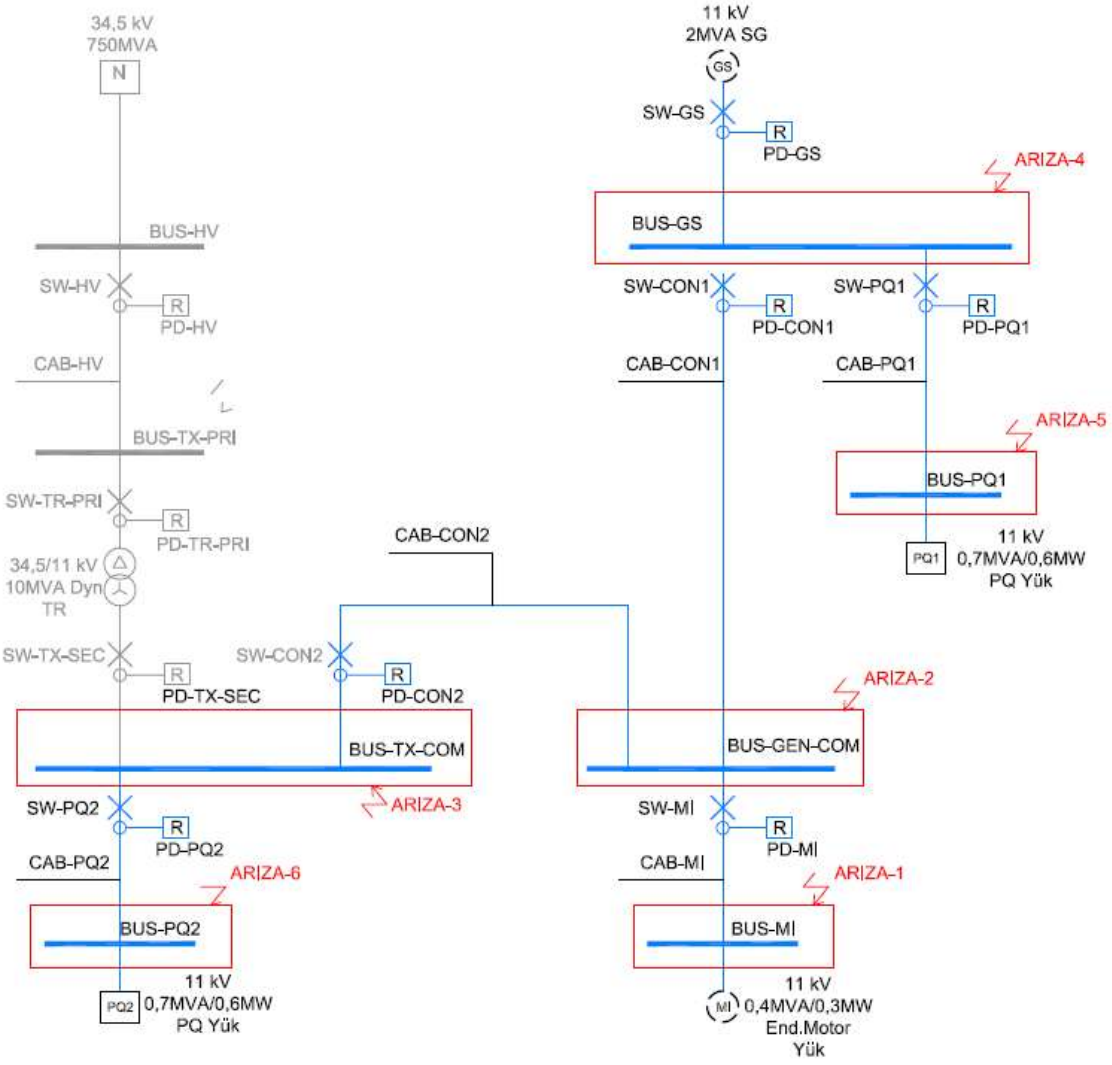
Senkron jeneratör ada çalışmada yük akış diyagramı şekil 5. 42 de gösterilmiştir.



Şekil 5. 42 ÇS-2 yük akışı simülasyonu sonuçları

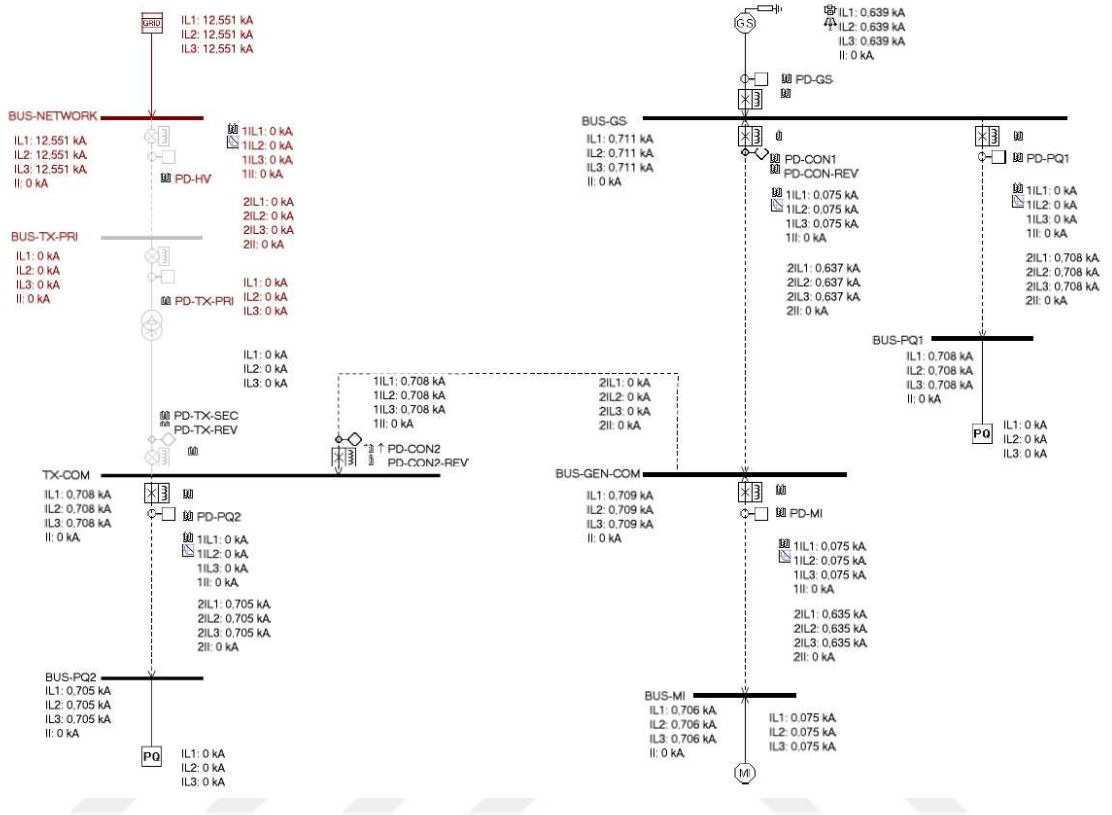
5.3.2 Kısa Devre Analizi

ÇS-2 de 6 adet arıza analizi gerçekleştirilmiştir. İlk 5 arıza ÇS-1 de ki ile aynı baralarda gerçekleştirilmiştir. 6 arıza noktası olarak BUS-HV barası artık modelimizde olmadığı için BUS-PQ2 barası kabul edilmiştir. Şekil 5. 43 de arıza noktaları gösterilmiştir. Şekil 5. 44'den görüleceği üzere ada çalışmada kısa devre akımları oldukça düşmektedir.



Şekil 5. 43 ÇS-2 kısa devre arıza noktaları

- **Üç fazlı kısa devre hesabı**



Şekil 5. 44 ÇS-1 üç fazlı kısa devre analizi sonuçları

5.3.3 Koruma ve Seçicilik Koordinasyonu

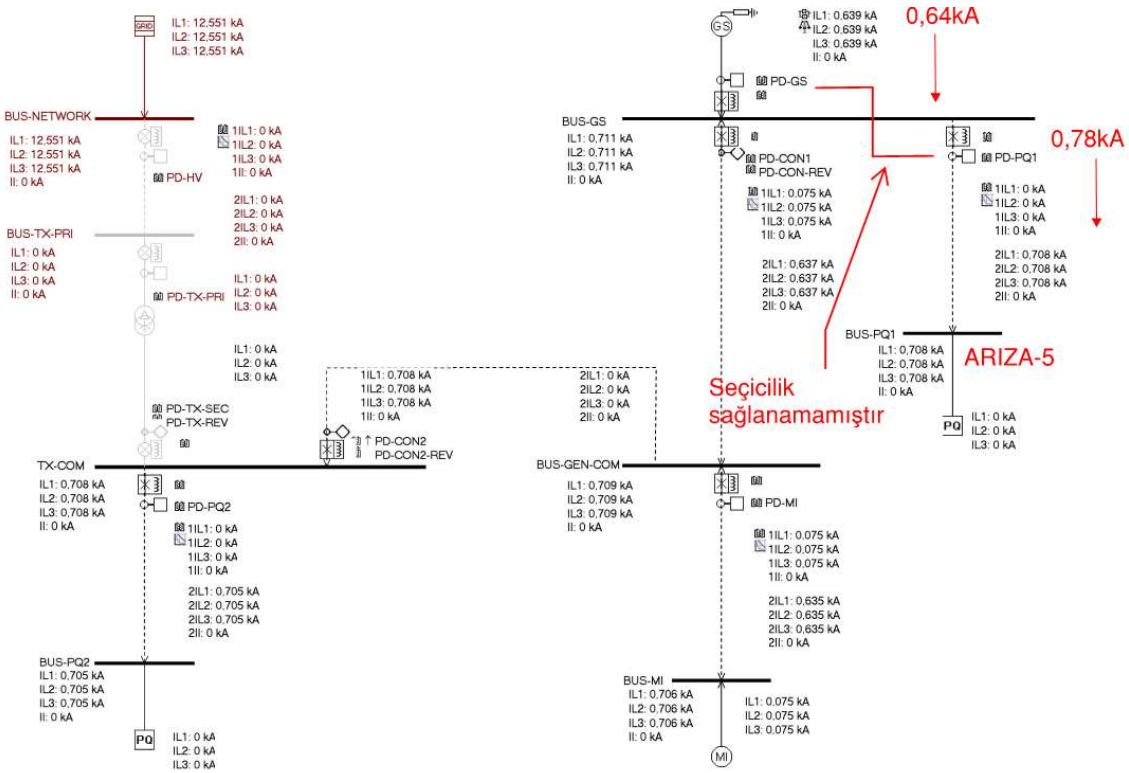
ÇS-2 da şekil 5. 43 de görülen 6 bara noktasında kısa devre koruma koordinasyonu gerçekleştirilmiştir.

Arıza-1-2-3 ve 4 çalışmalarında ÇS-1 ile aynı sonuca ulaşılmıştır. Arıza-5 ve 6 da ise koruma koordinasyonu bozulmuş ve kararlılık problemi ile karşılaşılmıştır.

- **Arıza-5**

BUS-PQ1 barasında meydana gelen üç faz kısa devre akımında PD-GS ve PD-PQ1 röleleri aynı zamanda açma sinyali vermektedirler. ÇS-1 de PD-PQ1 aşırı akım rölesi yüksek kısa devre akımlarına maruz kalmakta ve koordinasyon sağlamak amacıyla bu röleden kısa devre anında anlık açtırma yapması beklenmekteydi. Bu sayede PD-GS ve PD-CON1-REV ters zamanlı rölesi ile seçici çalışabiliyordu. ÇS-2 de ise arıza akımının oldukça azaldığı

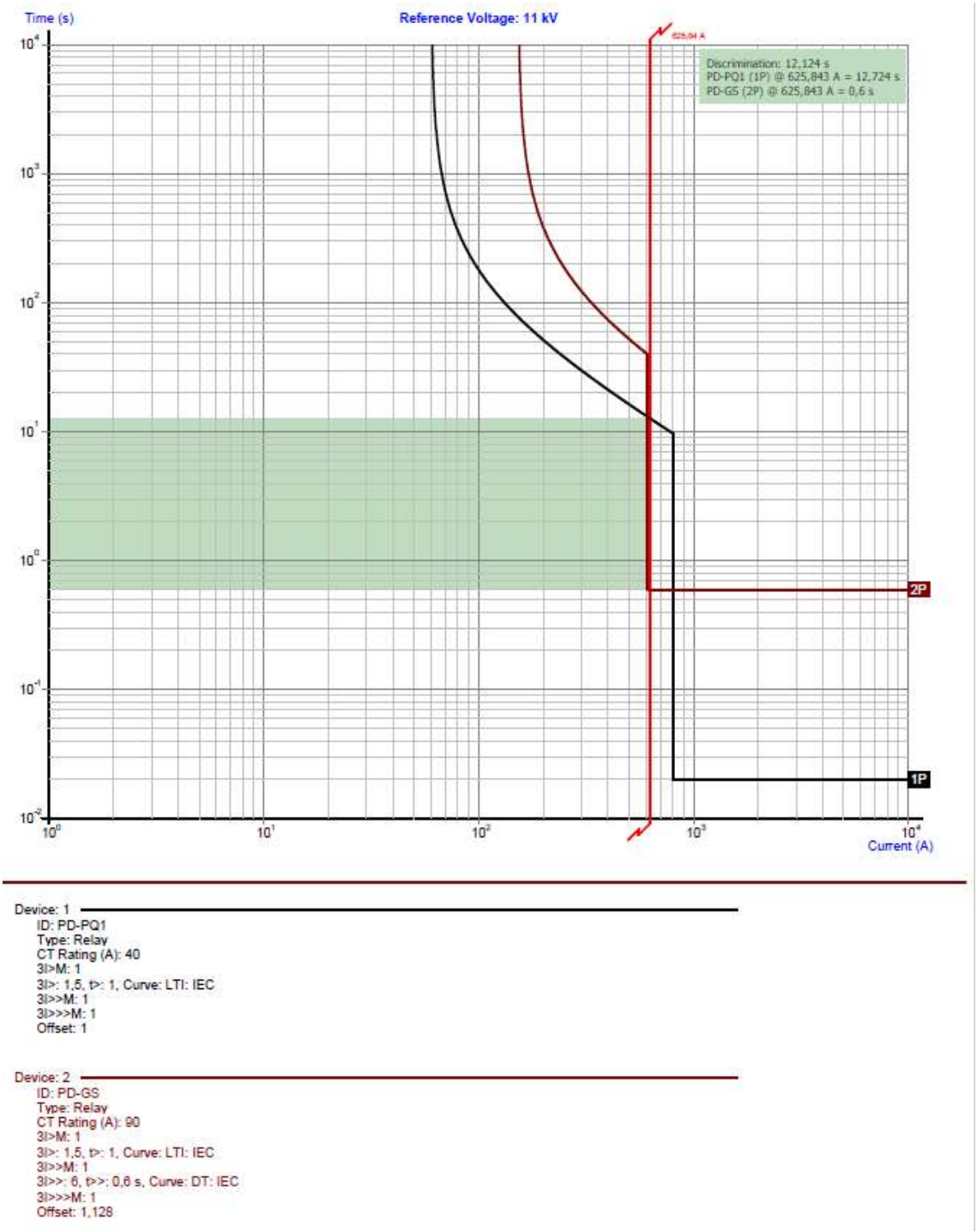
görülmüştür. PD-GS ve PD-PQ1 rölelerinin benzer kısa devre akımlarına maruz kalmasından ve PD-PQ1 röle ayarlarının daha büyük akımlara göre ayarlanmasından dolayı iki röle arasındaki seçicilik sağlanamamıştır. Şekil 5. 45 ve 5. 46 da kısa devre akım yönleri ve simülasyon sonucu görünmektedir. Şekil 5. 47 de ise iki şalterin akım zaman eğrileri verilmiştir.



