T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ENERJİSİ İLETİM HATLARINDA ARIZA AKIMLARININ SINIRLANDIRILMASI

NİHAT AKAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI

DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. OKTAY ARIKAN

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ENERJİSİ İLETİM HATLARINDA ARIZA AKIMLARININ SINIRLANDIRILMASI

Nihat AKAY tarafından hazırlanan tez çalışması 08.12.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Altuğ BOZKURT
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ
İstanbul Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren çok değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a teşekkür ederim. TÜBİTAK MAM bünyesinde çalışmış olduğum süre boyunca tezim ile ilgili her türlü konuda akademik bilgi birikimini benimle paylaşan ve sıkıştığım yerde bana destek olan Dr. Özgür KARACASU'ya da teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında bana destek olan ve büyük yardımlarını gördüğüm aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Aralık, 2016

Nihat AKAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Hipotez 3

BÖLÜM 2

ARIZA AKIMLARININ HESAPLANMASI 4

2.1 Kısa Devre Akım Büyüklükleri 7
2.1.1 Subtansiyent (başlangıç) Kısa Devre Akımı (I_k'') 7
2.1.2 Transiyent (geçiş) Kısa Devre Akımı (I_k') 7
2.1.3 Sürekli Kısa Devre Akımı (I_k) 8
2.1.4 Darbe Kısa Devre Akımı (I_p) 8
2.1.5 Kısa Devre Açma Akımı (I_a) 8
2.1.6 Kısa Devre Açma Gücü (S_a) 9
2.2 Kısa Devre Tipleri 10
2.2.1 Üç Faz Kısa Devresi 10
2.2.2 İki Faz Kısa Devresi 11
2.2.3 Faz –Nötr Kısa Devre 12
2.2.4 Faz -Toprak Kısa Devresi 12
2.3 Kısa Devre Empedansı Hesabı 13
2.3.1 Transformatör Empedans Hesabı 13
2.3.2 Kablo-İletim Hattı Empedans Hesabı 14
2.3.3 Motor Reaktans Hesabı 15

2.3.4 Asenkron Motor Reaktans Hesabı 16
2.3.5 Generatör Reaktans Hesabı 17
2.3.6 Şebeke Empedans Hesabı 18
2.3.7 Kondansatör ve Statik Yük Reaktans Hesabı 18
2.4 Kısa Devre Hesabında Simetrili Bileşenler 18
2.4.1 Simetrili Bileşenlerde "a" Operatörü 19
2.4.2 Simetrik Kısa Devre Arızası 21
2.4.3 Asimetrik Kısa Devre Arızaları 23
2.4.3.1 Faz-Faz Kısa Devre Arızaları 23
2.4.3.2 İki Faz-Toprak Kısa Devre Arızaları 25
2.4.3.3 Faz-Toprak Kısa Devre Arızaları 27

BÖLÜM 3

ARIZA AKIM SINIRLAMA YÖNTEMLERİ 30

3.1 Geleneksel Arıza Akım Sınırlama Yöntemleri 32
3.1.1 Akım Sınırlama Reaktörü (ASR) 33
3.1.2 Yüksek Empedanslı Transformatör 33
3.1.3 Nötr Reaktörü 34
3.1.4 I_s Akım Sınırlayıcı 35
3.1.5 Akım Sınırlayıcı Sigortalar (ASS) 38
3.1.6 Küçük Güçlü Transformatör 39
3.1.7 Transformatör Nötr Noktasının Reaktör ile Topraklanması 40
3.1.8 Generatör Transformatörünün Reaktör ile Topraklanması 41
3.1.9 Güç Sisteminin Yeniden Yapılandırılması 42
3.1.10 Transformatör Merkezlerinde Bara Ayırma 42
3.1.11 Transformatör Merkezlerinde Kritik Hatları Ayırma 42
3.1.12 Gerilim Seviyesini Yükseltme 43
3.1.13 Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) Sistemlerinin Kullanılması 43
3.1.14 Nötr/Yıldız Noktası İzole Sistem 43
3.2 Modern Arıza Akım Sınırlama Yöntemleri 44
3.2.1 Katı Hal Arıza Akım Sınırlayıcılar (KHAAS) 45
3.2.1.1 Rezonans Tipli KHAAS 45
3.2.1.2 Bypass Anahtarlı Empedans KHAAS 47
3.2.1.3 Köprü Tipi KHAAS 48
3.2.2 Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılar (SAAS) 49
3.2.2.1 Rezistif SAAS 52
3.2.2.2 Endüktif SAAS 54
3.2.3 Hibrit Arıza Akım Sınırlayıcı (HAAS) 57
3.2.4 Elektromanyetik Arıza Akım Sınırlayıcı (EAAS) 57

BÖLÜM 4

AKIM SINIRLAMA REAKTÖRÜ (ASR) 59

4.1 ASR Uygulamalarında Dikkat Edilecek Hususlar 61
4.2 ASR Endüktans Değerinin Belirlenmesi 62
4.3 ASR'lerin Kullanıldığı Yerler 62
4.3.1 İki Ana Bara Arasında Kullanım 63
4.3.2 Ana Bara Transfer Bara/Ana Bara Arasında Kullanım 64
4.3.3 Kritik Fider Girişlerinde Kullanım 64
4.3.4 Transformatör Merkezleri veya Bara Grupları Arasına Kullanım 65

4.3.5 Transformatör Çıkışlarında Kullanım 66
BÖLÜM 5
BENZETİM ÇALIŞMALARI 67
5.1 Model Eşdeğer Metodu 67
5.2 Tahmin Eşdeğer Metodu 68
5.3 Tutarlılık Eşdeğer Metodu 68
5.4 Test Sistemi 68
BÖLÜM 6
ANALİZ ÇALIŞMALARI 74
6.1 Bara Ayırma Etkileri 74
6.2 Transformatör Empedansı Artırmanın Etkileri 75
6.3 Seri Reaktör Kullanımının Etkileri 78
6.3.1 Bara Arızalarında Seri Reaktör Kullanımının Etkileri 78
6.3.2 İletim Hattı Arızalarında Seri Reaktör Kullanımının Etkileri 84
6.4 Seri Rezonans Tipli KHAAS 86
6.5 Farklı AAS Yöntemlerinin Etkilerinin Karşılaştırılması 89
BÖLÜM 7
SONUÇ ve DEĞERLENDİRME 92
KAYNAKÇA 94
EK-A
THEVENİN KAYNAK EMPEDANS HESABI 99
ÖZGEÇMİŞ 104

SİMGE LİSTESİ

a	Simetrili bileşen operatörü
C	Gerilim faktörü
C	Kapasite
D	Diyot
L	Endüktans
I_a	A faz akımı (A)
I_b	B faz akımı (A)
I_c	C faz akımı (A)
I_{a+}	A faz akımı pozitif sıra bileşeni
I_{a-}	A faz akımı negatif sıra bileşeni
I_{a0}	A faz akımı sıfır sıra bileşeni
I_a	Açma kısa devre akımı (A)
I_k	Kısa devre akımı (A)
I_k''	Subtransiyent kısa devre akımı (A)
I_k'	Transiyent kısa devre akımı (A)
I_p	Darbe kısa devre akımı (A)
I_c	Kritik akım
I_{kft}	Faz toprak kısa devre akımı (A)
I_{k3f}	3 faz kısa devre akımı (A)
I_{kff}	3 faz kısa devre akımı (A)
I_{kfn}	Faz nötr kısa devre akımı (A)
P_{kcu}	Transformatör bakır kayıpları (W)
R_{trafo}	Transformatör direnci (Ω)
S_a	Kısa devre açma gücü (VA)
S_n	Transformatör gücü (VA)
V_a	A faz gerilimi (V)
V_b	B faz gerilimi (V)
V_c	C faz gerilimi (V)
V_{a+}	A faz gerilimi pozitif sıra bileşeni
V_{a-}	A faz gerilimi negatif sıra bileşeni
V_{a0}	A faz gerilimi sıfır sıra bileşeni
V	Gerilim (V)
V_{ff}	Fazlar arası gerilim (V)
X_{trafo}	Transformatör reaktansı (Ω)
Z	Empedans (Ω)
Z_k	Toplam kısa devre empedansı (Ω)
Z_{kd}	Kısa devre empedansı (Ω)
Z_{trafo}	Transformatör empedansı (Ω)
Z_{kablo}	Kablo empedansı (Ω)