Şekil 5. 45 ÇS-2 5.arıza çalışması tek hat şeması

```
ERACS Protection Module by RINA Consulting. ERACS Version: 3.9.8. Protection Version:
3.9.8
Run on 12-May-2018 by Supervisor from data set up on 19-Nis-2018 by Supervisor
Network Name    : thesis_model_3
Data State Name : thesis_model_3
Study Name      : SM_3F_PQ1
Stage Number = 1. Stage Duration = 0.600(s). Stage Finish Time = 0.600(s).
Device with ID PD-GS is about to operate
Stage Number = 2. Stage Duration = 0.095(s). Stage Finish Time = 0.695(s).
Circuit breaker with ID SW-0008 is about to operate
Stage Number = 3. Stage Duration = 0.000(s). Stage Finish Time = 0.695(s).
No devices operating - the fault has been cleared
Calculation successful
```

Şekil 5. 46 ÇS-2 5.arıza çalışması sonuçları



Şekil 5. 47 ÇS-2 5.arıza çalışması akım-zaman eğrileri

- **Arıza-6**

Arıza-6 Bus-PQ2 barasında üç fazlı kısa devre akımı gerçekleştirilmiştir. Bu arıza PR-CON2-REV ters zamanlı aşırı akım rölesi ve PD-GS röleleri tarafından temizlenebilmiştir. Fakat doğru bir koruma koordinasyonu sağlamak için PD-PQ2 rölesinin arızayı TX-CON2 ana barasından izole etmesi gerekmektedir. Bunun başlıca sebepleri;

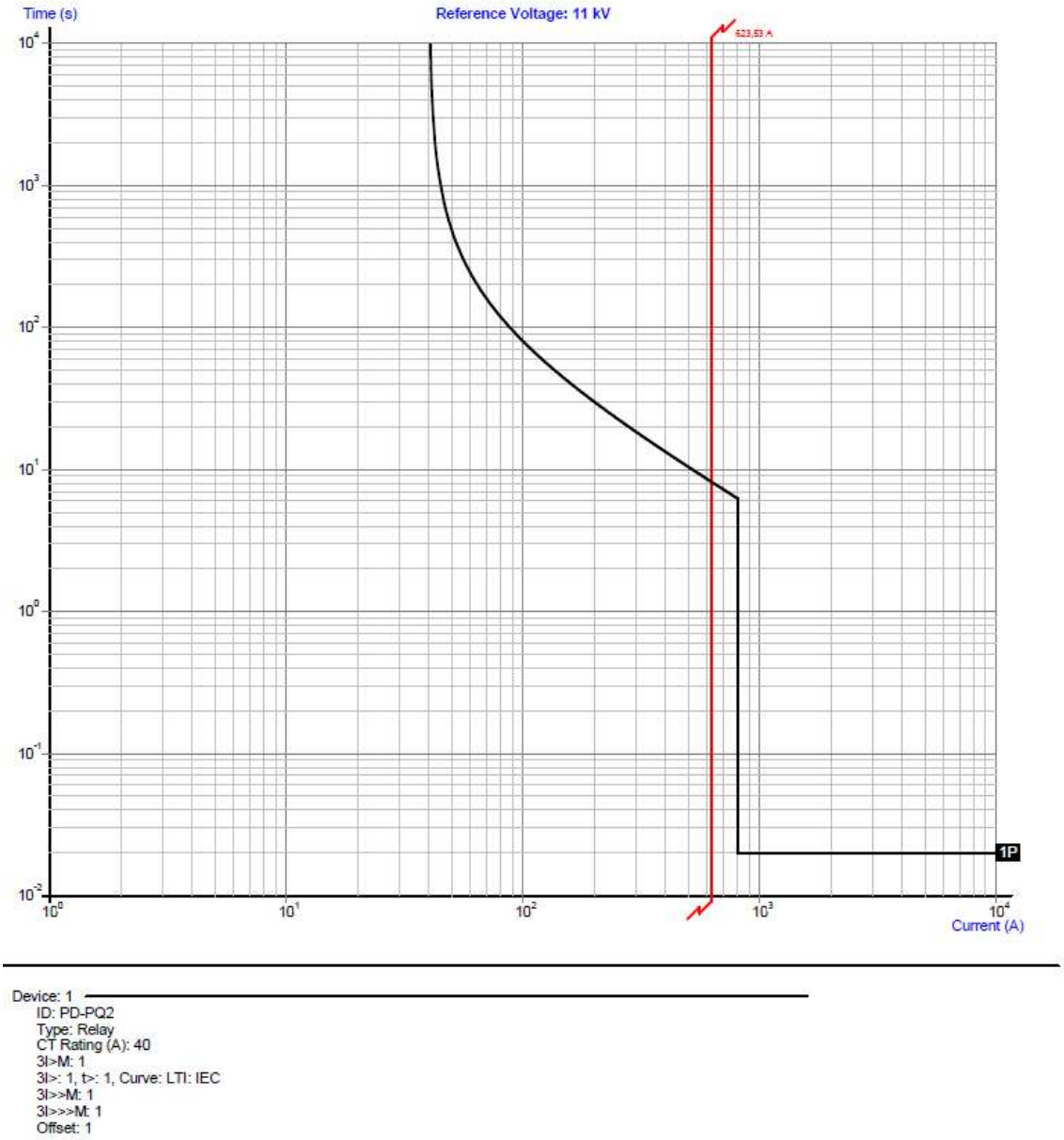
- Arıza ana baradan izole edilmediği için ana bara ikincil bir kaynak tarafından toprak üzerinden beslenebilir.
- Literatürde yedekli koruma (back-up protection) olarak geçen koruma yöntemi gereği arıza üzerindeki rölelerden birinin görevini yapamamasına karşın bir diğer röle hatayı güvenli bir şekilde temizleyebilmelidir.

Bu sebepten diğer röleler pasif duruma getirilerek PQ2 aşırı akım koruma rölesinin arızayı 8,321sn. de giderebildiği tespit edilmiştir.

Dağıtım sistemimiz oldukça uzun bir süre kısa devreye maruz kalmış ve standartlarda tanımlanan açma sürelerini sağlayamamıştır. Ayrıca geçici analiz bölümünde görüleceği üzere sistemin gerilim-frekans kararlılığı da kaybolmuştur.

```
ERACS Protection Module by RINA Consulting. ERACS Version: 3.9.8. Protection Version:
3.9.8
Run on 12-May-2018 by Supervisor from data set up on 12-May-2018 by Supervisor
Network Name    : thesis_model_3
Data State Name : thesis_model_3
Study Name      : SM_3F_PQ2
Stage Number = 1. Stage Duration = 8.226(s). Stage Finish Time = 8.226(s).
Device with ID PD-PQ2 is about to operate
Stage Number = 2. Stage Duration = 0.095(s). Stage Finish Time = 8.321(s).
Circuit breaker with ID SW-0002 is about to operate
Stage Number = 3. Stage Duration = 0.000(s). Stage Finish Time = 8.321(s).
No devices operating - the fault has been cleared
Calculation successful
```

Şekil 5. 48 ÇS-2 6.arıza çalışması sonuçları



Şekil 5. 49 ÇS-2 6.arıza çalışması akım-zaman eğrileri

5.3.4 Geçici Durum Gerilim-Frekans Analizi

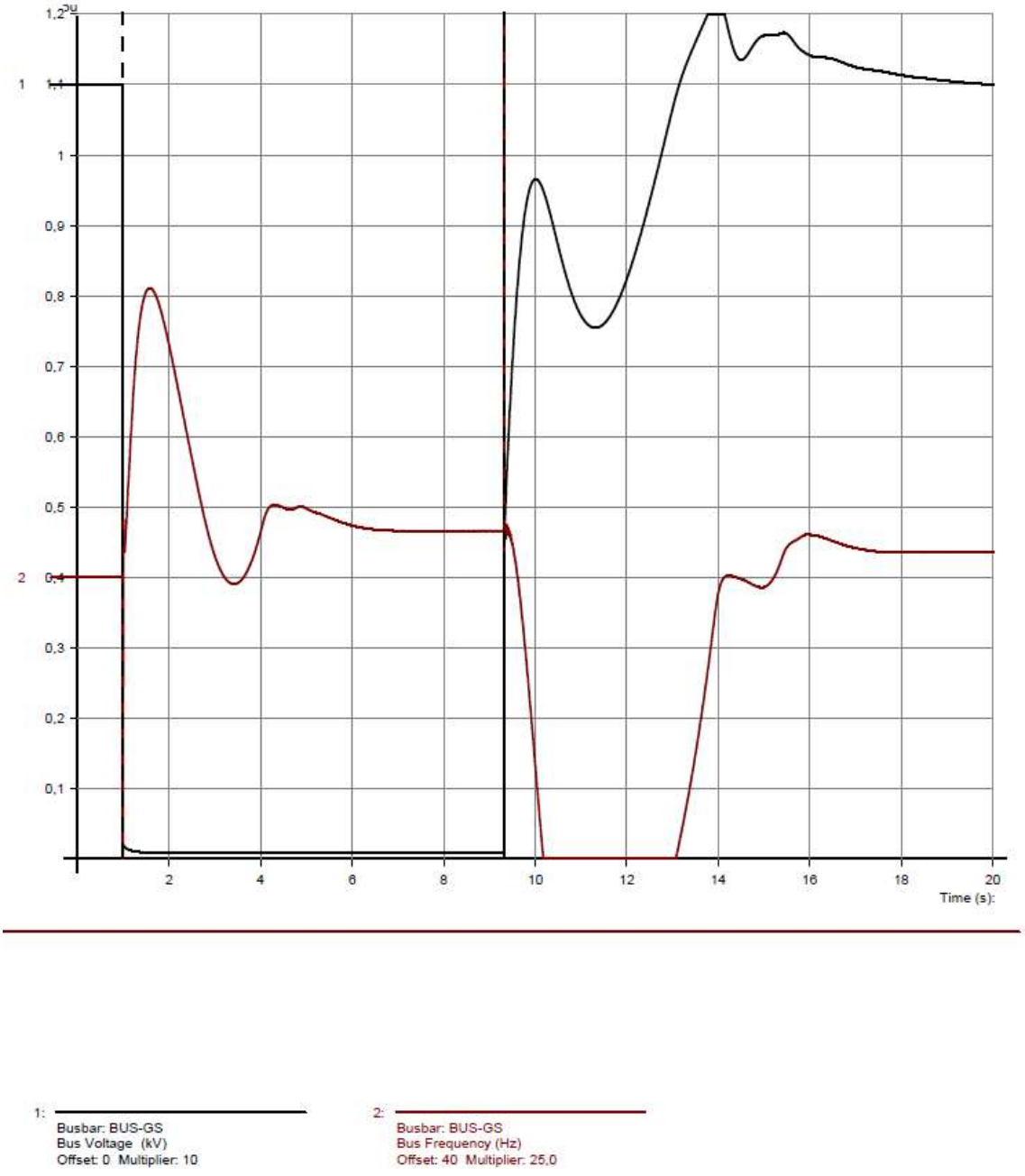
ÇS-2 için en uzun açma süresine maruz kalan arıza-6 için geçici durum analizi yapılmıştır.

Çizelge 5. 9 da simüle edilen olaylar ve süreleri verilmiştir. Şekil 5. 50'den de görüleceği üzere 8,32 sn. kısa devre akımına maruz kalan dağıtım sisteminde gerilim ve frekans kararlılığı sağlanamamıştır. Senkron makinaların atalet momenti sabitleri H, enterkonnekte şebeke ile kıyaslanmayacak kadar düşük olduklarından dolayı dinamik

analizde yeterli sürede arıza temizlenmediği durumlarda sistem kolayca kararsızlığa gitmektedir.

Çizelge 5. 10 ÇS-2 arıza-6 geçici durum olay-zaman senaryosu

Süre	Olay
1.sn	BUS-PQ2 barasında üç fazlı kısa devre
9,32sn	SW-PQ2 kesicisinin arızayı temizlemesi
20sn.	Simülasyonun tamamlanması



Şekil 5. 50 ÇS-6.arıza geçici durum analizi BUS-GS barası V-f eğrileri

5.3.5 Çalışma Senaryosu-2 Sonuç

ÇS-1' den ÇS-2 ye kontrolsüz ada çalışma geçişi olması durumunda aşırı akım ve yönlü aşırı akım röleleri ile tam bir koruma ve kararlılık koordinasyonu sağlanamadığı görülmüştür.

Özellikle iki çalışma senaryosu arasında kısa devre akım değeri arasındaki fark arttıkça birçok rölenin de açma süresi artacak veya arızayı görmeyeceklerdir. Bu durumda

standartlarda tanımlanan açma sürelerinin sağlanmaması, seçici koruma koordinasyonu kaybı ile kararlılık kaybı gibi yaşamsal ve ekonomik açıdan riskli operasyonlara sebep olacaktır.

Bu sebepten koordinasyonu standart aşırı akım röleleri ile sağlanamayan sistemlerde IEC61850 standardına uyumlu GOOSE mesajlaşma özelliği olan röleler kullanılmalıdır.

Simülasyonumuzda kullanılan REF615 tipi röle bu özelliklere sahiptir.

ÇS-2 de koordinasyonu sağlanamayan PD-PQ2 ve PD-PQ1 rölelerinin açma akımları IEC 61850 haberleşme protokolü üzerinden tekrar ayarlanacaktır. Bu sayede akım ayarları değiştirilen IED ler ile istenen koordinasyon sağlanabilir.

Haberleşmeli ileri aşırı akım koruma sisteminde dikkat edilmesi gereken konular sırasıyla

-Ada moduna geçiş kontrollü yapılmalıdır. Kontrolsüz ada geçişinde rölelerin ayar kademeleri değiştirilemez.

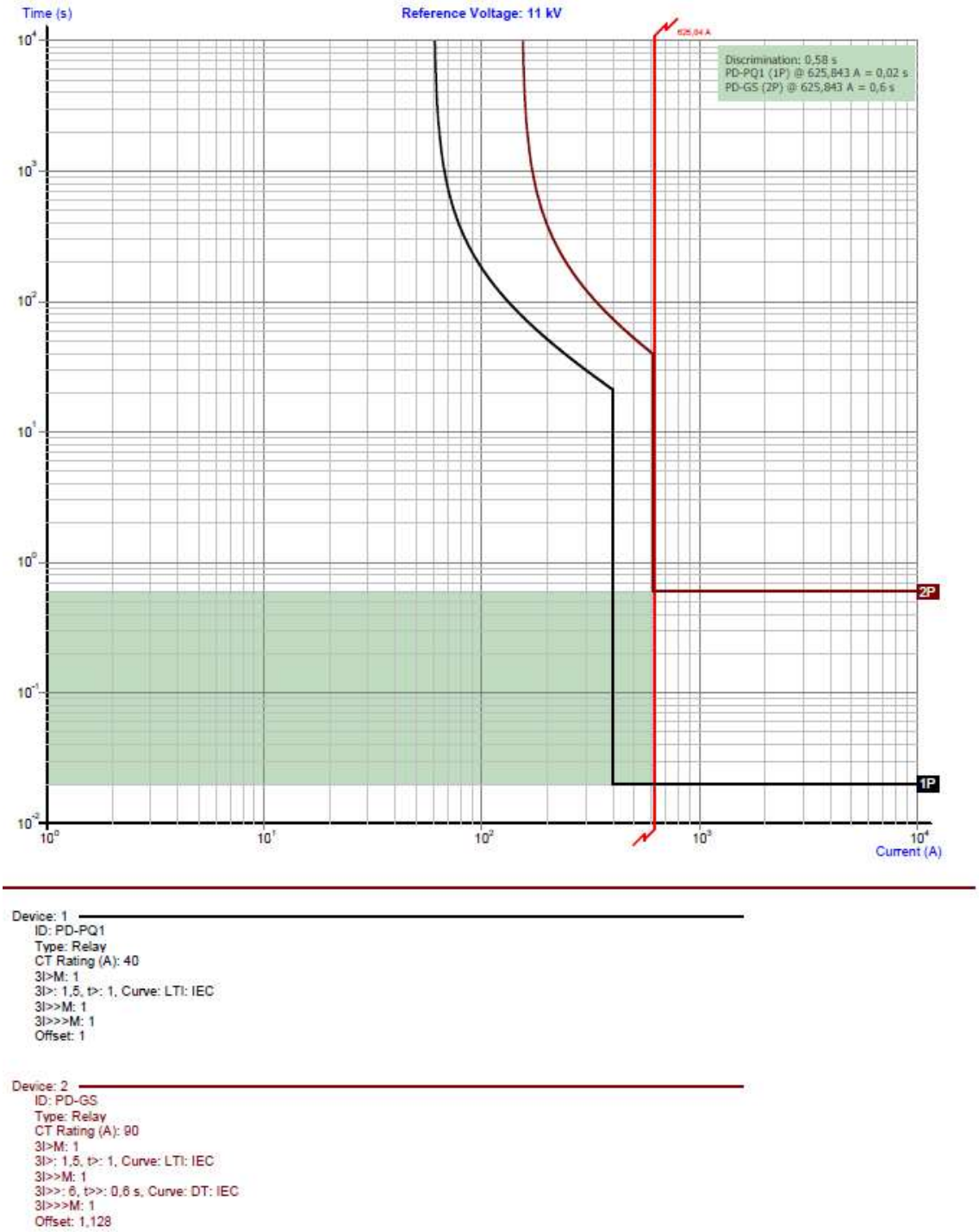
- Ada modu arıza ve kararlılık analizi önceden yapılarak ayarları değişmesi gereken röleler tespit edilmelidir.

- Ada modunda koordinasyonu sağlayacak röle akım kademeleri bilgisayar simülasyonları ve detaylı analizler ile belirlenmelidir.

- Haberleşme sisteminin bakım ve işletilmesine dikkat edilmelidir.

PD-PQ1 ve PD-PQ2 rölelerinin anlık açtırma akımları değiştirilerek koruma analizi tekrar gerçekleştirilmiştir. Şekil 5. 51 de yeni akım ayarlarına sahip PD-PQ1 rölesi ile PD-GS rölesi arasında sağlanan seçicilik görünmektedir.

PD-PQ2 rölesi de BUS-PQ2 deki üç fazlı kısa devre arızasını anlık olarak algılayarak açtırma sinyali göndermektedir. Kararlılık sağlanmıştır.



Şekil 5. 51 ÇS-2 6. yeni akım-zaman eğrileri

5.4 Çalışma Senaryosu-3 (ÇS-3)

Çalışma senaryosu 3'te IADÜK içeren bir dağıtım sistemi ada çalışma modunda analiz edilmiştir. Dağıtım sistemi tüm iletken, röle ve kesicilerinin parametreleri ÇS-1 ve ÇS-2 ile aynıdır. Bu sebepten modelin detaylı açıklaması tekrar yapılmamıştır. Diğer iki ÇS den

farklı olarak simülasyon ETAP yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme ETAP 12.6.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. ETAP güç sistemi modelleme, analiz ve optimizasyon imkanı sağlayan ve dünya genelinde oldukça yaygın kullanılan bir yazılımdır. Kablo hesabı, koruma koordinasyon, dinamik güç analizi, ark flaş analizi ve raylı sistemler gibi çok geniş aralıkta modelleme ve analiz yapılabilmektedir.

IADÜK PQ kontrollü sabit akım kaynağı olarak çalışan kısa devre katkı akımı nominal akımın maksimum %125 olacak şekilde seçilmiştir.

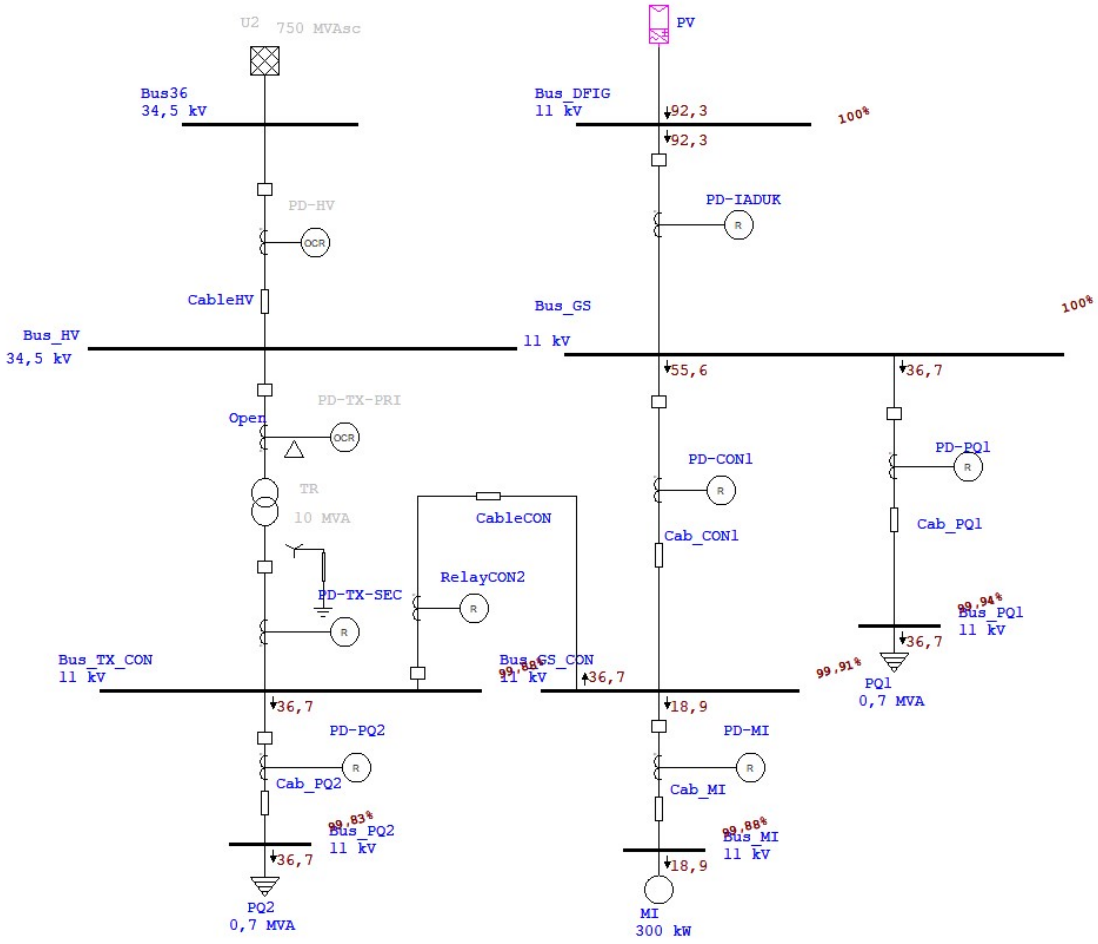
IADÜK olarak nominal gücü ve gerilimi 1,8MVA – 11kV olan inverter ve PV tarlası olarak belirlenmiştir. Nominal akımı 94,48A, kısa devre katkı akımı ise 118,1A dir.

Ada çalışma moduna göre koruma rölelerinin ayar sahaları tekrar düzenlenmiştir. Aşırı akım açma ayar kademeleri aşırı ters zaman ve sabit zaman açma eğrileri olarak seçilmiştir. Rölelerin ayar sahaları nominal akımı üstünde güvenli tarafta kalacak şekilde minimuma ayarlanmıştır.

Simülasyon sonuçlarına göre hata akımının nominal akım değerine çok yaklaşık olması sebebiyle aşırı akım koruma röleleri ile koruma koordinasyonu gerçekleştirilememiştir. IEC 61850 haberleşme protokolü ile ayar kademesi değiştirilen IED ile dahi bu akımlar görülememektedir.

5.4.1 Yük Akış Analizi

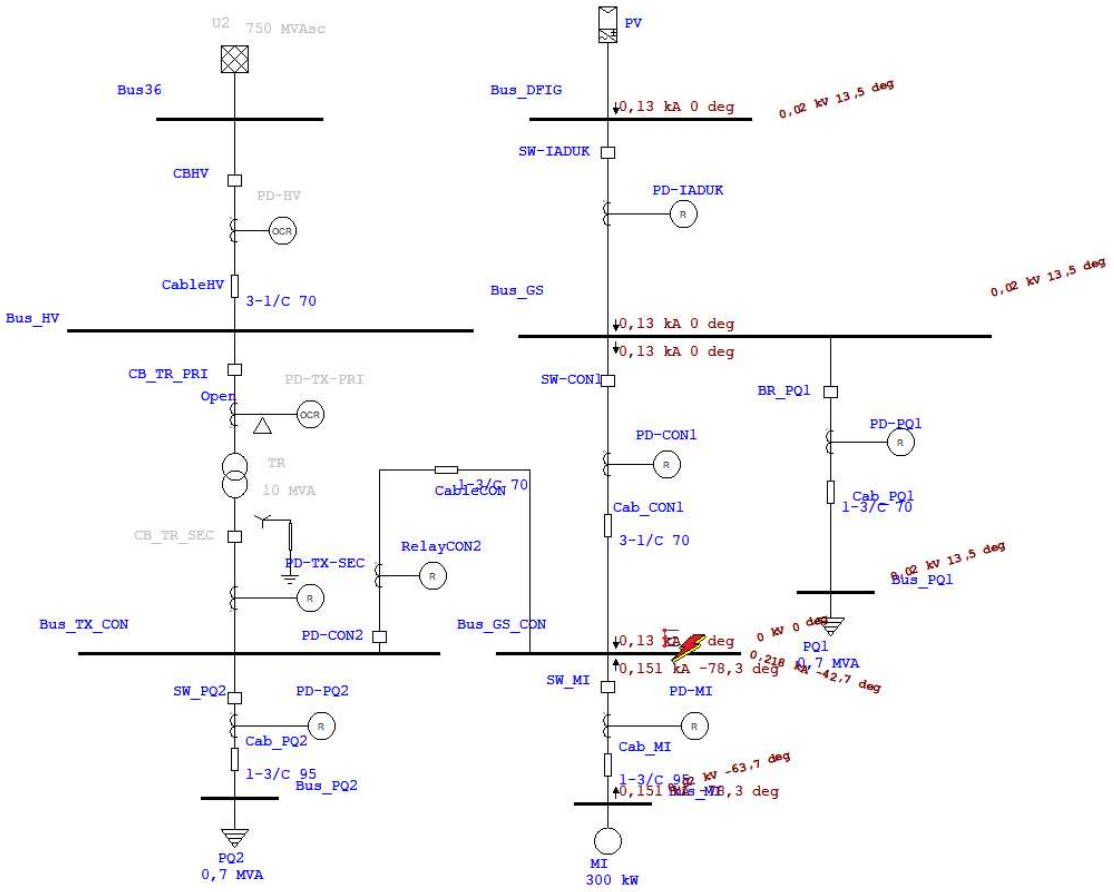
Şekil 5. 52 de yük akışı sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5. 52 ÇS-3 yük akışı simülasyonu sonuçları

5.4.2 Kısa Devre Analizi

Şekil 5. 53 de üç fazlı kısa devre sonuçları görülmektedir. Nominal akım ve kısa devre akımları birbirlerine oldukça yakındır.



Şekil 5. 53 ÇS-3 üç fazlı kısa devre arıza analizi sonuçları

5.4.3 Koruma Koordinasyonu Analizi

Koruma rölelerinin akım ayarları IADÜK içeren ada çalışma şartlarına göre tekrar ayarlanmıştır. Kısa devre akımlarının çok düşük olması sebebiyle aşırı akım ve anlık aşırı akım değerleri nominal yük akışında açmaya sebep olmayacak minimum değerlere getirilmişlerdir.

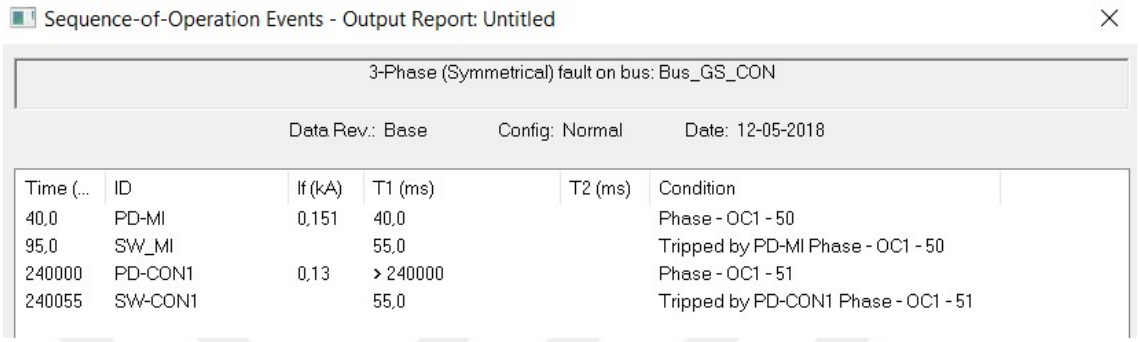
- **Arıza-1-5-6;**

1-5 ve 6 nolu arıza noktalarının nominal durumdaki yük akımı 40A' in altındadır. Üç fazlı kısa devre akımı ise 129A dir.

İki akım değeri arasında yeterli fark olması sebebiyle koruma röleleri hatayı fark edip açabilmektedir.

- **Arıza-2-3-4**

Arıza-2-3 ve 4' de ise 240 saniyenin üzerinde açma süreleri görülmüştür. Bu kadar uzun bir süre devam eden hata akımı can ve mal güvenliğini riski oluşturmaktadır.


Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus_GS_CON

Data Rev.: Base Config: Normal Date: 12-05-2018

Time (...	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
40,0	PD-MI	0,151	40,0		Phase - OC1 - 50
95,0	SW_MI		55,0		Tripped by PD-MI Phase - OC1 - 50
240000	PD-CON1	0,13	> 240000		Phase - OC1 - 51
240055	SW-CON1		55,0		Tripped by PD-CON1 Phase - OC1 - 51

Şekil 5. 54 ÇS-3 2-3-4.arıza çalışması sonuçları

5.4.4 Çalışma Senaryosu-3 Sonuç

Aşırı akım röleleri ile IEC 61850 uyumlu IED' ler kullanılması durumunda dahi koruma koordinasyonu sağlanamadığı görülmüştür. IADÜK içeren dağıtım sistemleri güçlü kısa devre katkı akımı sağlayan kaynaklar ile paralel kullanılması durumunda aşırı akım röleleri ile sistem korunabilir.

5.5 Diferansiyel Röleler ile Gerçekleştirilen Arıza ve Koruma Analizi

Diferansiyel koruma röleleri bölüm 3 de belirtildiği üzere transformatör ve jeneratör korumasında sıklıkla kullanılırlar. Koruma literatüründe birim koruma (unit protection) rölesi olarak isimlendirilirler. Diferansiyel koruma röleleri kendi koruma bölgeleri dışındaki arızaları tespit edemezler ve koruma zonu giriş-çıkış akımları arasındaki akım farklarında açma sinyali iletirler. Bu özelliklerinden dolayı ada çalışmada kullanım için oldukça uygundurlar. IEC 62898 standardında da ada çalışma korumasında özellikle diferansiyel rölelere atıfta bulunulmuştur.