Z_f Arıza empedansı (Ω)

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif akım
AAS	Arıza akım sınırlayıcı
ASR	Akım sınırlama reaktörü
ASS	Akım sınırlayıcı sigorta
DA	Doğru akım
DAAS	Dinamik arıza akım sınırlayıcı
EAAS	Elektromanyetik arıza akım sınırlayıcı
HAAS	Hibrid arıza akım sınırlayıcı
HP	Beygir gücü
KHAAS	Katı hal arıza akım sınırlayıcı
OG	Orta gerilim
SAAS	Süperiletken arıza akım sınırlayıcı
TKSK	Tristör korumalı seri kompanzasyon
TM	Transformatör merkezi
TR	Transformatör
TVA	Tetiklemeli vakum anahtarı
YG	Yüksek gerilim
YGDA	Yüksek gerilim doğru akım
YSS	Yüksek sıcaklıklı süperiletken

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Generatöre yakın 3 fazlı kısa devre arıza akımının değişimi [4] 5
Şekil 2.2 Generatöre uzak 3 fazlı kısa devre akımının değişimi [4] 7
Şekil 2.3 R/X oranına bağlı olarak K katsayısının değişimi 8
Şekil 2.4 μ katsayısının I_k''/I_r değerine bağlı değişimi 9
Şekil 2.5 Üç faz kısa devre şeması [5] 11
Şekil 2.6 İki faz kısa devre şeması [5] 11
Şekil 2.7 Faz-nötr kısa devre şeması [5] 12
Şekil 2.8 Faz toprak kısa devre şeması [5] 12
Şekil 2.9 Simetrili bileşenler vektörel diyagramları 19
Şekil 2.10 Simetrik üç faz kısa devre arızası 21
Şekil 2.11 Dengeli üç fazlı sistemde simetrili bileşenler eşdeğer devre şeması 22
Şekil 2.12 Faz faz kısa devre arızası 23
Şekil 2.13 Faz faz kısa devre arızası için simetrili bileşenler bağlantı devresi 24
Şekil 2.14 İki Faz-toprak kısa devre arızası 25
Şekil 2.15 iki faz toprak kısa devre arızası için simetrili bileşenler bağlantı devresi 26
Şekil 2.16 Faz toprak kısa devre arızası 27
Şekil 2.17 Faz toprak kısa devre arızası için simetrili bileşenler bağlantı devresi 28
Şekil 3.1 Arıza akım sınırlama yöntemleri [9] 30
Şekil 3.2 Çin'deki yüksek empedanslı transformatör uygulaması [9] 34
Şekil 3.3 Hava çekirdekli nötr reaktörleri [20] 34
Şekil 3.4 Hava çekirdekli nötr reaktörünün yapısı [20] 35
Şekil 3.5 I_s Sınırlayıcı [22] 36
Şekil 3.6 I_s sınırlayıcının kısımları [22] 36
Şekil 3.7 Arıza sırasında Is sınırlayıcıdaki akım komutasyonu [22] 37
Şekil 3.8 I_s sınırlayıcının genel yapısı [24] 37
Şekil 3.9 I_s sınırlayıcı ile kesici karşılaştırması [22] 38
Şekil 3.10 ASS uygulaması [25] 39
Şekil 3.11 Tek adet transformatör kullanımı [26] 39
Şekil 3.12 Birden fazla küçük güçlü transformatör kullanımı [26] 40
Şekil 3.13 Nötr reaktörü ile topraklanan sistem [26] 41
Şekil 3.14 Generatör transformatörünün yıldız noktasının reaktör ile topraklanması 42
Şekil 3.15 Nötr noktası izoleli sistem 44
Şekil 3.16 Seri rezonans tabanlı KHAAS devresi [31] 46
Şekil 3.17 Paralel rezonans tabanlı KHAAS devresi 47
Şekil 3.18 Seri-paralel rezonans tabanlı KHAAS devresi [31] 47
Şekil 3.19 Bypass anahtarlı empedans KHAAS devresi [35] 48
Şekil 3.20 Yarı kontrollü köprü tipi KHAAS devresi [34] 49
Şekil 3.21 Tam kontrollü köprü tipi KHAAS devresi [36] 49

Şekil 3.22 Süperiletkenlik kritik yüzeylerinin faz diyagramı [38] 50
Şekil 3.23 YBCO'nun dış manyetik alandaki sıcaklık-direnç eğrisi [39] 50
Şekil 3.24 SAAS'nin uygulama yerleri [37] 51
Şekil 3.25 220 kV/300 MVA SAAS [42] 52
Şekil 3.26 Rezistif SAAS devresi ve R_{si}üzerindeki gerilim [43] 53
Şekil 3.27 Şönt dirençli rezistif SAAS malzemesinin yapısı [33] 53
Şekil 3.28 Korunmuş çekirdekli endüktif SAAS devresi [46] 54
Şekil 3.29 Eksenel kesitte süperiletkenlik durumunda manyetik indüksiyon [48] 55
Şekil 3.30 Eksenel kesitte rezistif durumda manyetik indüksiyon [48] 55
Şekil 3.31 Korunmuş çekirdekli endüktif SAAS modeli [48] 55
Şekil 3.32 Doyurulabilir çekirdekli endüktif SFCL devresi [43] 56
Şekil 3.33 HAAS eşdeğer devresi [30] 57
Şekil 4.1 Üç fazlı kutu tip hava çekirdekli ASR [52] 60
Şekil 4.2 Endüktansın arıza akımı üzerindeki etkisi [54] 62
Şekil 4.3 Çift baralı düzenleme [27] 63
Şekil 4.4 ASR'nin bara bölüm kesicisiyle seri bağlantısı [27] 64
Şekil 4.5 ASR'nin bypass kesicisiyle seri bağlantısı [27] 64
Şekil 4.6 ASR'nin fiderlerle seri bağlantısı [27] 65
Şekil 4.7 ASR'nin baralar arası bağlantısı [17] 65
Şekil 4.8 ASR'nin transformatör çıkışındaki bağlantısı [26] 66
Şekil 4.9 Transformatör ve ASR empedansının seri bağlantısı [26] 66
Şekil 5.1 İkitelli TM tek hat diyagramı 69
Şekil 5.2 Direk konfigürasyonu (3PA) Digsilent PowerFactory Modeli 70
Şekil 5.3 İkitelli TM 380kV barası kısa devre etüdü [57] 71
Şekil 5.4 İkitelli TM 154kV A barası kısa devre etüdü [57] 71
Şekil 5.5 İkitelli TM 154kV B barası kısa devre etüdü [57] 72
Şekil 5.6 İkitelli TM Eşdeğer Devre Modeli 72
Şekil 6.1 Bara ayırma yöntemi devre topolojisi 74
Şekil 6.2 Bara ayırma kısa devre sonuçları (a) 154 kV A barası (b) 154 kV B barası ... 75
Şekil 6.3 Transformatör empedans artırma devre topolojisi 76
Şekil 6.4 Transformatör % uk değerine bağlı olarak 154 kV barasındaki kısa devre akım değişimleri 76
Şekil 6.5 Transformatör empedansı artırma kısa devre sonuçları (a) 3 faz kısa devre . sonuçları (b) 1 faz kısa devre sonuçları 77
Şekil 6.6 Transformatör % uk değerine bağlı olarak transformatör kayıp değişimi 77
Şekil 6.7 154 kV baralar arası seri reaktör ile bağlantı eşdeğer devre topolojisi 79
Şekil 6.8 Seri reaktör değerine bağlı olarak 154 kV A ve 154 kV B baralarında meydana gelen 3 faz kısa devre akım değişimi 79
Şekil 6.9 Kuplajın kapalı olması durumunda seri reaktörün TM içindeki konumları 80
Şekil 6.10 Seri reaktör hat uygulaması eşdeğer devre topolojisi 84
Şekil 6.11 Seri reaktörün bağlı olduğu baranın gerilim profili değişimi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası 85
Şekil 6.12 Seri reaktörün kısa devre arıza akımı üzerindeki etkisi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası 86
Şekil 6.13 Seri rezonans tipli KHAAS yapısı [59] 87
Şekil 6.14 Seri rezonans tipli KHAAS çalışma karekteristiği [59] 87
Şekil 6.15 Seri rezonans tipli KHAAS uygulama devre topolojisi 88
Şekil 6.16 Seri rezonans tipli KHAAS'ın arıza akımı üzerindeki etkisi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası 88