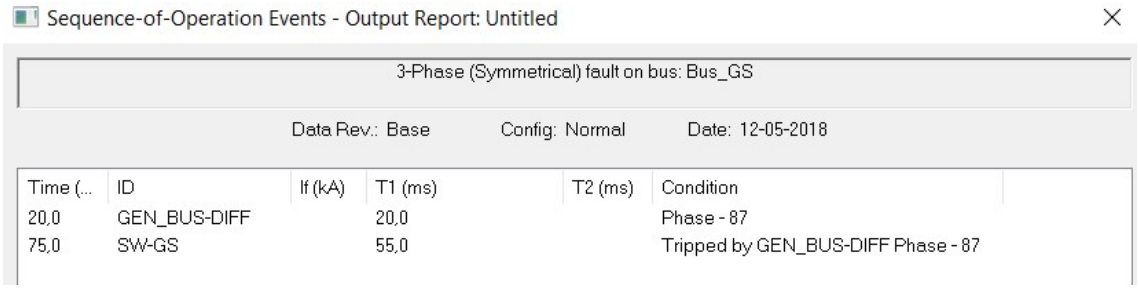
Diferansiyel rölede dikkat edilmesi gereken konu ilgili bölümde açıklandığı üzere haberleşme sistemine ve akımın doğru bir şekilde ölçülmesine ve akım transformatörlerinin inrush akımlarına bağlı olmasıdır. Doğru boyutlandırılmamış akım

trafoları veya yüksek harmonik akımları diferansiyel rölelere istenmeyen açma sinyali üretmelerine sebep olur. Bu sebepten aşırı akım veya gerilim röleleri ile yedeklenmeleri gerekmektedir.

Diferansiyel rölelerin bara uygulamaları transformatör, hat ve jeneratöre uygulamalarına göre daha karmaşıktır. Bara koruması Kirchhoff kanunu temelinde düğüm noktasına giren ve çıkan akımların eşitliği temeline dayanır. Fakat çift kaynak beslemeli ve çift bara uygulamalı dağıtım sistemlerinde yük çıkışlarının bağlı olduğu baralar transfer elemanları ile değişebilmektedir. Bu da oldukça karmaşık bir koruma sistemine sebep olacaktır. Bara diferansiyel koruma sistemleri tek bir merkezden kontrol edilmeli, yük anahtarlarının kademesi kontrol edilmeli ve ileri haberleşme metotları ile kontrol edilmelidir.

5.5.1 Koruma Koordinasyonu Analizi

ETAP programında diferansiyel röleler ile koruma koordinasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Her arıza analizinde hata kendi birim koruması ile temizlenmiştir. Bu sayede diğer röleler ile seçici çalışma sağlanmıştır. Şekil 5. 55 de görüleceği üzere BUS_GS' deki hatada sadece o barayı koruyan röle kesicisiye açma sinyali iletmiştir.


Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

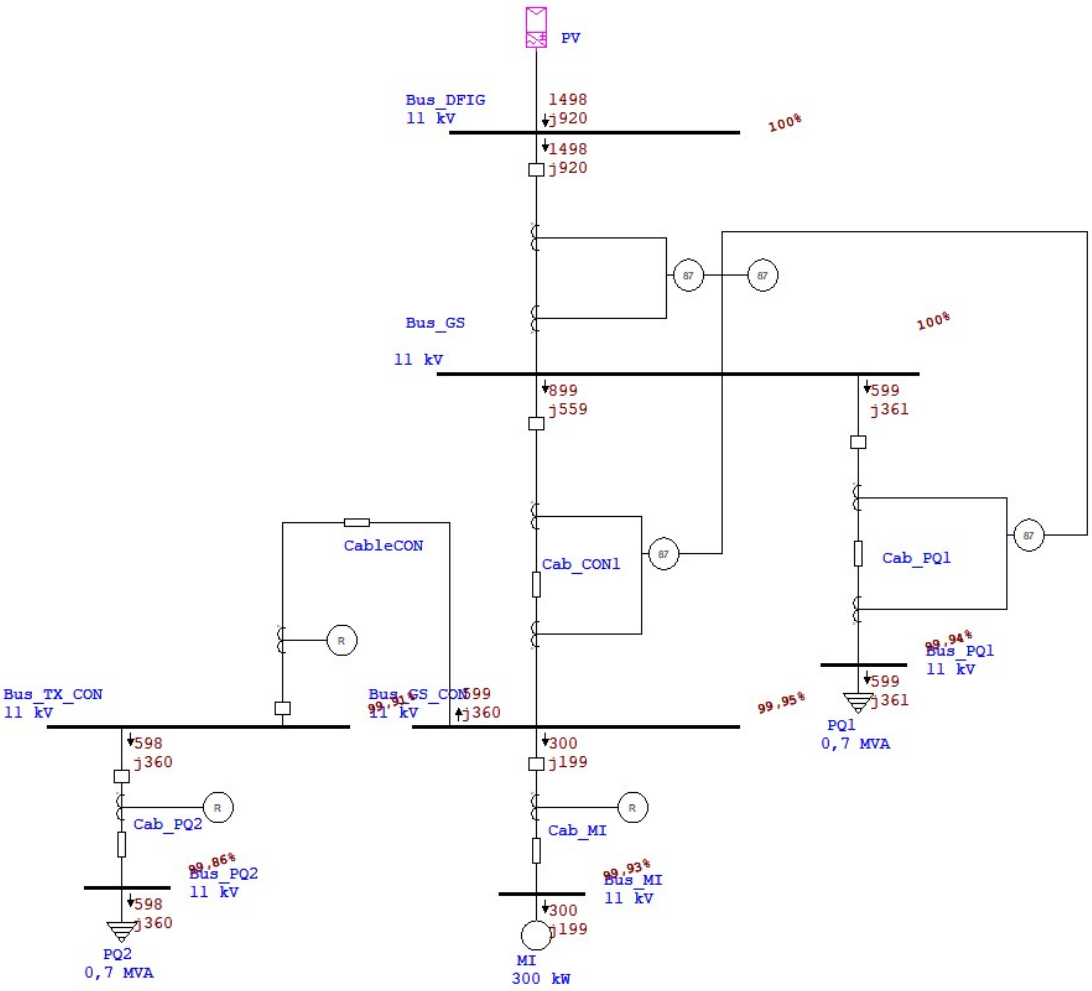
3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus_GS

Data Rev.: Base Config: Normal Date: 12-05-2018

Time (...	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
20,0	GEN_BUS-DIFF		20,0		Phase - 87
75,0	SW-GS		55,0		Tripped by GEN_BUS-DIFF Phase - 87

Şekil 5. 55 Diferansiyel röle ile gerçekleştirilen arıza çalışması sonuçları

Koruma koordinasyonu ÇS-3 arıza analizi-2-4-5 için yapılmıştır. Şekil 5. 55 de görüleceği üzere kablo ve baralar diferansiyel koruma röleleri ile donatılmıştır. Modelde akım transformatörlerinin doğru bir şekilde boyutlandırılması ve çıkış yolu üzerindekileri trafoların polaritelerinin ters olmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 5. 56 Diferansiyel röle ile gerçekleştirilen koruma şeması

5.6 Gerilim Röleleri ile Gerçekleştirilen Arıza ve Koruma Analizi

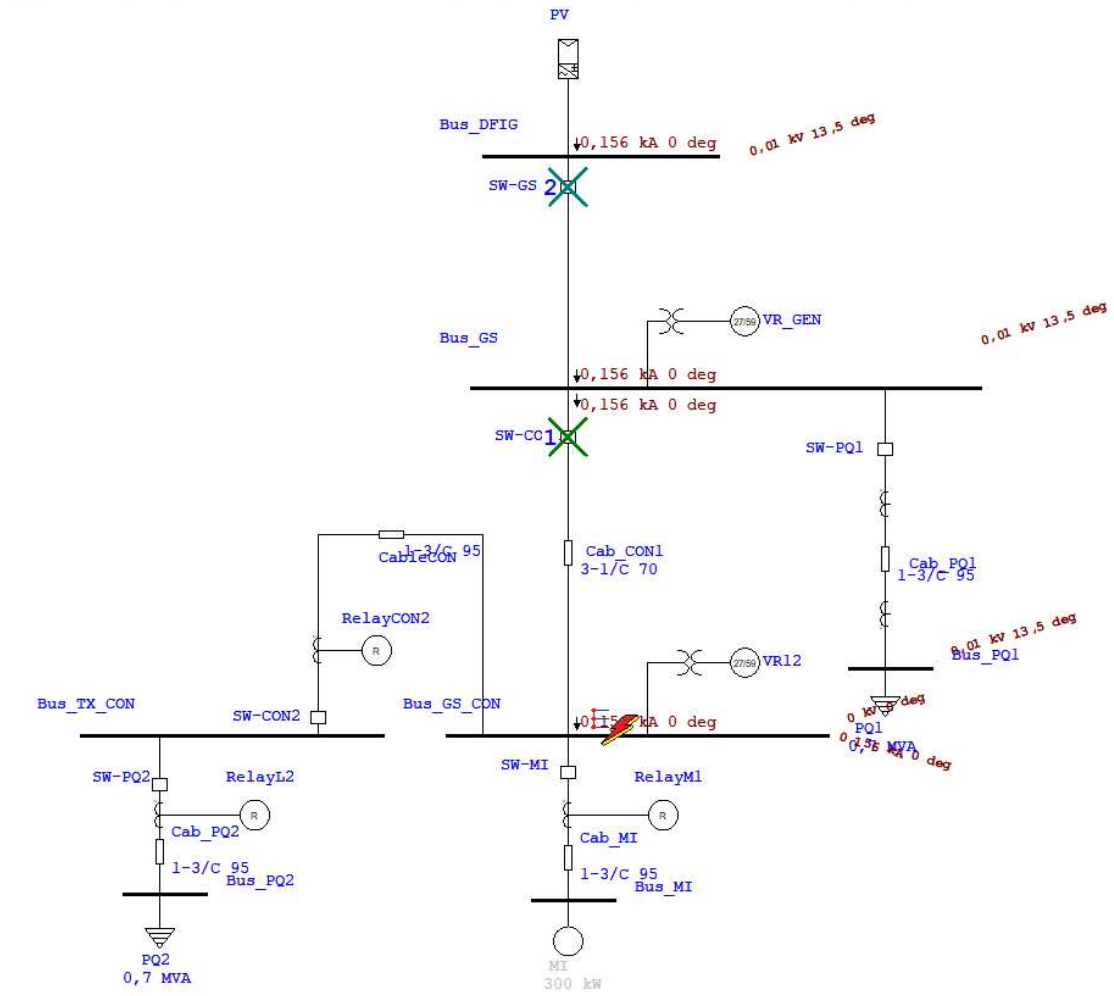
Gerilim ve frekans koruma röleleri bölüm 3 de tanımlanmıştır. Bu röleler gerilim transformatörü üzerinden sistemin gerilim ve frekansını takip ederler. Aşırı gerilim ve düşük gerilim olarak iki çeşittirler. Her iki röle için de eşik değer veya frekansa göre değişimli eşik değer ayarları mevcuttur. Üç faz kısa devre hatası gerçekleşen baralarda da gerilim 0 olacaktır. Asimetrik kısa devre hatalarında ise oldukça düşecektir. Gerilim röleleri bağlı bulunduğu barada eşik değerinin altına düşen gerilim değerinde anlık olarak açtırma sinyali iletecektir.

Bu rölelerde eşik gerilim seviyesinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Enterkonnekte şebeke ile paralel çalışmada sistemin atalet momenti oldukça yüksek olması sebebiyle büyük yük gruplarının anahtarlamasında ciddi gerilim dalgaları

meydana gelmez. Fakat özellikle senkron jeneratör ada çalışma modunda yük anahtarlamaları veya jeneratörlerin devreye giriş çıkışları sebebiyle önemli gerilim dalgalanmaları olur. Bu da sabit gerilim kademeli rölelerin istenmeyen açma sinyali üretmesine sebep olur. Frekans bazlı eşik değerli gerilim röleleri sabit değerli rölelere göre ada çalışma uygulamalarına daha uygundur.

5.6.1 Koruma Koordinasyonu Analizi

Şekil 5. 57 de Bus-GS ve Bus-GEN-CON barasının düşük ve yüksek gerilim röleleri ile donatıldığı görülmektedir. Bu baralarda oluşturulan kısa devrelerde röleler set edilen sürelerde açma sağlamış ve birbirleri ile seçici çalışmıştır.



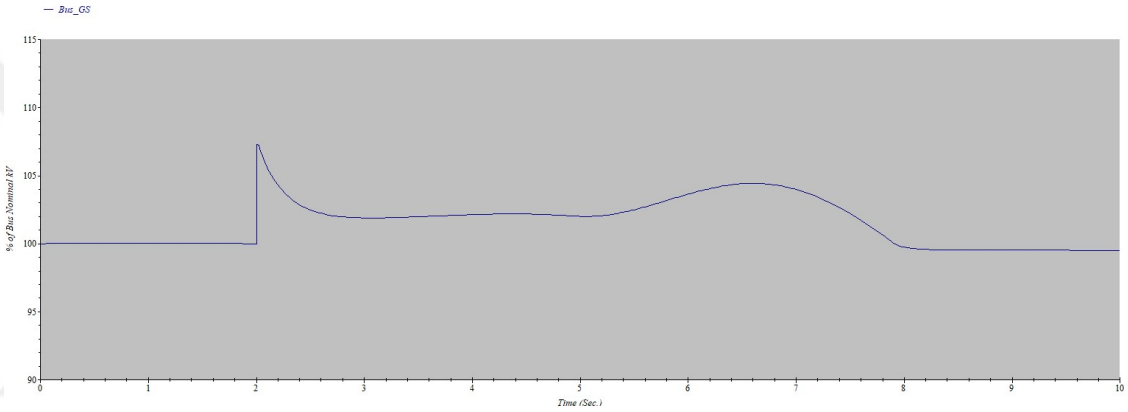
Şekil 5. 57 Gerilim röleleri ile gerçekleştirilen koruma şeması

5.6.2 Geçici Durum Analizi

Geçici durum analizinde sabit PQ yükü ile asenkron motorun devreden çıkması durumunda gerilim rölelerinin davranışı karşılaştırılmıştır.