Şekil 6.17 Seri rezonans tipli KHAAS'ın bağlı olduğu baranın gerilim değişimi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası 89
Şekil 6.18 154 kV A barası için arıza akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması .. 90
Şekil 6.19 154 kV B barası için arıza akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması .. 91

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Motor subtransiyent ve transiyent reaktans değerleri 16
Çizelge 2.2 Generatör subtransiyent ve transiyent reaktans değerleri 17
Çizelge 5.1 İkitelli TM ile bağlantılı iletim hatları [56] 70
Çizelge 5.2 İkitelli TM'ye ait üç faz kısa devre akımları 71
Çizelge 5.3 İkitelli TM'ye ait gerçek ve hesaplanan üç faz kısa devre akımları 73
Çizelge 6.1 154 kV bara ayırma kısa devre sonuçları 75
Çizelge 6.2 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV A barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı 81
Çizelge 6.3 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV B barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı 82
Çizelge 6.4 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV A barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı 83
Çizelge 6.5 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV B barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı 83

ÖZET

ELEKTRİK ENERJİSİ İLETİM HATLARINDA ARIZA AKMLARININ SINIRLANDIRILMASI

Nihat AKAY

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Elektrik enerjisine olan talebin artması, güç sistemlerinin sürekli genişlemesini ve karmaşıklaşmasını beraberinde getirmektedir. Yeni üretim santrallerinin, hatların ve yüklerin devreye girmesi sistemdeki güç akışını ve buna bağlı olarak herhangi bir arıza sırasında ortaya çıkacak kısa devre akımının seviyesini artırmaktadır. Bu durum belirli kısa devre sınırlarına göre tasarlanan ve/veya seçilen güç sistem ekipmanlarının dayanın sınırlarının zorlanmasına, hatta zarar görmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, arıza akımlarının sınırlandırılması her geçen gün önem kazanmaktadır. Bu bakış açısıyla, güç sistemlerinde kullanılan arıza akım sınırlama yöntemleri incelenmiş ve uygulanabilir olanları Türkiye iletim sisteminden seçilen bir transformatör merkezinde yapılan benzetim çalışmaları ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, arıza akımı sınırlayıcıların kısa devre akım sınırına yaklaşan transformatör merkezleri için etkili bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Arıza Akım Sınırlayıcılar, Arıza Akımları

ABSTRACT

LIMITATIONS OF FAULT CURRENTS ON ELECTRICAL ENERGY TRANSMISSION LINES

Nihat AKAY

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Oktay ARIKAN

The growing demand for electrcity consumption results in increasing complexity and continous expansion of power systems. By the connection of new power plants, lines and loads to grid, the level of transfered energy and fault currents increases accordingly. As a result of this phenomenon, equipment breakdowns and even system blackouts may occur. Thus, limiting of fault currents becomes a critical problem to be solved by system operators. Within this perspective, several fault current limiter methods are studied and an example on fault current limiting application on a sample part of Turkish Transmission System is presented. The results indicate that fault current limiters come out as an effective solution for transformer substations operating close to their short circuit withstand limits.

Key Words: Fault Current Limiter, Fault Currents

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Güç sisteminin büyümesine bağlı olarak Trafo Merkezlerinin (TM) kısa devre güçleri dolayısıyla kısa devre akım seviyeleri her geçen gün yükselmektedir. Bununla birlikte her TM Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nde gerilim seviyesine bağlı olarak tanımlanmış kısa devre akımı üst sınır değerlerine göre tasarlanmaktadır. Şebekenin bu gelişmesine bağlı olarak Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nde de değişikliğe gidilmiş ve 400kV gerilim seviyesinde kısa devre akım üst sınır değeri 50kA'den 63kA'e yükseltilmiştir [1]. Bu süreçte 154kV gerilim seviyesindeki kısa devre akım üst sınır değeri 31,5 kA olarak bırakılmıştır. Yönetmelikte yapılan bu değişikliğin resmi gazetede yayınlanmasından sonra kurulacak TM'lerin yeni sınıra uygun olarak tasarlanması gerekmektedir. Bununla birlikte işletmede olan TM'ler 50kA kısa devre akım sınırı ile işletilmektedir ve bu TM'lerin güncel yönetmeliğe göre tekrar yenilenmesi ekonomik bir yöntem olarak görülmemektedir. Sistem güvenliği ve sürekliliği göz önüne alındığında kısa devre akımlarının sınırlandırılması alternatif bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, arıza akımlarının sınırlandırılması için birçok çalışma yapıldığı görülmektedir [2][3]. Tarihsel gelişime bakıldığında ilk çalışmaların kısa devre yolu üzerindeki ekipmanların empedanslarının artırılmasına veya yeni empedanslar eklenmesine odaklandığı görülmektedir. Geleneksel yöntemler olarak tanımlanabilecek bu yöntemlerde, şebekedeki sürekli empedans artışlarının kayıplar, geçici hal davranışı ve gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkilemesi, sadece arıza sırasında devrede olan arıza akım sınırlayıcılarının geliştirilmesine yol açmıştır. İdealde normal işletme durumunda herhangi bir gerilim düşümüne sebep olmaması istenen modern arıza akım sınırlama yöntemleri, yarı iletken ve süper iletken teknolojilerindeki

gelişimine paralel olarak gelişmektedir. Geliştirilen cihazların büyük bir kısmı orta gerilim seviyesinde kullanılsa da yüksek gerilim seviyesi içinde prototip cihazlar geliştirilmektedir [4].

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. 2'nci bölümde kısa devre akım hesaplamaları hakkında genel bilgi verilmiştir. 3'üncü bölümde arıza akımı sınırlama yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir. 4'üncü bölümde arıza akım sınırlama yöntemlerinden bir olan seri reaktör kullanımı incelenmiştir. 5'inci bölümde analizlerin yapılacağı şebeke modeli ve modelleme ile ilgili detaylar verilmiştir. 6'ncı bölümde belirlenen 4 faklı arıza akım sınırlama yöntemlerinin etkinliklerini incelemek için analiz çalışmaları yapılmıştır. 7'nci ve son bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Elektrik enerjisine olan talep giderek arttırmaktadır. Ortaya çıkan ihtiyacın karşılanması için elektrik güç sistemlerine her geçen gün yeni üretim birimleri eklenmektedir. Buna bağlı olarak, üretilen enerjinin son kullanıcıya ulaştırılmasını sağlayan enerji iletim ve dağıtım sistemi de genişleyerek daha karmaşık yapıya doğru gitmekte ve birçok problemi de beraberinde getirmektedir.

Güç sistemlerinde meydana gelen ve çözülmesi gereken önemli problemlerden bir tanesi, oluşan arızalar sonucu meydana gelen kısa devre akımlarının sınırlandırılmasıdır. Sistemin kısa devre gücünün her geçen gün yükselmesiyle beraber arıza akımlarının seviyeleri de artmaktadır. Yüksek genlikli arıza akımları sebebiyle, kullanılan cihaz/ekipmanların hasar görmesi istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, arıza akımlarının sistemin işletilmesine zarar vermeyecek seviyelerde tutulması gerekmektedir.

Güç sistemlerinde meydana gelen arıza akımlarının sistem ekipmanlarına zarar vermemesi için tüm sistemin en kötü arıza durumuna dayanacak şekilde dizayn edilmesi gerekir. Yeni kurulacak tesislerde daha yüksek arıza akımları göz önüne alınarak tasarım yapılmaktadır. Ancak mevcut işletmedeki sistemlerin arıza akımlarından zarar görmemesi için yenilenmesi ekonomik açıdan uygun değildir. Mevcut tesisleri arıza akımlarına göre yenilemek yerine arıza akımlarını sistem ekipmanlarına zarar vermeyecek seviyeye indirmek daha ekonomik bir yöntemdir.

1.3 Hipotez

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyaç he geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için güç sistemine yeni üretim santralleri eklenmektedir. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak güç sistemlerinde meydana gelen arıza akım seviyeleri yükselmektedir. Güç sisteminin güvenli ve sürekli çalışabilmesi, güç sistem ekipmanlarının zarar görmemesi için arıza akımlarının sınırlanması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, arıza akımlarını sınırlama yöntemleri ve cihazları ile ilgili detaylı bir araştırma yapılmıştır. Arıza akım sınırlama yöntemlerini etkinliklerini incelemek için İkitelli TM eşdeğer devre modeli Digsilent Power Factory de oluşturulmuştur. Model üzerinde faklı arıza akım sınırlama yöntemi ile ilgili analizler yapılmıştır. Her yöntemin kendi içinde avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

BÖLÜM 2

ARIZA AKIMLARININ HESAPLANMASI

Güç sistemlerinde faz iletkenleri arasında veya faz iletkeni ile toprak arasında izolasyonun herhangi bir nedenden dolayı ortadan kalkması sonucunda oluşan yüksek değerli arıza akımına kısa devre akımı denir. Arıza durumunda arıza noktası ile kaynak arasındaki empedansın çok küçük olması yüksek akımların oluşmasına sebep olur. Bu nedenle arıza akım yolu üzerindeki tüm ekipmanlar kısa devrenin termik ve dinamik etkilerine maruz kalırlar. Ancak güç sistemlerinde kullanılan ekipmanlar kısa devrenin bu etkilerine, koruma ekipmanları tarafından belirlenen sürede dayanacak şekilde seçilmiş ve tesis edilmişse kısa devre akımı sistem ekipmanları üzerinde bir tahribat oluşturmayacaktır. Güç sistemlerinde kullanılan bu ekipmanlar koruma sisteminin devreye girmesi için gereken sürede kısa devre akımına dayanamazsa ekipmanların hasar görmesinin yanında sistem içerisinde başka ekipmanlarında zarar görmesine sebep olurlar [1].

Bu sebeplerden dolayı, güç sistemlerinde arıza oluşması halinde çeşitli koruma ekipmanları (röle, kesici, ayırıcı vb) tarafından arızalı bölge sistemin geri kalanından izole edilir. Bu sayede sistemin sürekliliği sağlanmış olur.

Kısa devre durumunda meydana gelen arıza akımının değeri,

$$E_Y = \frac{E}{\sqrt{3}} \tag{2.1}$$

olmak üzere,

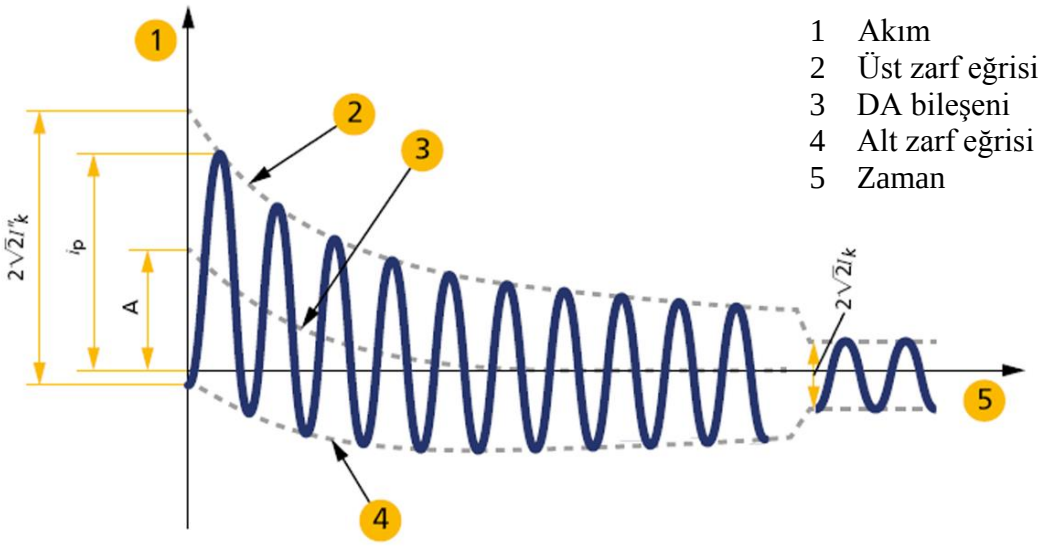
$$I_k = \frac{E_Y}{\sum Z} \tag{2.2}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Bu eşitlikte E_Y gerilimi elektromotor kuvveti (V), Z ise kısa devre durumunda kaynak ile arıza noktası arasındaki empedansların (Ω) toplamını ifade etmektedir. Bu empedans içinde generatör ve şebeke empedansları dahil edilmiştir.

Güç sistemlerinin herhangi bir noktasında meydana gelebilecek kısa devre akımının hesabı için, kısa devre noktası ile kaynak arasındaki empedanslar içinde generatör empedansının özel bir yeri bulunmaktadır. Kısa devre olayı boyunca generatör uyarma alanı, endüvi reaksiyonlarından dolayı zayıflar bunun sonucunda generatör klemens gerilim düşer.

Kısa devre olmadan önce, arızayı besleyen kaynak gerilimi sabit kabul edilirse, klemens gerilimin azalmasının, generatör empedansının artmasının sonucu olduğu kabul edilmiştir. Generatör empedansının büyümesi ile kısa devre akımı, kısa devre noktasının generatöre ne kadar yakın ise o kadar hızlı düşmektedir. Tam uyarmalı ve klemensleri aniden kısa devre edilmiş üç fazlı bir genetarörün kısa devre akımının zamana bağlı değişimi Şekil 2.1'de verilmiştir [6].



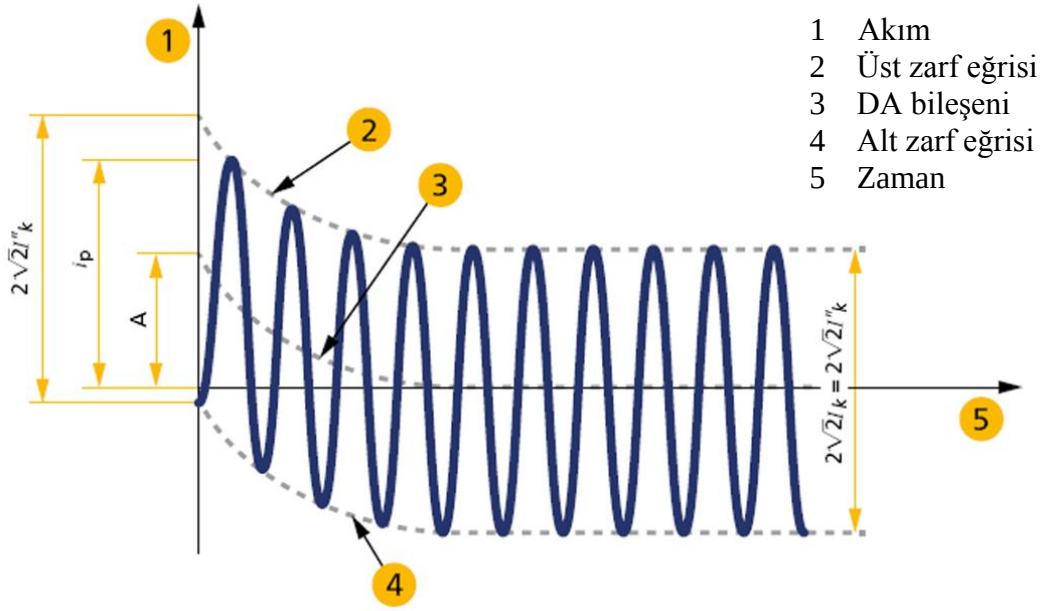
Şekil 2.1 Generatöre yakın 3 fazlı kısa devre arıza akımının değişimi [7]

- ✓ I_k'': Subtransiyent başlangıç kısa devre akımı
- ✓ I_k: Sürekli kısa devre akımı
- ✓ I_p: Darbe kısa devre akımı
- ✓ A: Doğru akım bileşeninin başlangıç değeri