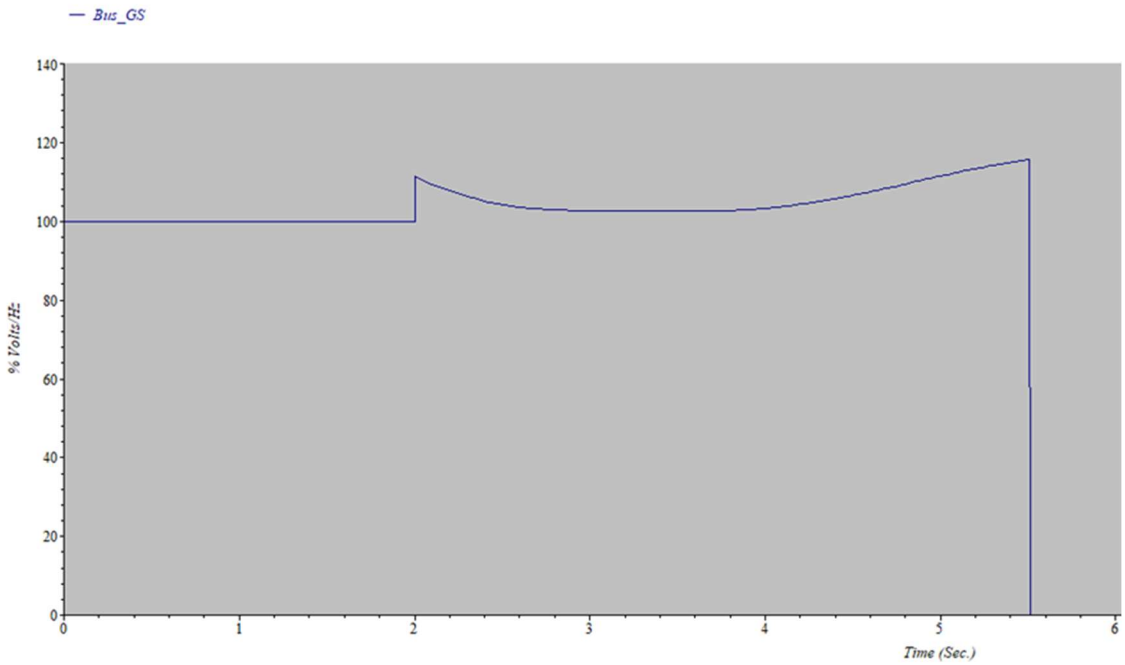
Simülasyonda eşik değerli gerilim rölesi kullanılmıştır. PQ2 ve MI yüklerinin aynı anda devreden çıkması durumunda PD-CON1 Gerilim rölesi aktif olmuş ve kesiciye açtırma sinyali iletmiş ve istenmeyen açma meydana gelmiştir.

1- PQ2 yükü ikinci saniyede devreden çıkartılmıştır. 10 sn. süren simülasyon süresince gerilim ayarlanan eşik değerin altına düşmemiş ve dolayısıyla röleler açtırma sinyali iletmemiştir.



Şekil 5. 58 Gerilim röleleri ile gerçekleştirilen geçici durum analizi-1

2- PQ2 yükü ve MI asenkron motoru beraber 2.saniyede devreden çıkarılmıştır. Bu analizde gerilimin eşik değerin altına düştüğü ve istenmeyen açmaya sebep olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 59 Gerilim röleleri ile gerçekleştirilen geçici durum analizi-2

5.7 Arıza Kompanzasyonu Yöntemi ile Koruma Analizi

Arıza kompanzasyonu ada modunda çalışan dağıtım sisteminde hata akımının ikincil bir kaynak ile artırılması prensibine dayanır. Hata akımının aşırı akım röleleri ile koruma koordinasyonu sağlayacak bir seviyeye yükseltilmesi gerekmektedir.

Ada çalışmada enerji dağıtım sisteminin en önemli bileşenlerinden biri enerji depolama elemanıdır. Özellikle senkron jeneratörün olmadığı veya sabit PQ barası olarak çalıştırıldığı sistemlerde enerji depolama ünitesinin kullanılması gerekmektedir Enerji depolama ünitesi sistemde arz-talep dengesinin kurulmasını sağlar ayrıca reaktif enerji kompanzasyonu ile gerilim kararlılığı sağlayabilir.

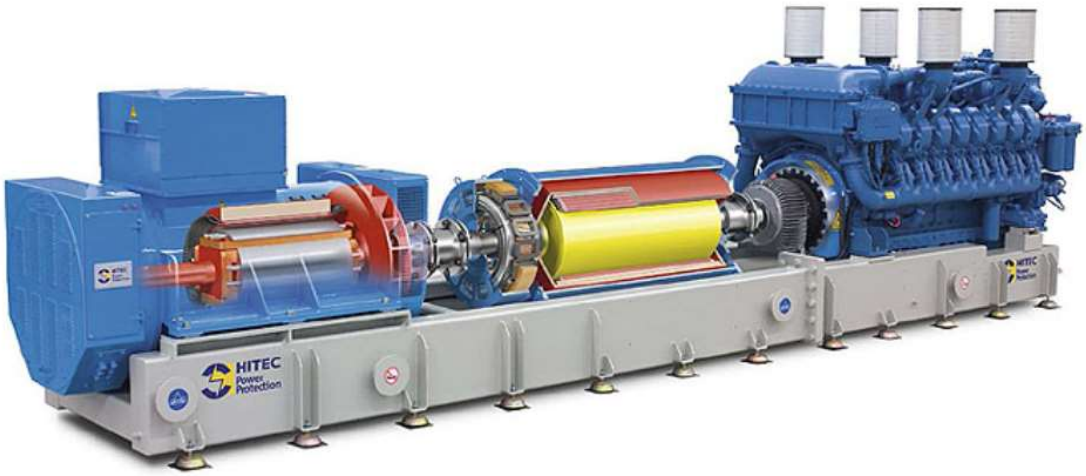
Bunlarla beraber enerji depolama ünitesi senkron makine içerecek şekilde seçilirse ayrıca hata akımına da katkı verir. Bu sayede aşırı akım rölelerinin pick-up eşik değerleri aşılır ve koruma koordinasyonu sağlanabilir.

Bu tip bir cihaza örnek olarak dinamik UPS verilebilir. Dinamik UPS dizel motor, alternatör ve volandan oluşur. Volan sürekli ana enerji kaynağı ile senkron olarak çalışır. Enerjinin kesilmesinde, dizel motor çalışana kadar geçen sürede devreye girerek üzerindeki kinetik enerjiyi daha spesifik olarak rotorun döner alan enerjisini sisteme

verir. Bu sayede enerji sürekliliği sağlar. Ayrıca senkron jeneratörün çalışması için gereken uyarım akımı da volan üzerinden sağlanır.

Dinamik UPS' ler ada modunda çalışan sistemlerde enerji depolama üniteleri olarak çalışıp kararlılığın sürdürülmesine destek olurlar. Ayrıca enerji kesintisi ve hata durumlarında ise devreye girerek hem enerji sürekliliği hem de arızayı besleyerek koruma sisteminin sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlarlar.

Arıza anında devreye giren bir dinamik UPS ile arıza analizi yapılmış ve aşırı akım koruma röleleri ile beklendiği üzere koruma koordinasyonu sağlanmıştır.



Şekil 5. 60 Rotary UPS örneği

5.8 Orta Gerilim Hibrit Enerji Sisteminin Koruma Analizi Sonuçları

Örnek 11kV hibrit elektrik dağıtım sistemimiz için üç senaryo belirlenmiş ve çeşitli koruma röleleri ile koruma koordinasyonu analizleri yapılmıştır. Çizelge 5. 10'da yapılan analizler basitçe gösterilmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde daha detaylı çıkarımlar yapılacaktır.

Çizelge 5. 11 O.G model koruma özeti

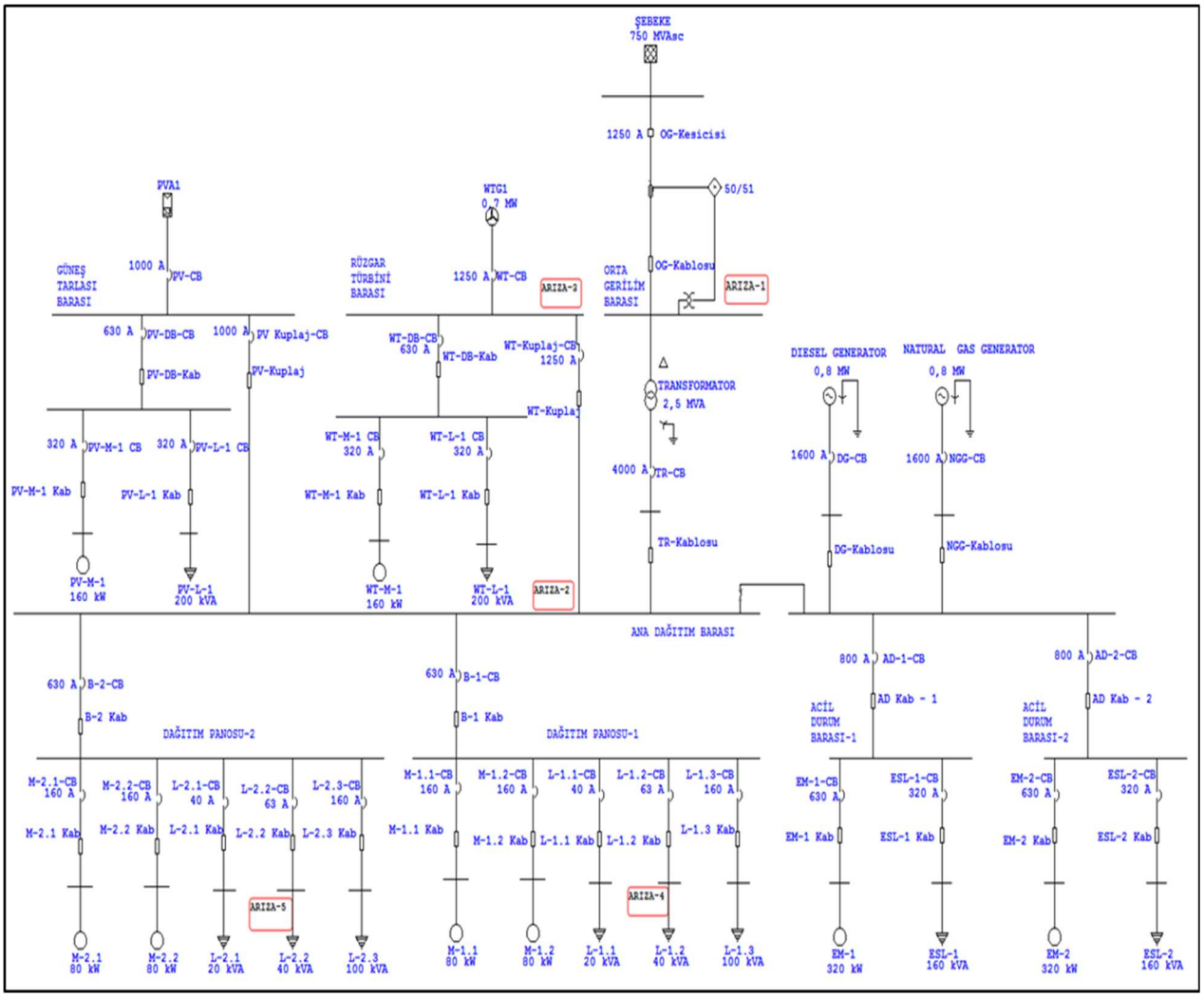
Koruma Rölesi	ÇS-1 Ent.KonŞeb + SJ		ÇS-2 Sen.Jeneratör		ÇS-3 IADÜK	
	Koruma	Kararlılık	Koruma	Kararlılık	Koruma	Kararlılık
Aşırı Akım-Yönlü Aşırı Akım Rölesi	+	+	Kısmi	Kısmi	-	-
IEC 61850 – Aşırı Akım – Yönlü Aşırı Akım Rölesi	+	+	+	+	-	-
Diferansiyel Röle	+	+	+	+	+	+
Gerilim Rölesi	+	+	Kısmi	Kısmi	Kısmi	Kısmi
Arıza Kompanzyonu-Aşırı Akım Rölesi	+	+	+	+	+	+

5.9 ETAP YAZILIMI İLE MODELLENEN ALÇAK GERİLİM SEVİYESİNDE HİBRİT BİR ENERJİ DAĞITIM SİSTEMİNİN ARIZA ANALİZİ

Bu bölümde farklı dağıtık enerji üretim kaynaklarından oluşan alçak gerilim seviyesinde hibrit bir enerji dağıtım sisteminin arıza ve koruma koordinasyonu ETAP yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

5.9.1 Modellenen Dağıtım Sisteminin Tanıtımı

Şekil 5. 60' da ETAP ile modellenen elektrik dağıtım sistemi gösterilmiştir. Modelde kullanılan elemanların tanımları, sayıları bilgileri aşağıda çizelgeler halinde sıralanmıştır.



Şekil 5. 61 ETAP AG hibrit enerji sistemi modeli

5.9.1.1 Enerji Kaynakları;

Şebekeye senkron çalışan dört adet dağıtım üretim kaynağı ve bunlara bağlı 6 adet dağıtım barasından oluşmaktadır. Kullanılan kaynaklar, nominal güçleri ve kısa devre empedans katkıları aşağıdaki Çizelgede gösterilmiştir;

Çizelge 5. 12 A.G ETAP modeli enerji kaynakları listesi

Kaynak	Nominal Güç	Açıklama	Empedans ve Kısa Devre Katkıları
Şebeke	2,5 MVA	2,5 MVA kuru tip Dyn11	750MVA Kısa devre kesme kapasitesi. Uk: %6. R/X: 0,167
Rüzgar türbini(WG1)	0,7 MW	Tip-4 rüzgar türbini 0,7MW	Tip 4 rüzgar türbini kullanılıldığından kısa devre akımı konvertör tarafından kısıtlanır. Konvertör kısa devre akımı katkısı nominal akımın %125 si kabul edilmiştir.
Güneş Pili Tarlası(PVA1)	0,625 MVA	280W gücünde panellerin 22 seri - 99 paralel dizisinden oluşan güneş pili tarlası	Güneş pillerinin ürettiği doğru akım inverter aracılığıyla sisteme bağlanır. Kısa devre akımı inverter tarafından kısıtlanır. Inverter kısa devre akımı katkısı nominal akımın %125 dir.
Dizel jeneratör	0,8 MW	Prime dizel jeneratör	Xd"=%21, X2=%19, X0=%7, Xd/Ra=25
Gaz jeneratörü	0,8 MW	Sabit güç gaz jeneratörü	Xd"=%16, X2=%14, X0=%5, Xd/Ra=25

a.Şebeke – Transformatör;

Modelde 34,5 kV enterkonnekte elektrik şebekesi 2500kVA kuru tip Dyn11 sargılı transformatör üzerinden sisteme bağlanmıştır. Transformatörün empedans bilgileri; %Uk=6; R/X=0,167 olarak kabul edilmiştir. 34,5kV şebekenin kısa devre kesme gücü 750MVA alınmıştır.

b.Rüzgar Türbini;

ETAP modelinde tip-4 rüzgar türbini kullanılmıştır. Türbin 750kW nominal güce sahiptir. Tip-4 rüzgar türbinleri ilgili bölümde açıklandığı üzere dağıtım sistemine konvertör üzerinden bağlanmaktadır. Kısa devre katkısı bu türbin tarafından nominal akımın %125' i olacak şekilde sınırlandırılmaktadır.

c.Güneş Pili Enerji Santrali;

Modellenen güneş tarlası 280W nominal gücüne sahip panellerden oluşmaktadır. Santral dizisi 22 seri 99 paralel panelden oluşmaktadır. Toplam nominal elektrik gücü 625kVA' dir. Güneş pili tarlası DC enerji üretimi AC elektrik şebekesine inverter ile bağlanabilmektedir. Tip-4 rüzgar türbinleri ile benzer şekilde kısa devre katkı akımı inverter tarafından sınırlandırılmaktadır.

d.Dizel ve Gaz jeneratörleri;

İki jeneratörde 800kW nominal güce sahip olacak şekilde seçilmiştir. Empedans ve atalet momenti değerleri ürün kataloglarından seçilmiştir. İlgili çizelgede görüleceği üzere dizel jeneratörün kısa devre empedansları daha yüksektir. Bu sebepten kısa devre katkı akımı daha düşük olacaktır. Yine çizelgede görüleceği üzere sıfır bileşen empedansı pozitif ve negatif bileşenlerden daha düşüktür. Bu sebepten bu senkron jeneratörlerin çıkışlarında faz-nötr kısa devre akımları 3 faz kısa devre akımlarından daha yüksek çıkacaktır.