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi akım ilk olarak yüksek bir değere ulaşmakta (I_p) ve daha sonra hızlı bir şekilde azalarak kararlı bir değere gelmektedir. Kısa devre akımının sürekli kısa devre akım değerine ulaşması endüvide meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır. Bu olayda generatör uyarma alanının zayıflaması sonucunda emk azalmaktadır. Böylece kısa devre akımı oldukça yavaş bir şekilde kararlı, sürekli kısa devre akımına geçmekte ve bu olay transiyent geçiş olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçteki kısa devre akımının değişimine transiyent kısa devre akımı değişimi denilmektedir. Kısa devre olayının başlangıcında oluşan ve çok hızlı bir şekilde azalan kısa devre akımı ise subtransiyent kısa devre akımı olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kısa devre akımı generatörün subtransiyent reaktansına ve transiyent reaktansına bağlı olarak yüksek bir değerden başlayarak birkaç periyot içinde azalır. Kısa devre akımındaki bu geçici durum, transiyent reaktansına bağlı bir sürekli kısa devre akımına ulaşması ile sona ermektedir. Kısa devre akımının sürekli kısa devre akımına ulaşması generatörün senkron reaktansı tarafından belirlenir. Kısa devre durumda arızadaki doğru akım bileşeninden dolayı kısa devre akımının zaman eksenine göre simetrisi bozulmakta ve arıza akım değişimi eksenin bir tarafında oluşmaktadır [6].

Generatöre yakın bir noktada kısa devre olması durumunda kısa devre değişimi generatör klemesnlerinde meydana gelen akım değişimine benzer olmaktadır. Ancak, generatörden uzak bir noktada kısa devre meydan gelirse, generatör empedansının ektisi toplam empedansa oranla küçük olacağından dolayı generatör empedansının kısa devre akım değişimi üzerinde bir etkisi oluşmayacaktır. Generatöre uzak noktada meydana gelen kısa devre akım değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Generatöre uzak 3 fazlı kısa devre akımının değişimi [7]

2.1 Kısa Devre Akım Büyüklükleri

Kısa devre olayının başlangıcında ve devamında arıza akım büyüklükleri, güç sistemlerinin tasarım ve analiz ile ekipmanlarının korunmasında büyük öneme sahiptir.

2.1.1 Subtansiyent (başlangıç) Kısa Devre Akımı (I_k'')

I_k'' akımı kısa devre akımının alternatif bileşeninin ilk periyottaki en büyük değeridir. Kısa devre hesabında, kısa devre yolu üzerindeki güç sistem ekipmanlarının kaynaklar dahil olmak üzere karakteristiklerinden yaralanarak hesaplanan ilk büyüklüktür [6][7].

Başlangıç kısa devre akımı,

$$I_k'' = \frac{c * U}{\sqrt{3} * Z_k} \tag{2.3}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada U fazlar arası gerilimi (V), Z_k ile toplam kısa devre empedansını (Ω) ifade etmektedir. Eşitlikte kullanılan c katsayısı ise IEC 60909'a göre gerilim seviyesine bağlı olarak 0.95-1.1 arasında değişen bir değerdir.

2.1.2 Transiyent (geçiş) Kısa Devre Akımı (I_k')

Kısa devre durumunda subtransiyent kısa devre akımı ile sürekli kısa deve akım arasındaki geçiş akımına transiyent kısa devre akımı (I_k') denir.

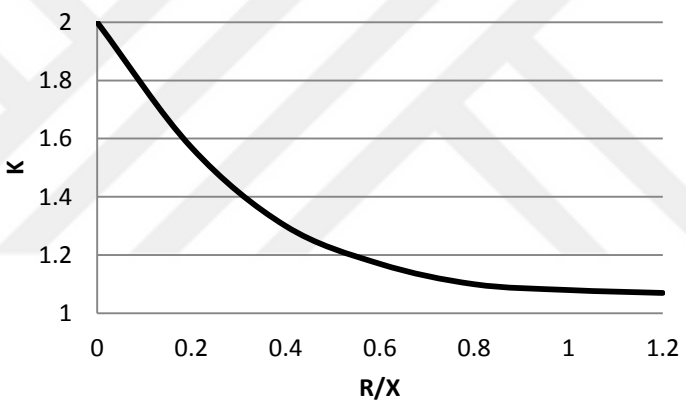
2.1.3 Sürekli Kısa Devre Akımı (I_k)

Kısa devre olayında kısa devre akımının geçici olaylarından sonra geriye kalan sürekli kısmını ifade

2.1.4 Darbe Kısa Devre Akımı (I_p)

I_p akımı kısa devre olayı başladıktan sonraki ilk periyottaki akımın en büyük değeridir. Bu değer efektif değer olarak değil, maksimum değer olarak alınır. Darbe kısa devre akımı kısa devre anındaki gerilimin durumuna ve şebekenin empedans yapısına bağlı olarak değişir.

Darbe kısa devre akımı katsayısı kısa devre akım yolu üzerinde bulunan güç sistem ekipmanlarının empedanslarına bağlı değişimi Şekil 2.3'de verilmiştir [6][8]. I_p değeri ekipmanların kısa devrenin dinamik dayanımı bakımından önemlidir.



Şekil 2.3 R/X oranına bağlı olarak K katsayısının değişimi

$$K = 1.02 + 0.98 * e^{-3*\frac{R}{X}} \tag{2.4}$$

$$I_p = K * \sqrt{2} * I_k'' \tag{2.5}$$

I_p'nın K katsayısına bağlı eşitliği denklem (2.5)'de verilmiştir. Pratikte şalt tesisleri için K=1.8 olarak kullanılmaktadır.

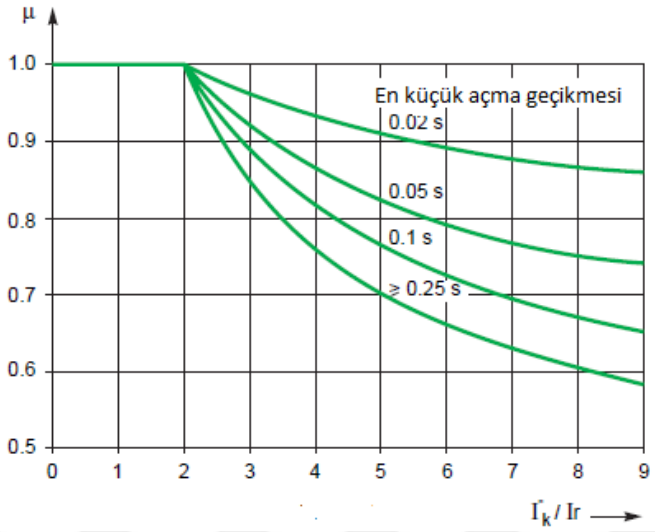
2.1.5 Kısa Devre Açma Akımı (I_a)

Kısa devre olayında kısa devrenin kesilmesi ile kesici kontaklarının ayrılması esnasında kesici uçlarından akan kısa devre akımı olup, güç sistemlerinde kesicinin devreyi açma

zorlanmasını belirleyen büyüklüktür. Kısa devre akımının sona ermesini ve kesicinin minimum açma gecikmesini belirler. Kısa devre açma akımı,

$$I_a = \mu * I_k'' \tag{2.6}$$

eşitliği ile hesaplanır. Denklem (2.6) da verilen μ katsayısının I_k''/I_r değerine bağlı değişimi Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 μ katsayısının I_k''/I_r değerine bağlı değişimi

I_r kısa devreyi besleyen generatörlerin akımlarının toplamını ifade etmektedir. I_r ifadesi,

$$I_r = \frac{\sum S_n}{\sqrt{3} * U_n} \tag{2.7}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. S_n kısa devreyi besleyen toplam gücü (W), U_n ise fazlar arası gerilimi (V) ifade eder.

$\frac{I_k''}{I_r} < 2$ ise generatöre uzak kısa devre söz konusudur. Bu durumda μ=1 olarak kullanılır [8].

2.1.6 Kısa Devre Açma Gücü (S_a)

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre akımlarının devre ekipmanları üzerindeki dinamik zorlanmalarını inceleyebilmek için darbe kısa devre akımı, açma kısa devre akımı ve kısa devre açma gücünün bilinmesi gerekmektedir. Kısa devre akımının doğru akım bileşeninin etkisinin küçük olmasından dolayı doğru akım bileşen ihmal

edilmektedir. Kesicilerin minimum açma gecikmesi0.1-0.25 sn olduğundan dolayı bu ihmalin bir sakıncası yoktur [6][8].

Kısa devre açma gücü,

$$S_a = \sqrt{3} * U * I_a \tag{2.8}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Bu ifadede U fazlar arası gerilimi (V), I_a ise kısa devre açma akımını (A) ifade etmektedir.

2.2 Kısa Devre Tipleri

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre tipleri dört başlık altında toplanabilir. Bular;

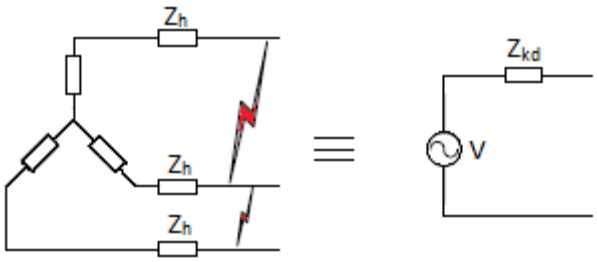
- ✓ Üç faz kısa devre,
- ✓ İki faz kısa devre,
- ✓ Faz nötr kısa devre,
- ✓ Faz toprak kısa devre,

olarak ifade edilir.

Bu kısa devre tipleri kendi içinde asimetrik arızalar veya simetrik arızalar olarak tekrar gruplanabilir. Sadece üç faz kısa devre arızaları simetrik arızadır. Bu arıza meydana gelmesi durumunda her fazdan aynı kısa devre akımı akar. Diğer kısa devre tipleri asimetrik arızalardır. Güç sistemlerinde meydana gelen arıza tiplerinden en yüksek akım üç faz kısa devre sonucunda oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı güç sistemleri tasarlanırken üç faz kısa devre akımına dayanacak şekilde yapılandırılması gerekmektedir.

2.2.1 Üç Faz Kısa Devresi

Güç sistemlerinde kullanılan ekipmanların aşırı akım açma kapasitesinin, termik ve dinamik dayanıklılıklarının belirlenmesi için üç faz kısa devre akımı kullanılmaktadır. Üç faz kısa devresine ait sembolik devre şeması Şekil 2.5'de verilmiştir. Üç faz kısa devre akım I_{k3f} olarak belirtilmiştir [8][9].



Şekil 2.5 Üç faz kısa devre şeması [8]

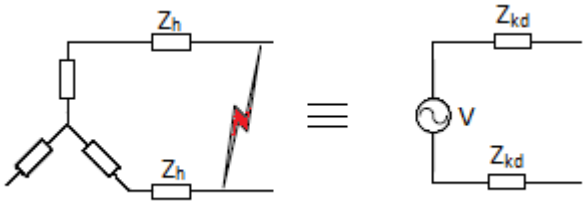
I_{k3f} üç faz kısa devre akımı (A),

$$I_{k3f} = \frac{V_{ff}}{\sqrt{3} * Z_{kd}} \tag{2.9}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, V_{ff} fazlar arası gerilimi (V), Z_{kd} toplam arıza empedansı (Ω) ifade etmektedir.

2.2.2 İki Faz Kısa Devresi

Bu arıza tipinde iki faz iletkeni arasında kısa devre meydana gelmektedir. İki faz kısa devresine ait sembolik devre şeması Şekil 2.6'da verilmiştir. İki faz kısa devre arızasında toplam empedansın üç faz kısa devre arızasından büyük olmasından dolayı iki faz kısa devre akımı üç faz kısa devre akımından daha düşüktür [8][9].



Şekil 2.6İki faz kısa devre şeması [8]

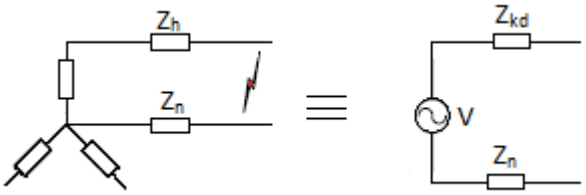
İki faz kısa devre oluşması durumundaki akım değeri,

$$I_{kff} = \frac{V_{ff}}{2 * Z_{kd}} = \frac{\sqrt{3} * I_{k3f}}{2} = 0.86 * I_{k3f} \tag{2.10}$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte, V_{ff} fazlar arası gerilimi (V), Z_{kd} toplam arıza empedansı (Ω) ifade etmektedir.

2.2.3 Faz –Nötr Kısa Devre

Herhangi bir faz iletkeni ile nötr iletkeni arasına meydana gelen arıza tipidir. Faz-nötr kısa devresine ait sembolik devre şeması Şekil 2.7'de verilmiştir. Faz-nötr arızalarının bazı özel durumlarında kaynağın sıfır sıra empedansı Z_{kd} den daha küçük olabilmektedir. Yıldız zik-zak bağlı transformatör veya jenaratör sistemlerinde bu durum görülmektedir. Bu sebeplerden dolayı faz-nötr kısa devre akım bazı durumlarda üç faz kısa devre akımından büyük olabilmektedir [8][9].



Şekil 2.7 Faz-nötr kısa devre şeması [8]

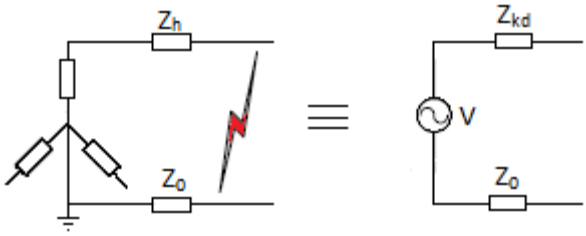
Faz-nötr kısa devre akımı,

$$I_{kfn} = \frac{V_{ff}}{\sqrt{3} * (Z_{kd} + Z_n)} \tag{2.11}$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada V_{ff} fazlar arası gerilimi (V), Z_{kd} toplam arıza empedansı (Ω), Z_n ise araza ile kaynak arasındaki nötr hattının empedansını (Ω) ifade etmektedir.

2.2.4 Faz -Toprak Kısa Devresi

Kısa devre arıza tipleri arasında uygulamada en sık rastlanan arıza tipidir. Herhangi bir fazın doğrudan veya dolaylı yollarla (direk üzerinden, ağaç dalından dolayı) toprak ile teması sonucunda meydana gelir. Kısa devre arızasının topraktan akmasından dolayı kısa devre akımı hesabında sıfır sıra empedansının da hesaba katılması gerekmektedir. Faz-toprak kısa devre arızasına ait sembolik devre şeması Şekil 2.8'de verilmiştir [8][9].



Şekil 2.8 Faz toprak kısa devre şeması [8]

Faz-toprak kısa devre akım değeri,

$$I_{kft} = \frac{V_{ff}}{\sqrt{3} * (Z_{kd} + Z_0)} \tag{2.12}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Bu eşitlikte V_{ff} fazlar arası gerilimi (V), Z_{kd} toplam arıza empedansı (Ω), Z_0 ise araza ile kaynak arasındaki toprak empedansını (Ω) ifade etmektedir.

2.3 Kısa Devre Empedansı Hesabı

Güç sistemlerinin herhangi bir yerinde meydana gelen kısa devre akımı arızayı besleyen tüm kaynakların varsa sistemde kondansatör, motor gibi ekipmanların arıza noktasına katkı sağladıkları akımların toplamı olarak ifade edilir. Kısa devre noktasından kaynağa bakıldığında görülen thevenin empedansının değeri kısa devre akımının değerini doğrudan etkilemektedir. Bu sebepten dolayı kısa devre akımı hesaplanırken güç sisteminde bulunan bütün devre elemanlarının empedanslarının hesaplanması gerekmektedir.

2.3.1 Transformatör Empedans Hesabı

Güç sistemlerinde transformatörler aynı frekansta iki farklı gerilim seviyesine sahip sistemleri birbirine bağlar. Giriş ve çıkış gerilim değerleri ihtiyaca göre değişebilmektedir. Elektrik enerjisinin yüksek gerilim seviyesinde taşınması için oldukça önemli bir güç sistem elemanıdır. Transformatör empedansının hesaplanması için transformatör gerilimi, transformatör gücü ve % uk değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerlenin hepsi transformatör etiketinde bulunabilmektedir.