5.9.1.2 Devre Kesiciler ve Röleleri;

Kullanılan devre kesiciler ve rölelerin bilgileri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 5. 12 de özetlendiği şekilde kesici seçimi yapılmıştır. Kesici maksimum kısa devre açma değerleri tüm kaynaklar devre iken elde edilen kısa devre akımına göre seçilmiştir.

100kA kısa devre akım değerinde açık tip devre kesiciler seçilmiştir. Pano giriş şalterleri seçiciliği sağlamak için elektronik açtırma üniteli seçilmiştir. Yük devrelerinin korumaları ise termomanyetik açtırma üniteli termik ve manyetik (TMA) ile sağlanmıştır. Yine son devrelerde toprak hatalarına karşı 30mA kaçak akım röleleri kullanılmıştır.

5.9.1.3 İletkenler Tanımları ve Empedans Değerleri

ETAP modelinde kullanılan iletkenlerin tipleri, kesitleri ve empedansları aşağıdaki Çizelge 5. 12 ve 5. 13' de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 13 A.G ETAP modeli kesici-röle listesi

Kesici Adı	Kesici Tipi	Nominal Akım(A)	Maksimum Akım(kA)	Röle Tipi
OG-Kesicisi	SF-6 Kesici	1250	16	Aşırı Akım / Diferansiyel Koruma
TR-CB	ACB	4000	100	LSI - Elektronik
DG-CB	ACB	1600	100	LSI - Elektronik
NGG-CB	ACB	1600	100	LSI - Elektronik
WT-GB	MCCB	1250	50	LSI - Elektronik
PV-CB	MCCB	1000	50	LSI - Elektronik
WT-Kuplaj CB	MCCB	1250	50	LSI - Elektronik
WT-DB-CB	MCCB	630	50	LSI - Elektronik
PV-Kuplaj-CB	MCCB	1000	50	LSI - Elektronik
PV-DB-CB	MCCB	630	50	LSI - Elektronik
WT-M-1-CB	MCCB	320	50	TMA-Termomanyetik / RCD
WT-L-1-CB	MCCB	320	50	TMA-Termomanyetik / RCD
PV-M-1-CB	MCCB	320	50	TMA-Termomanyetik / RCD
PV-L-1-CB	MCCB	320	50	TMA-Termomanyetik / RCD
B-1-CB	MCCB	630	100	LSI - Elektronik
B-2-CB	MCCB	630	100	LSI - Elektronik
M-1.1-CB	MCCB	160	36	TMA-Termomanyetik / RCD
M-1.2-CB	MCCB	160	36	TMA-Termomanyetik / RCD
L-1.1-CB	MCCB	40	36	TMA-Termomanyetik / RCD
L-1.2-CB	MCCB	63	36	TMA-Termomanyetik / RCD
L-1.3-CB	MCCB	160	36	TMA-Termomanyetik / RCD
M-2.1-CB	MCCB	160	36	TMA-Termomanyetik / RCD
M-2.2-CB	MCCB	160	36	TMA-Termomanyetik / RCD
L-2.1-CB	MCCB	40	36	TMA-Termomanyetik / RCD
L-2.2-CB	MCCB	63	36	TMA-Termomanyetik / RCD
L-2.3-CB	MCCB	160	36	TMA-Termomanyetik / RCD
AD-1-CB	MCCB	800	85	LSI - Elektronik
AD-2-CB	MCCB	800	85	LSI - Elektronik
EM-1-CB	MCCB	630	50	TMA-Termomanyetik / RCD
ESL-1-CB	MCCB	320	50	TMA-Termomanyetik / RCD
EM-2-CB	MCCB	630	50	TMA-Termomanyetik / RCD
ESL-2-CB	MCCB	320	50	TMA-Termomanyetik / RCD

Çizelge 5. 14 A.G ETAP modeli kablo listesi

İletken adı	Faz-nötr iletken kesit ve tipleri	Toprak iletken kesiti	Metraj
OG-Kablosu	3 x (1x95mm² NXSY) - 34,5kV	-	1000
TR-Kablou	8 x (3x(1x240 mm² N2XH)	1x240 mm² N2XH	100
DG-Kablosu	4 x (4x185 mm² N2XH)	1x185 mm² N2XH	50
NGG-Kablosu	4 x (4x185 mm² N2XH)	1x185 mm² N2XH	50
WT-Kuplaj	2 x (4x240 mm² N2XH)	1x240 mm² N2XH	200
PV-Kuplaj	2 x (4x240 mm² N2XH)	1x240 mm² N2XH	200
WT-DB-Kab	2 x (4x120 mm² N2XH)	1x120 mm² N2XH	70
PV-DB-Kab	2 x (4x120 mm² N2XH)	1x120 mm² N2XH	70
W-M-1-Kab	4x150 mm² N2XH	1x150 mm² N2XH	70
WT-L-1 Kab	4x150 mm² N2XH	1x150 mm² N2XH	70
PV-M-1-Kab	4x150 mm² N2XH	1x150 mm² N2XH	70
PV-L-1-Kab	4x150 mm² N2XH	1x150 mm² N2XH	70
B-1-Kab	2 x (4x120 mm² N2XH)	1x120 mm² N2XH	70
B-2-Kab	2 x (4x120 mm² N2XH)	1x120 mm² N2XH	140
M-1.1-Kab	4x50 mm² N2XH	1x50 mm² N2XH	70
M-1.2-Kab	4x50 mm² N2XH	1x50 mm² N2XH	70
L-1.1-Kab	4x6 mm² N2XH	1x6 mm² N2XH	70
L-1.2-Kab	4x10 mm² N2XH	1x10 mm² N2XH	70
L-1.3-Kab	4x50 mm² N2XH	1x50 mm² N2XH	70
M-2.1-Kab	4x50 mm² N2XH	1x50 mm² N2XH	130
M-2.2-Kab	4x50 mm² N2XH	1x50 mm² N2XH	130
L-2.1-Kab	4x6 mm² N2XH	1x6 mm² N2XH	130
L-2.2-Kab	4x10 mm² N2XH	1x10 mm² N2XH	130
L-2.3-Kab	4x50 mm² N2XH	1x50 mm² N2XH	130
AD-1-Kab	2 x (4x120 mm² N2XH)	1x120 mm² N2XH	70
AD-2-Kab	2 x (4x120 mm² N2XH)	1x120 mm² N2XH	140
EM-1-Kab	4x120 mm² N2XH	1x120 mm² N2XH	70
ESL-1-Kab	4x150 mm² N2XH	1x150 mm² N2XH	70
EM-2-Kab	4x120 mm² N2XH	1x120 mm² N2XH	70
ESL-2-Kab	4x150 mm² N2XH	1x150 mm² N2XH	70

Çizelge 5. 15 A.G ETAP modeli kablo empedansları

Kablo kesiti ve Pozitif/Sıfır Bileşen Empedansları		Rezistif Empedans(ohm/km)	Endüktif Empedans(ohm/km)
1x240mm²	Pozitif Bileşen	0,097	0,072
	Sıfır Bileşen	0,1542	0,1828
4x185mm²	Pozitif Bileşen	0,128	0,073
	Sıfır Bileşen	0,2035	0,1854
4x150mm²	Pozitif Bileşen	0,159	0,073
	Sıfır Bileşen	0,2528	0,1854
4x120mm²	Pozitif Bileşen	0,196	0,073
	Sıfır Bileşen	0,3116	0,1854
4x50mm²	Pozitif Bileşen	0,494	0,079
	Sıfır Bileşen	0,7854	0,2006
4x10mm²	Pozitif Bileşen	2,33	0,084
	Sıfır Bileşen	3,7047	0,2133
4x6mm²	Pozitif Bileşen	3,92	0,089
	Sıfır Bileşen	6,2328	0,226

Tablodan görüleceği üzere iletken kesiti azaldıkça rezistif ve endüktif empedans artmaktadır. Sıfır bileşen empedansları pozitif bileşen rezistif empedanstan yaklaşık 2, endüktif empedanstan ise yaklaşık 3 kat daha fazladır. Bu sebeple jeneratör çıkışında yüksek bir akıma sahip olan asimetrik arızalar iletken empedansları sebebiyle oldukça düşmektedir. 240mm² kablo kesitinde rezistif ve endüktif empedanslar birbirlerine yakın değerlere sahipken, kesit azaldıkça rezistansın payı gittikçe artmaktadır.

5.9.1.4 Yükler

ETAP modelinde kullanılan yüklerin isimlendirmeleri, yük tipi ve aktif-reaktif enerji tüketimi aşağıdaki çizelge 5. 15’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 16 A.G ETAP modeli yük listesi

Yükün Adı	Yük Tipi	Aktif Güç (kW)	Reaktif Güç (kVAR)
WT-M-1	Motor	160	74
WT-L-1	Sabit Yük	180	87
PV-M-1	Motor	160	74
PV-L-1	Sabit Yük	180	87
M-1.1	Motor	80	38
M-1.2	Motor	80	38
L-1.1	Sabit Yük	18	8,7
L-1.2	Sabit Yük	36	17,4
L-1.3	Sabit Yük	90	43,6
M-2.1	Motor	80	38
M-2.2	Motor	80	38
L-2.1	Sabit Yük	18	8,7
L-2.2	Sabit Yük	36	17,4
L-2.3	Sabit Yük	90	43,6
EM-1	Motor	320	146
ESL-1	Sabit Yük	144	69,7
EM-2	Motor	320	146
ESL-2	Sabit Yük	144	69,7

5.9.2 Arıza Analizleri ve Sonuçları

Şekil 4.1’ deki tek hat şemasında da belirtilen beş noktada arıza analizi yapılmıştır. Her arıza noktasında üç faz (3F), faz-nötr (1F-N) ve faz-toprak (1F-PE) kısa devre akımları ETAP simülasyonu ile hesaplatılmıştır. Bu beş noktadaki arıza analizleri aşağıdaki çalışma düzenlerinde gerçekleştirilmiştir.

a. Çalışma düzeni-1 (ÇD-1); Tüm kaynaklar aynı anda devrededir. Şebeke salınım barası olarak seçilmiştir. Dizel jeneratör, rüzgar türbini ve güneş pili invertörü gerilim kontrol modunda, doğalgaz jeneratörü ise sabit aktif/reaktif güç verecek şekilde çalıştırılmaktadır.

b. Çalışma düzeni-2 (ÇD-2); Enterkonnekte şebeke devre dışı bırakmış ve dizel jeneratör salınım barası olarak seçilmiştir.

c. Çalışma düzeni-3 (ÇD-3); Dizel ve doğalgaz jeneratörleri devre dışı bırakılmıştır. Sistemde sadece güç elektroniği ara yüzlü kaynaklar tip-4 rüzgar türbini ve güneş enerjisi bulunmaktadır.

Aşağıda bu 5 noktada gerçekleştirilmiş çeşitli arıza değerleri tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 5. 17 A.G ETAP modeli kısa devre sonuçları

ARIZA ANALİZİ TABLOSU									
	ÇD-1 başlangıç kısa devre akımları Ik"			ÇD-2 başlangıç kısa devre akımları Ik"			ÇD-3 başlangıç kısa devre akımları Ik"		
	3F (kA)	2FPE (kA)	1FPE (kA)	3F (kA)	2FPE (kA)	1FPE (kA)	3F (kA)	2FPE (kA)	1FPE (kA)
ARIZA-1	11,6	-	-	-	-	-	-	-	-
ARIZA-2	65,6	74,71	70,95	17,5	28,18	22,83	2,9	2,89	2,92
ARIZA-3	19,1	12,67	15,28	11,3	10,1	10,95	3	2,91	2,94
ARIZA-4	1,9	1,4	1,63	1,9	1,38	1,6	1,2	0,947	1,05
ARIZA-5	1,1	0,754	0,878	1	0,749	0,869	0,778	0,6	0,677

Arıza-1 orta gerilim barasında olduğundan ÇD-2 ve ÇD-3'e dahil edilmemiştir. Yine bu arıza için sadece 3 fazlı kısa devre akımı çalışılmıştır. Transformatörün orta gerilim tarafı üçgen sargılı olduğu için alçak gerilim tarafından gelen asimetrik akımlar bu arızaya etkimemektedir.

Tablodan görüleceği üzere ÇD-1 de tüm arıza noktalarında en yüksek kısa devre akım değerleri elde edilmiştir.

ÇD-2 çalışmasında şebeke devre dışına çıkarılmasına rağmen senkron makineler dizel ve gaz jeneratörleri sayesinde arıza akımlarındaki düşüş sınırlı olmuştur.

Çalışma düzeni 3 de ise tahmin edileceği üzere güç elektroniği ile dağıtım sistemine bağlanan kaynaklar sebebiyle oldukça düşük kısa devre akımları görülmüştür.

ÇD-1 ve ÇD-3 arasındaki dramatik kısa devre akım değişimleri elektrik dağıtım sistemlerinde çalışan tasarımcıları oldukça zorlamaktadır.

Bir sonraki başlıkta bu değişimin devre kesicilere ve kablo kesitlerine etkisi incelenecektir.

5.9.3 Analiz Sonuçlarına Göre Koruma Koordinasyonu

Bu çalışmada yukarıda tablo-9 ile özetlenen çalışma düzenleri ve arızalara göre koruma koordinasyonu gerçekleştirilmiştir.

Koruma koordinasyonu yapılması gereken çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

a. Maksimum kısa devre akımına göre devre kesicilerin açma kapasitelerini belirlenmelidir.

b. Minimum faz nötr kısa devre akımına göre kabloların adyabatic dayanım kontrolü yapılmalıdır. Adyabatik kontrol formülü $k^2 \times S^2 > Ik^2 \times t$ sağlanmadığı takdirde kablo kesitleri artırılmalı veya devre kesici açma karakteristikleri değiştirilmelidir.

c. Minimum faz-toprak kısa devre akımına göre devre kesicilerin açma süreleri bulunur. Bu açma sürelerinin tesis topraklama tipine göre IEC 60364-4-41 de tanımlananlardan daha az olması gerekmektedir. Aksi durumda arıza tehlikeli elektrik şoklarına sebep olabilir.

d. Devre kesiciler arasında seçicilik sağlanmalıdır.

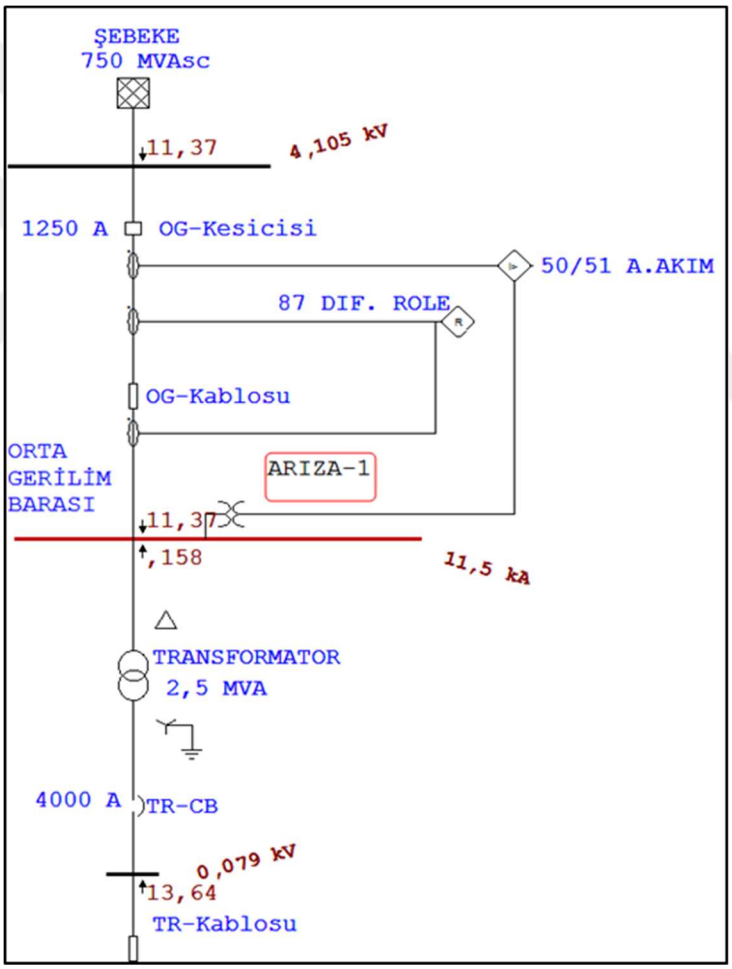
e. Arızaya en yakın devre kesicinin açmaması durumunda bir üstteki tepki verebilmelidir.