Transformatöre ait empedans değeri,

$$Z_{trafo} = \frac{\%uk * V^2}{100 * S_n} \tag{2.13}$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte V fazlar arası gerilim (V), S_n transformatör gücünü (VA) ifade etmektedir. Transformatör direnci,

$$R_{trafo} = \frac{P_{kcu}}{3 * I_n^2} \tag{2.14}$$

ifadesi ile bulunur. Bu eşitlikte P_{kcu} transformatör bakır kayıpları (W), I_n transformatör

nominal akımını (A) ifade etmektedir. Transformatör reaktansı,

$$X_{trafo} = \sqrt{Z^2 - R^2} \tag{2.15}$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu denklemde Z transformatör empedansı (Ω), R ise transformatör direncini (Ω) ifade etmektedir.

2.3.2 Kablo-İletim Hattı Empedans Hesabı

Kısa devre akım hesabını etkileyen en önemli faktörlerden biri kablo/iletken empedanslarıdır. Kablo empedansı kablonun direncine, reaktasına ve kablo uzunluğuna bağlı olarak farklı değerler alabilmektedir. Ayrıca kablo direnç ve reaktans değerleri ortam koşullarının yanında işletmedeki kullanışlarına bağlı olarak düzeltme katsayıları ile birlikte kablo kataloglarında verilmektedir.

Kablo/iletken empedansı,

$$Z_{kablo} = (R + j * X) * l \tag{2.16}$$

denklemi kullanılarak bulunur. Bu denklemde R kablo/iletken direncini (Ω), X kablo/iletken reaktansını (Ω), l ise iletken uzunluğunu (km) ifade eder. İletken direnç ve reaktans değerleri Ω/km başına verilmektedir.

Kablo direncinin değeri kablo kesitine (A), iletken direncine (ρ) ve kablo uzunluğuna (l) bağlı olarak değişmektedir. Kablo direnç değerleri genellikle 20 ^{0}C için verilir. Kablo dirençleri sıcaklığa bağlı olarak da farklı değerler alabilmektedir. Yüksek gerilim hatlarında kullanılan XLPE yalıtkanlı kablonun maksimum çalışma sıcaklığı 90 ^{0}C olup bu durum havai hat iletkenlerinde 75 ^{0}C olarak kabul edilir [10]. Sıcaklık artışı ile birlikte kabloların dirençleri de artmaktadır. Kablonun farklı sıcaklık değerlerindeki direnç değeri denklem (2.18) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$R = \frac{\rho}{A} * \mathrm{l} \tag{2.17}$$

Çalışma sıcaklığına bağlı direnç değişimi ise,

$$R_2 = R_1 * [1 + a * (T_2 - T_1)] \tag{2.18}$$

ifadesinden bulunur. Bu denklemde R_2 çalışma sıcaklığındaki direnci (Ω), R_1 ortam sıcaklığındaki direnci (Ω), T_2nominal çalışma sıcaklığını (^{0}C), T_1 ortam sıcaklığını (^{0}C),

a ise malzeme sıcaklık katsayısını ifade etmektedir. Malzeme sıcaklık katsayısı "bakır için 20 ^{0}C de a=3,95*10^{-3}" kullanılmaktadır.

Kablo reaktansı endüktif ve kapasitif reaktans olmak üzere iki farklı bileşenlerden meydana gelmektedir. Bu reaktanslardan endüktif reaktans kablo endüktansından kaynaklanırken, kapasitif reaktans ise iletkenlerin birbirleri ve toprak arasında meydana gelen kapasitif etkiden dolayı oluşur. Birçok kablonun reaktans bilgisi üretici firmalar tarafından kataloglarda belirtilmiştir. Havai hatların reaktansı değeri 305 m için ohm cinsinden denklem (2.19) kullanılarak hesaplanmaktadır. GMR feet olarak geometrik yarıçapı ifade etmektedir.

İletken reaktansı,

$$X_{hat} = 0{,}02298 * \ln(\frac{1}{GMR}) \tag{2.19}$$

Eşitliği ile hesaplanır. Burada GMR geometrik yarıçapı ifade etmektedir.

$$GMR = R_f * e^{-0{,}25} = 0{,}3894 * D = 0{,}03245 * d \tag{2.20}$$

Denklem (2.20)'de R_f feet cinsinden iletken yarıçapını, D feet cinsinden iletken çapını, d ise inch cinsinden iletken çapını ifade etmektedir.

Havai hatların reaktansları iletkenler arasındaki mesafe bağlı olarak değişmektedir. İletkenler arası mesafeye göre reaktans hesabı denklem (2.21) de verilmiştir.

$$X_{yeni} = X_{eski} * [1 + \frac{\ln(x)}{\ln\left(\frac{1}{GMR}\right)}] \tag{2.21}$$

Bu denklemde GMR geometrik yarıçapı, x ise iletkenler arası mesafeyi ifade eder.

2.3.3 Motor Reaktans Hesabı

Motorlar subtransiyent ve transiyent olmak üzere iki farklı reaktans değerine sahiptirler. Subtransiyent reaktans motorun ilk kısa devre periyodundaki reaktastır. Transiyent reaktans ise kısa devrenin geri kalan sürecinde görünen reaktanstır. Motorlara ait subtransiyent ve transiyent reaktanslar Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Motor subtransiyent ve transiyent reaktans değerleri

Motor Tipi	Subtransiyent Reaktans (pu)	Transiyent Reaktans (pu)
DA	0,15	0,30
6 Kutuplu Senkron	0,15	0.23
8-14 Kutuplu Senkron	0,20	0,30
İndüksiyon ≤ 600	0,25	-
İndüksiyon > 600	0,17	-

Motorlara ait gerçek reaktans değerleri denklem (2.22) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$X_{motor} = \frac{X_{pu} * V^2}{746 * HP} \tag{2.22}$$

Bu eşitlikte X_{pu} birim başına reaktansı, HP beygir gücünü,V ise fazlar arası gerilimi ifade etmektedir.

2.3.4 Asenkron Motor Reaktans Hesabı

Elektrik dağıtım şebekesinde bulunan büyük güçlü asenkron motorlar, kısa devre anında sahip oldukları ataletten dolayı kinetik enerjilerini tüketinceye kadar kısa devre noktasını beslerler. Bu besleme süresi asenkron motorun gücüne bağlı olduğundan sürekli kısa devre akımına olan etkisi çoğunlukla ihmal edilmektedir. Ancak, başlangıç kısa devre akımı hesabına asenkron motorun etkisi dahil edilmelidir. Bunun sonucu olarak, asenkron motorlar kısa devre yerindeki I_k'' ve I_s değerinin artmasına sebep olur [5].

Asenkron motorun başlangıç kısa devre akımı denklem (2.23) kullanılarak hesaplanır.

$$I_k'' = \frac{1.1 * V_n}{\sqrt{3} * X_{motor}} \tag{2.23}$$

olmak üzere,

$$X_{motor} = \frac{V_n}{\sqrt{3} * I_{yol\ alma}} = \frac{1}{I_{yol\ alma}/I_n} * Z_n \tag{2.24}$$

Genel olarak $\frac{I_{yol\ alma}}{I_n} = 5$ alınır ve $X_{motor} = 0{,}2 * Z_n$ olarak elde edilir.

2.3.5 Generatör Reaktans Hesabı

Kısa devre sırasında generatör gerilimi, endüvide meydana gelen reaksiyonlardan dolayı değişmektedir. Bu sebepten dolayı generatör reaktansıda başlangıç değerini koruyamaz. Bunun sonucu olarak kısa devre ilk meydana geldiğinde yüksek bir kısa devre akımı akarken daha sonra bu akım azalarak sabit bir değere ulaşır. Generatörlerde 3 farklı tip reaktans bulunur. Bunlar;

- ✓ Subtransiyent Reaktans: Turbo generatörlerde %10-20, çıkık kutuplu rotorlu makinelerde %15-30 arasında değişir.
- ✓ Transiyent Reaktans: Turbo generatörlerde %15-30, çıkık kutuplu rotorlu makinelerde %30-40 arasında değişir.
- ✓ Senkron Reaktans: Turbo generatörlerde %80-150, çıkık kutuplu rotorlu makinelerde %120-200 arasında değişir.