5.9.3.1 Arıza-1

Arıza-1 orta gerilimde oluşturulmuştur. Bu arızaya şebeke tarafında “OG-Kesicisi” yük tarafında ise “TR-CB” devre kesicileri tepki verecektir. Kısa devre akımında devre kesicilerin açma süreleri ve modelden bir görüntü aşağıda gösterilmiştir;

Çizelge 5. 18 A.G ETAP modeli ÇD-1 arıza-1 açma süreleri

ARIZA-1 kesici açm a süreleri			
Devre kesici adı	Kesici ve röle tipi	If-Sürekli kısa devre akımı (kA)	Hatanın Temizlenme Süresi (ms)
OG KESİCİSİ	Diferansiyel röle-87	12,51	66
	Aşırı akım rölesi 50	12,51	96
	Aşırı akım rölesi 51	12,51	401
TR-CB	4000A ACB LSI	13,568	451



Şekil 5. 62 ETAP AG modeli transformatör bara koruması

Sonuçlardan görüleceği üzere transformatörün alçak gerilim tarafında bulunan TR-CB kesicisi 451ms de devreyi kesebilmektedir. Senkron makineler dizel jeneratör ve gaz jeneratörünün olmadığı durumlarda bu zaman dilimi daha da artacaktır. Bu sebepten

OG-Kesicisi ile TR-CB kesicisi arasında aynı anda açmalarını sağlayacak bir karşılıklı kilitleme mekanizması kurulması gerekmektedir.

Modellenen OG-Kesici röleleri içerisinde kısa devre akımına en hızlı ve güvenli cevap veren röle diferansiyel röle olmuştur.

5.9.3.2 Arıza-2

Arıza-2 ana barada gerçekleştirilmiş ve en yüksek kısa devre akımına ulaşılmıştır. Ana barada gerçekleşen kısa devre akımında arızayı besleyen tüm kaynakların devreden çıkarılması istenir. Bu sebepten devre kesiciler elektrik dağıtım sistemini adyabatik hata ve elektrik şoklarına maruz bırakmadan arızaya cevap vermelidir.

Aşağıdaki çizelge 5. 18' de devre kesicilerin açma süreleri gösterilmiştir.

Çizelge 5. 19 A.G ETAP ÇD-1 arıza-2 açma süreleri

ARIZA-2 / ÇD-1 kesici açma süreleri			
Devre kesici adı	Kesici ve röle tipi	If-Sürekli kısa devre akımı (kA)	Hatanın Temizlenme Süresi (ms)
TR-CB	4000A ACB LSI	47,18	52,1
DG-CB	1600A ACB LSI	7,405	60
NGG-CB	1600A ACB LSI	9,486	60
OG Kesicisi	Aşırı akım rölesi 51	0,547	725
PV-Kuplaj-CB	1000 MCCB LSI	1,347	17866
PV-CB	1000 MCCB LSI	1,347	17866
WT-Kuplaj-CB	1250 MCCB LSI	1,557	21366
WT-CB	1250 MCCB LSI	1,557	21366

Çizelgeden de görüleceği üzere şebeke 52,1ms ile dizel ve doğalgaz jeneratörleri ise 60ms içerisinde açan kesiciler ile devreden çıkarılmaktadır.

Fakat rüzgar ve güneş santralleri devre kesicilerinin nerede ise hataya duyarsız kaldıkları gözükmektedir. Bu durum arızanın temizlenememesine bu sebepten can ve mal tehlikesine sebep olmaktadır.

Bu duruma çözüm olarak rüzgar ve güneş santralleri devre kesicilerinin diğer kaynakların kesicileri ile karşılıklı kilitlemeli olması gerekmektedir.

Yani şebeke, dizel ve doğal gaz jeneratörü devre kesicilerinde meydana gelecek açma durumlarında güç elektroniği ile sisteme bağlanan kaynakların kesicileri de açmalıdır.

ÇD-2 de şebeke devrede olmadığından kısa devre akımı düşmekte fakat yine de dağıtım sistemine direk bağlı senkron jeneratörler sayesinde yüksek değerler elde edilmektedir. Sistemde kısa devreyi besleyen dominant kaynaklar bu jeneratörlerdir.

Dizel ve doğal gaz jeneratörlerinin düşük sıfır bileşen empedansları sebebiyle 2FN ve 1FPE kısa devreleri oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

5.9.3.3 Arıza-3

Arıza-3 analizi rüzgar türbinin çıkış barasında gerçekleştirilmiştir. Arıza temizleyen kesicilerin açma süreleri;

Çizelge 5. 20.G ETAP ÇD-1 arıza-3 açma süreleri

ARIZA-3 / ÇD-1 kesici açma süreleri			
Devre kesici adı	Kesici ve röle tipi	If-Sürekli kısa devre akımı (kA)	Hatanın Temizlenme Süresi (ms)
WT-Kuplaj-CB	1250 MCCB LSI	16,156	60
WT-CB	1250 MCCB LSI	1,637	18888

WT-Kuplaj-CB ve WT-CB kesicilerinin set edilen röle değerleri;

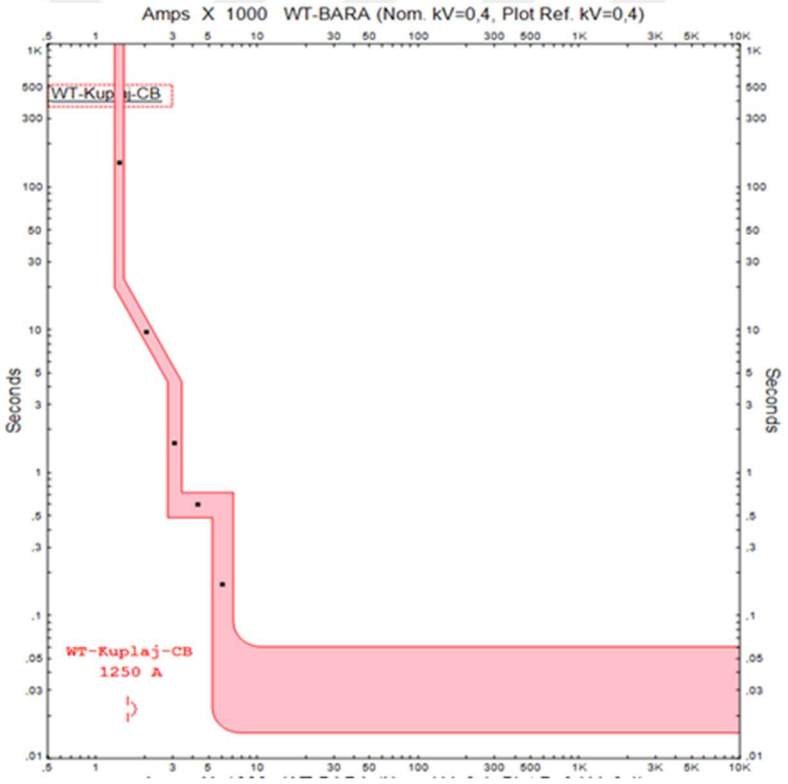
L=1250A; S=3125A (2,5); I=6250A (5)

Görüleceği üzere rüzgar türbinini elektrik dağıtım sisteminin geri kalanını ayıran “WT-Kuplaj-CB” kesicisi 60ms de devreyi ayırmaktadır. Böylece şebeke tarafından gelen kısa devreler engellenmiş olur ve arıza hatasız sistemden izole edilmiş olur. Türbin çıkış kesici WT-CB ise hatayı kabul edilemez kadar uzun bir süre beslemektedir. Bu süre elektronik açtırma rölesinin seçici kısa devre kesme akım(S) ayarını daha düşük bir değere getirerek azaltılabilir fakat bu durumda seçicilik koordinasyonunu da dikkate almamız gerekmektedir

WT-Kuplaj-CB kesicisi üzerinden şebeke tarafından gelen 16,156kA kısa devre akımı geçerken bir önceki arıza analizinde görüleceği üzere türbinden şebekeye doğru ise 1,557kA kısa devre akımı akmaktadır. WT-Kuplaj-CB kesicinin röle açma değerlerinin 1,557kA kısa devre akımına hızlı tepki verecek şekilde ayarlanması durumunda anlık oluşabilecek aşırı akımlarda (motor katkı akımı sebebiyle vb.) istenmeyen açmalar olacaktır.

Bundan dolayı bu kesicilerin aşırı akım rölelerinin tek yönlü olarak (şebekeden türbine doğru) çalışması ayrıca ada çalışma engelleme koruma sistemi ve karşılıklı açtırma üniteleri ile donatılmaları gerekmektedir.

WT-Kuplaj-CB ve WT-CB kesicilerinin elektronik LSI açma eğrisi aşağıda şekil 5. 63 de gösterilmiştir.



Şekil 5. 63 ETAP AG model elektronik LSI röle akım zaman eğrisi

5.9.3.4 Arıza-4 ve Arıza-5

Bu arızalar son kullanıcılarda meydana gelen arızalardır. Daha uzun kablo mesafeleri sebebiyle arıza-5' deki kısa devre akımları arıza-4'e göre daha düşüktür.

Bu noktalarda oluşan iki faz toprak (2FPE) ve faz toprak (1FPE) arızalarında kaçak akım röleleri 0,04-0,3 saniye arasında hatayı temizleyebilmektedir.

Fakat 3 Faz ve faz nötr (1FN) kısa devrelerinde kaçak akım rölesi gibi diferansiyel koruma röleleri tepki veremezler. Bu arızalarda aşırı akım röleleri ile devre kesilmelidir.

Çizelge 4.9' da görüleceği üzere ÇD-2 de dizel ve doğal gaz jeneratörünün katkısından dolayı arıza akımı yüksek bir seviyede sürdürülebiliyorken ÇD-3 de kısa devre akımları oldukça düşmektedir.

ÇD-2 de yapılan koordinasyonda kesicilerin uygun sürelerde hatayı giderdikleri görülmüştür.

Fakat ÇD-3 çalışmasında çok düşük kısa devre akımları ve bunlarla ters orantılı uzun açma süreleri sebebiyle iletken de adyabatik hatalar tespit edilmiştir. Yine bu açma sürelerinin IEC 60364-4-41'de tanımlanan açma sürelerini sağlayamadığı görülmüştür.

Çizelge 5. 21 A.G ETAP ÇD-3 arıza-5 açma süreleri

ARIZA-5 / ÇD-3 kesici açma süreleri			
Devre kesici adı	Kesici ve röle tipi	If-Sürekli kısa devre akımı (kA)	Hatanın Temizlenme Süresi (ms)
L-2.2-CB	63A MCCB TMA	0,628	8406

Çizelge 4.10' dan da görüleceği üzere 3 fazlı kısa devre akımı 8406ms sonra giderilebilmektedir. Bu uzun süre sebebiyle 4x10mm²N2XH besleme kablosunda adyabatik hata görülmüştür. Yine yukarıda belirtildiği üzere bu süre standartlardaki maksimum açma süresinin hayli üstündedir.

Ayrıca beslenen devre için yedekli koruma da "back-up" sağlanamamıştır. L-2.2-CB kesicisinde oluşacak bir arızan dolayı kısa devreyi temizleyememesi durumunda bir üst şalter hataya tepki verememektedir.

ETAP ile gerçekleştirilen örnek elektrik dağıtım modelinin sonuçları özetlenmiştir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere güç elektroniği ara yüzlü dağıtık üretim kaynaklarının ada çalışma durumunda düşük kısa devre katkı akımları sebebiyle koruma koordinasyonunda çok tehlikeli problemlere yol açtığı gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 6

ADA ÇALIŞMA VE ADA ÇALIŞMADA KORUMA ANALİZİ

6.

Güç elektroniği ara yüzlü kaynaklar simülasyon çalışmalarında görüldüğü ve referans verilen akademik makalelerde de tanımlandığı üzere oldukça düşük kısa devre katkı akımı vermektedir. Bu sebepten IADÜK içeren sistemlerde istemsiz ada çalışmalar can ve mal güvenliğini sağlamak amacıyla standartlarla yasaklanmıştır. Ana şebekenin kaybı durumunda oluşan istemsiz adalaşmayı fark etmek ve kaynakların enerjisini keserek sistemin güvenliğinin sağlanması gerekmektedir. Bunun için ana kaynağın kaybı rölelerinin (loss of main-LoM) kullanılması gerekmektedir. LoM olarak düşük/aşırı gerilim, düşük/aşırı frekans röleleri, frekans değişim oranı röleleri (ROCOF) kullanılmalıdır.

Ülkemizde çizelge 6.1 de gösterildiği üzere ROCOF röleleri de DÜK içeren tesislerde kullanılmalıdır. Maalesef pratikte ROCOF röleleri ulusal standartlarda tanımlanmasına rağmen özellikle PV sistemlerinin kaynak bağlantılarında nadiren kullanılmaktadır. Oysaki ROCOF şebeke kaybına en güvenilir ve doğru şekilde tepki veren rölelerdir. Aşağıdaki tabloda Birleşik Krallık standardı G59/2, ve Avrupa standardı EN 5438 in ada çalışma koruma gereksinimleri karşılaştırılmıştır [3].

Çizelge 6. 1 Uluslararası standartlarda ROCOF rölesi ayarları

	Birleşik krallık			Avrupa Standardı	
	G59/2			EN 50438	
Parametreler	**Ayarlar**		**Açma Süresi**	**Ayarlar**	**Açma Süresi**
Düşük gerilim rölesi	Kademe1	≤200V	2,5 saniye	≤195,5V	1,5 saniye
	Kademe2	≤184V	0,5 saniye		
Aşırı gerilim rölesi	Kademe1	≥253V	1 saniye		
	Kademe2	≥264V	0,5 saniye	≥264,5V	0,2 saniye
Düşük frekans rölesi	Kademe1	≤47,5 Hz	2,5 saniye	≤47,5 Hz	0,5 saniye
	Kademe2	≤47 Hz	0,5 saniye		
Aşırı frekans rölesi	Kademe1	≥51,5 Hz	1 saniye	≥51 Hz	0,5 saniye
	Kademe2	≥52 Hz	0,5 saniye		
Kaynak kaybı (LOM) rölesi	Vektör kayması K1(a) x 6 der.		-	c	
	ROCOF K2(b) x 0,125 Hz/san		-		
Tekrar bağlantı zamanı	180 saniye			3 dakika (d) veya 20 saniye e	
a	K1=1 (düşük empedanslı şebekeler için veya 1,66-2,0 yüksek empedanslı şebekeler için				
b	K1=1 (düşük empedanslı şebekeler için veya 1,66 yüksek empedanslı şebekeler için				
c	EN 50438 Ek A ulusal standartlara referans verir				
d	Mekaniksel AC üretim için				
e	Inverter temelli sistemler için				

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

7.

Bu tez kapsamında dağıtık üretim kaynakları arıza karakteristikleri tanıtılmış, koruma röleleri sınıflandırılmaları ve ERACS ile ETAP yazılımları kullanılarak örnek bir koruma koordinasyon çalışması yapılmıştır.

Senkron makinaya sahip DÜK içerilen hibrit sistemlerde özellikle kısa devre akımlarında büyük değişimler olması durumunda ve ada çalışmada klasik yönsüz aşırı akım röleleri ile koruma koordinasyonunu sağlamak oldukça zordur. Bu sebepten ada çalışma gereken enerji sistemlerinde ileri arıza analizi ile ulaşılan sonuçlara göre gerektiği hallerde IEC61850 haberleşme protokolüne sahip yönlü aşırı akım röleleri kullanılmalıdır. Bu tip IED' ler arasında haberleşme sistemi ile sağlanan açtırma bloke sinyali, akım ayar sahasında değişim vb. imkanlar koruma koordinasyonunun sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Özellikle ulusal mühendislik ve müşavirlik firmalarımız ile koruma rölesi üreticilerimizin henüz yeni gelişim gösteren bu sektöre özel önem göstermeleri gerekmektedir. Mühendislik firmalarımız yayınladıkları şartnamelerde hibrit enerji sistemi ve yeni tip koruma standartlarına atıfta bulunarak uluslar pazarımızın bu alanda gelişmesine öncülük edecektir.

Güç elektroniği ara yüzlü kaynakların arıza katkı akımları nominal akımlarına çok yaklaşıktır. Ada modunda çalışan IADÜK simülasyonlarından elde edildiği üzere aşırı akım röleleri bu kaynakların arıza akımlarını tespit edememektedir. Dolayısıyla koruma koordinasyonu sağlanamamaktadır.

Diferansiyel röleler ise yapıları gereği sadece birim ekipman koruması olarak kullanılırlar ve çok ufak fark akımlarında dahi açtırma sinyali üretebilirler. Simülasyon sonuçlarından görüleceği üzere diferansiyel röleler ile ada modunda IADUK içeren enerji dağıtım sistemlerinde sağlıklı bir koruma elde edilmiştir. Fakat klasik diferansiyel röleler beraberinde kompleks kablolamalar getirir. Ayrıca akım transformatörlerinin in-rush akımları sebebiyle istenmeyen açmalara sebep olabilmektedir.

Gerilim röleleri ile yapılan çalışmalarda arızaya çok hızlı tepki verdikleri görülmüştür. Sağlanan gecikme sinyali ile seçiciliği sağlamakta mümkün olmaktadır. Fakat simülasyonlarda özellikle büyük güçteki yük anahtarlamalarında istenmeyen açmaya sebep olmuşlardır.

Arıza kompanzasyonu metodu arıza tespit edildiği anda sisteme bir senkron jeneratörün anahtarlaması ve arızaya katkı yaparak aşırı akım rölelerinin tespit edeceği bir seviyeye çıkartmasıdır. Bu sistemde sağlıklı koordinasyon sağlanabilmekle beraber arıza tespitine oldukça bağlıdır ve çok büyük ilk yatırım maliyeti getirir.

AG seviyesinde yapıla simülasyonlarda da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Günümüzde markette AG kesiciler için en az 100A' e kadar IEC 61850 protokolüne sahip AG kesiciler üretilmektedir. Arıza analizi sonu senkron jeneratör ile ada çalışmada klasik koruma ile sağlanamayan koruma koordinasyonun bu yeni tip ürünler kullanılmalıdır.

Yatırım maliyeti veya yetersiz altyapı sebebiyle ada çalışma modunda koruma sağlanamayan dağıtım sistemlerinde ROCOF röleleri ile ana kaynağın enerji kesintisi tespit edilmeli ve DÜK' ler en hızlı şekilde sistemden ayrılması sağlanmalıdır

Çizelge 7. 1 Koruma Metotları Karşılaştırması

Koruma Rölesi	Şebeke DÜK paralel çalışma koruma ve kararlılık	DÜK ada çalışma koruma ve kararlılık	Avantaj	Dezavantaj
Aşırı Akım-Yönlü Aşırı Akım Rölesi	+	±	Yüksek akım seviyeleri için basit ve güvenilir	SJ ada çalışmada arıza akımını algılayamayabilirler. Detaylı arıza analizi yapılmalıdır. IADÜK arıza akımlarını tespit edemez.
IEC 61850 – Aşırı Akım – Yönlü Aşırı Akım Rölesi	+	±	SJ ada çalışma modunda koruma sağlayabilir. Sistemin çalışma senaryosuna göre röle ayarları değişir. Seçicilik sağlanır.	Korumada haberleşme sistemine bağımlılık. Yüksek yatırım maliyeti. İleri arıza analizi ile çalışma senaryolarının haberleşme sistemine tanıtılması.
Diferansiyel Röle	+	+	Düşük arıza akımlarında çalışabilir. Bu sayede ada çalışmada ana koruma rölesi olarak kullanılır. Seçicilik koordinasyonu sağlar.	Haberleşme sistemine bağımlıdır. Balansız akımlardan etkilenebilir. Akım transformatörlerinin in-rush akımlarından etkilenir.
Gerilim Rölesi	±	±	Düşük arıza akımlarında koruma sağlayabilir.	Büyük güçteki yük ve senkron jeneratörlerin devreye giriş çıkışlarından etkilenir. İstenmeyen açmaya sebep olur.

Çizelge 7. 1 Koruma Metotları Karşılaştırması (Devamı)

Arıza Kompanzyonu-Aşırı Akım Rölesi	+	+	Klasik aşırı akım koruma röleleri ile uyumludur.	İlk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. Haberleşme ve arıza analiz sistemine bağımlıdır.

KAYNAKLAR

[1] Jenkins, N. ve Ekanayake, J.B. ve Strbac, G., (2010). Distributed Generation, First Edition, The Institution of Engineering and Technology, London.

[2] Ackermann, T. ve Anderson, G. ve Söder, L., (2001). "Distributed Generation: a definition", Electric Power Systems Research, 57: 195-204.

[3] ARUP, (2011). 5 minute guide, Distributed Generation and Interconnection Standards, Yayın No:4, London.

[4] Antonova, G. ve Nardi, M. ve Scott, A. ve Pesin, M., (2012). "Distributed Generation and Its Impact on Power Grids and Microgrids Protection", IEEE Protective Relay Engineers 2012 65th Annual Conference, 2-6 April 2012, Texas.

[5] Buigues, G. ve Dyśko, A. ve Valverde, V. ve Zamora, I. ve Fernández, E., (2013). "Micro Protection:Technical challenges and existing techniques", ICREPQ'13, 20-22 March 2013, Bilbao.

[6] Yrd.Doç.Dr.Mustafa Baysal, (2016). Mikroşebekeler ve Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi ders notları, İstanbul.

[7] S. Chowdhury, ve Chowdhury, S.P. ve Crossley, P., (2009). Microgrids and Active Distribution Networks, First Edition, The Institution of Engineering and Technology, London.

[8] BSRIA Guide, (2008). The Illustrated Guide to Renewable Technologies, Yayın No:1, Berkshire.

[9] The Chartered Institution of Building Service Engineers, (2013). Combined Heat and Power for Buildings, Second Edition, Yayın No:12, London.

[10] ARUP, (2007). 5 minute guide, Fuel Cell, London.

[11] ABB, (2014). Technical Application Papers No_10 Photovoltaic plants, Yayın No:10, Bergamo.

[12] Shuai, Z. ve Shen, C. ve Yin, X. ve Liu, X. ve Shen, S.J, (2018). "Fault Analysis of Inverter-Interfaced Distributed Generators with Different Control Schemes", IEEE Transactions on Power Delivery, 33 (3): 1223-1235.

[13] Blaabjerg, F. ve Teodorescu, R. ve Timbus, A.V. ve Liserre, M., (2006). "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53 (5): 1398 – 1409.

[14] Balaguer, I.J. ve Lei, Q. ve Yang, S. ve Peng, F.Z. ve Supatti, U., (2011). "Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58 (1): 147-157.

[15] Yıldız Teknik Üniversitesi ders notları, (2015). Yenilenebilir Enerji Sistemleri, İstanbul.

[16] Muljadi, E. ve Gevorgian, V. ve Singh, M., (2012). "Understanding Inertial and Frequency Response of Wind Power Plants", IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, 16-18 July 2012, Colarado, 1-8.

[17] Muljadi, E. ve Gevorgian, V. ve Samaan, N., Li, J. ve Pasupulati, S., (2010). "Short Circuit Current Contribution for Different Wind Turbine Generator Types", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July 2010, Minnesota.

[18] Muljadi, E. ve Gevorgian, V., (2011). "Short-Circuit Modeling of a Wind Power Plant", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 24-29 July 2011, Michigan.

[19] LARSSON, Å., (2000). The Power Quality of Wind Turbines, Thesis for degree of doctor of philosophy, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.

[20] ARUP, (Ağustos 2015). 5 minute guide, Connection of Medium Scale Wind Generators to Weak Rural Networks, London.

[21] MTU Onsite Energy, Understanding Generator Set Ratings for Maximum performance and Reliability, www.mtuonsiteenergy.com, 11 Ağustos 2017.

[22] CATERPILLAR, Understanding Generator Set Ratings, https://www.cat.com/en_US, 11 Ağustos 2017.

[23] Cummins Power Generation, Application of lean-burn gas generator sets in standby service Power Topic#9002, www.cumminspower.com, 11 Ağustos 2017.

[24] ABB, (2012). Switchgear Manual 12th edition, Yayın No:12, Berlin.

[25] FGWILSIN, P1 OOOP1/P11 OOE1, www.fgwilson.com , Eylül 2017.

[26] FGWILSON, PG1250B2, www.fgwilson.com, Eylül 2017.

[27] John J. Grainger, J.J ve Stevenson, W.D., (1994). Power System Analysis, First Edition, Mc Graw-Hill, USA.

[28] BS EN 60909-0:2016, (2016). Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems Part 0: Calculation of Currents, BSI, UK.

[29] BS EN 60909-1:2012, (2012). Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems Part 1: Factors for Calculation of Short-Circuit Currents According to IEC 60909-0, BSI, UK.

[30] Metz-Noblat, B. ve Dumas, F. ve Poulain, C., (2005), Calculation of short-circuit currents Schneider Electric cahier technique no. 158, https://www.schneider-electric.com.hk/en/download/document/ECT158/, 10 Temmuz 2017

[31] BS EN 62271-200:2012, (2012). High-voltage switchgear and controlgear Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1kV and up to and including 52 kV, BSI, UK.

[32] Gers, J.M. ve Holmes, E.J., (2005). Protection of Electricity Distribution Networks, IET Power and Energy Series 47, Second Edition, The Institution of Engineering and Technology, London.

[33] Kiank, H. ve Fruth, W., (2011). Planning Guide for Power Distribution Plants, SIEMENS, Berlin.

[34] ABB, (2011). Distribution Automation Handbook Section 8.2 Relay Coordination, Yayın No:8.2, Bergamo.

[35] Lakervki, E. ve Holmes, E.J, (1996). Electricity distribution network design, Series 21, Second edition, The Institution of Engineering and Technology, London.

[36] Hewitt, J., (2002). Understanding Power Supply Systems Module-5 Protection Part-3, ARUP Design Guides, www.arup.com, 10 Temmuz 2017.

[37] ABB, (2010). Electrical installation handbook. Protection, control and electrical devices Sixth edition, Yayın No:6, Bergamo.

[38] SIEMENS, (2011). Application Manual-Part:2 Draft Planning, Berlin and Munich.

[39] Schneider Electric, (2013). Electrical installation handbook Part:F Protection against electric shocks, France.

[40] Schonek, J., (2006). Residual current devices in LV, Schneider Electric cahier technique no. 114, https://www.schneider-electric.com/documents/technical-publications/en/shared/electrical-engineering/protection-devices-monitoring/low-voltage-minus-1kv/ect114.pdf, 10 Temmuz 2017.

[41] ABB, (2017). Technical Application Papers No:21 Protection Criteria for Medium Voltage Networks, Yayın No:21, Bergamo.

[42] Schneider Electric, (2006). Protection Guide, https://www.schneider-electric.com/en/work/support/, 10 Temuuz 2017.

[43] Brahma, S.M. ve Trejo, J. ve Stamp, J., (2014). “Insight into Microgrid Protection”, 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, 12-15 October 2014, İstanbul, 1-6.

[44] Kara, B. ve Özveren, F. ve Usta, Ö., (2016). “Aktif Dağıtım Şebekelerinin Diferansiyel Röle ile Korunması”, Oturum SA-II, ELECO 2016, 1-3 Aralık 2016, Bursa.

[45] Sa'ed, J.A ve Favuzza, S. ve Ippolito, M.G. ve Massaro, F., (2013). "Investigating the Effect of Distributed Generators on Traditional Protection in Radial Distribution Systems", 2013 IEEE Grenoble Conference, 16-20 June 2013, Grenoble.

[46] ABB, (2017). Technical Application Papers No:18 Smart Grids 2. The "Smart" Secondary Substation, Yayın No:18, Bergamo.

[47] ABB, (2017). Technical Application Papers No:19 Smart Grids 3. Standards IEC 61850, Yayın No:19, Bergamo.

[48] IEC 62898-1:2017, (2017). Microgrids - Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification, IEC.

[49] IEC 62898-2, (2018). Microgrids - Part 2: Guidelines for Microgrid Operation (and Control) , IEC.

[50] IEC 62898-3, (2018). Microgrids - Part 3 Microgrids - Technical Requirements – Protection, IEC.

[51] Engineering Recommendation G83/2, (2014). Recommendations for the connection of Small-scale Embedded Generators (up to 16A per phase) in parallel with Public Low-Voltage Distribution Networks, ENA, London.

[52] Engineering Recommendation G59/3, (2014). Recommendations for the connection of Embedded Generating Plant to the Regional Electricity Companies' Distribution Systems, ENA, London.

[53] EPDK, (2018). Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik, EPDK, Ankara.

[54] ERACS yazılım bilgisi, www.eracs.co.uk. , Mayıs 2018.

[55] RINA Consulting, (2018). Technical Manual, Yayın No:9, Leatherhead.

[56] Power Engineering Society (2005), IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, New York.

[57] Benoît de Metz-Noblat, Gerard JEANJEAN, (1997), Dynamic Stability of Industrial Networks Schneider Electric cahier technique no. 185, https://www.schneider-electric.com/documents/technical-publications/fr/shared/electrotechnique/savoir-electrotechnique/haute-tension-plus-1kv/ct185.pdf, 10 Temmuz 2017

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	:.Okan KONDUL
Doğum Tarihi ve Yeri	:18.10.1985 / İSTANBUL
Yabancı Dili	:İngilizce
E-posta	:okan.kondul@arup.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Sakarya Üniversitesi	2007
Lise	Fen Bilimleri	Kurtuluş Anadolu Listesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2010-devam ediyor	Arup Mühendislik	Kıdemli elektrik mühendisi

2009-2010	Arel Mühendislik	İstanbul Sapphire şantiyesi proje mühendisi
2007-2008	ENCON Mühendislik	St.Petersburg kereste fabrikası saha elektrik mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1.Kondul, O. ve Yumurtacı, R. (2017). “Dağıtık Üretim Kaynaklarında Arıza Karakterleri ve ETAP Yazılımı ile Gerçekleştirilen Arıza ve Koruma Koordinasyonu Çalışması”, Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi 2017, 16-18 Kasım 2017, İstanbul.