Generatörlere ait subtransiyent ve transiyent reaktanslar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Generatör subtransiyent ve transiyent reaktans değerleri

Generatör Tipi	Subtransiyent Reaktans (pu)	Transiyent Reaktans (pu)
DA	0,15	0,30
2 Kutuplu Yuvarlak Rotorlu	0,09	0.15
4 Kutuplu Yuvarlak Rotorlu	0,14	0,23
Çıkık Kutuplu Damper Sargılı Senkron	0,20	0,30
Çıkık Kutuplu Damper Sargısız Senkron	0,30	0,30

Generatöre ait gerçek reaktans değerleri denklem (2.25) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$X_{generatör} = \frac{X_{pu} * V^2}{1000 * S(kVA)} \tag{2.25}$$

Bu eşitlikte, V fazlar arası gerilimi (kV), S generatör gücü (kVA) olarak kullanılır.

2.3.6 Şebeke Empedans Hesabı

Şebeke empedansını hesaplanabilmesi için şebekenin başlangıç kısa devre gücü ve şebeke gerilimine ihtiyaç duyulur. Şebeke empedansı,

$$Z = \frac{1{,}1 * V_n^2}{S_k''} \tag{2.26}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Bu eşitlikte, V fazlar arası gerilimi (V), S_k ise kısa devre gücünü (VA) ifade etmektedir.

2.3.7 Kondansatör ve Statik Yük Reaktans Hesabı

IEC 60909 standardına göre yapılan kısa devre hesaplamalarında hat kapasitansları ve paralel admitanslar dikkate alınmaz. Statik yüklerde kısa devre hesabına katılmaz. Kısa devrenin oluşma süresine bakılmaksızın şönt kondansatörlerin boşalma akımı maksimum kısa devre akımının hesaplanmasında ihmal edilir [9].

2.4 Kısa Devre Hesabında Simetrili Bileşenler

Kısa devre akım hesabında simetrili bileşenler teorisi 1918 yılında C. L. Fortescue tarafından Amerikan Elektrik Mühendisleri toplantısında ortaya atılmıştır [10]. Bu teori ile analiz edilmesi zor olan asimetrik arızaların kolayca analiz edilmesine imkan vermektedir. Fortescue n adet fazörden meydana gelen bir asimetrik arızayı n adet simetrik arıza olarak alıp bunların çözümlerinin toplamının asimetrik arıza çözümüne eşit olacağını ispatlamıştır. Simetrili bileşenler metodunda dengesiz üç fazlı bir sistemin her fazı kendi içinde dengeli pozitif sıra, negatif sıra ve sıfır sıra fazörlerinin vektörel toplamına eşittir.

- ✓ Pozitif sıra bileşeni: Dengeli sistemdeki fazörlerle aynı yönde ve aralarında 120^0 faz farkı olan bir fazör grubu olup, fazörlerin modülleri birbirine eşittir.
- ✓ Negatif sıra bileşeni: Dengeli sistemdeki fazörlerin tersi yönde ve aralarında 120^0 faz farkı olan bir fazör grubu olup, fazörlerin modülleri birbirine eşittir.
- ✓ Sıfır sıra bileşeni: Aynı yön ve doğrultuda olan ve üç fazörden oluşan fazör grubu olup fazör modülleri birbirine eşittir.

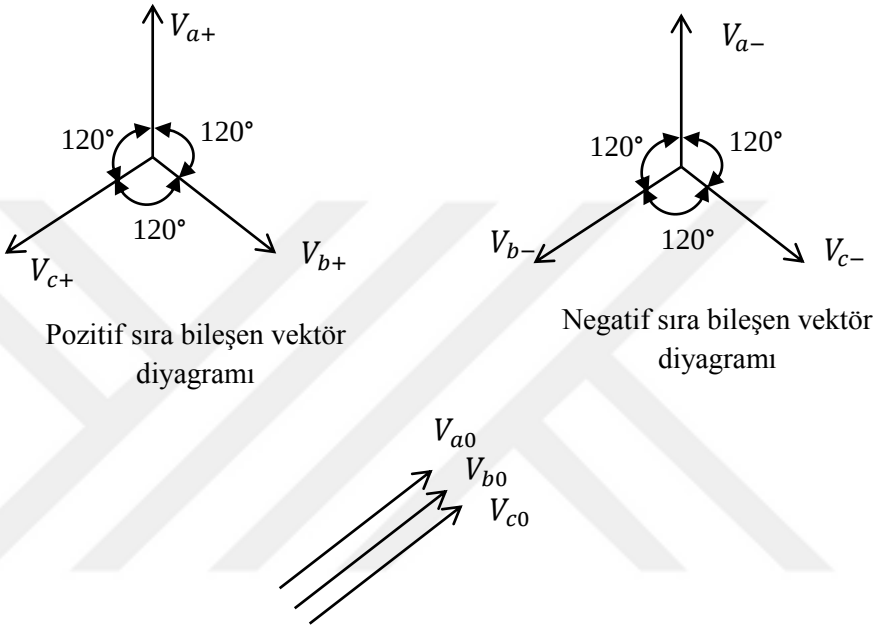
Üç fazlı dengesiz bir sistemde gerilim fazörleri, simetrili bileşen fazörlerinin vektörel toplamı olarak yazılır. Bunlar;

$$V_a = V_{a+} + V_{a-} + V_{a0} \tag{2.27}$$

$$V_b = V_{b+} + V_{b-} + V_{b0} \tag{2.28}$$

$$V_c = V_{c+} + V_{c-} + V_{c0} \tag{2.29}$$

Üç fazlı dengesiz bir sistemin gerilim fazörlerinin simetrili bileşenleri (pozitif sıra bileşeni, negatif sıra bileşeni, sıfır sıra bileşeni) vektörel olarak Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Simetrili bileşenler vektörel diyagramları

Simetrili bileşenler metodu kullanılarak simetrik olmayan arızaların analizi daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir [11].

2.4.1 Simetrili Bileşenlerde "a" Operatörü

"a" herhangi bir fazörü saat ibresinin tersi yönünde 120^0 döndürüp büyüklüğünü değiştirmeyen çarpandır.

$$a = 1 \angle 120^0 \tag{2.30}$$

$$a^2 = 1 \angle 240^0 \tag{2.31}$$

Üç fazlı bir güç sisteminde gerilim fazörlerinin pozitif sıra, negatif sıra ve sıfır sıra bileşenleri V_a faz gerilimi referans alınarak aşağıdaki gibi yazılır.

A fazı	B fazı	C fazı	
V_{a0}	$V_{b0} = V_{a0}$	$V_{c0} = V_{a0}$	(2.32)
V_{a+}	$V_{b+} = a^2 * V_{a+}$	$V_{c+} = a * V_{a+}$	(2.33)
V_{a-}	$V_{b+} = a * V_{a+}$	$V_{c+} = a^2 * V_{a+}$	(2.34)

Yukarıdaki tanımlara uygun olarak faz gerilimleri simetrili bileşenler cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$V_a = V_{a0} + V_{a+} + V_{a-} \tag{2.35}$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 * V_{a+} + a * V_{a-} \tag{2.36}$$

$$V_c = V_{a0} + a * V_{a+} + a^2 * V_{a-} \tag{2.37}$$

Verilen denklemler kullanılarak A fazının simetrili bileşenler gerilimlerini şebeke fazörleri cinsinden aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$V_{a0} = \frac{1}{3} * (V_a + V_b + V_c) \tag{2.38}$$

$$V_{a+} = \frac{1}{3} * (V_a + a * V_b + a^2 * V_c) \tag{2.39}$$

$$V_{a-} = \frac{1}{3} * (V_a + a^2 * V_b + a * V_c) \tag{2.40}$$

Bu denklemleri matris formunda gösterebiliriz.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{2.42}$$

Gerilim fazları için yapılan işlemler faz akımları içinde aynı şekilde uygulanmaktadır. Denklem (2.43) ve denklem (2.44)'de faz akımlarının matris formundaki gösterimi verilmiştir.

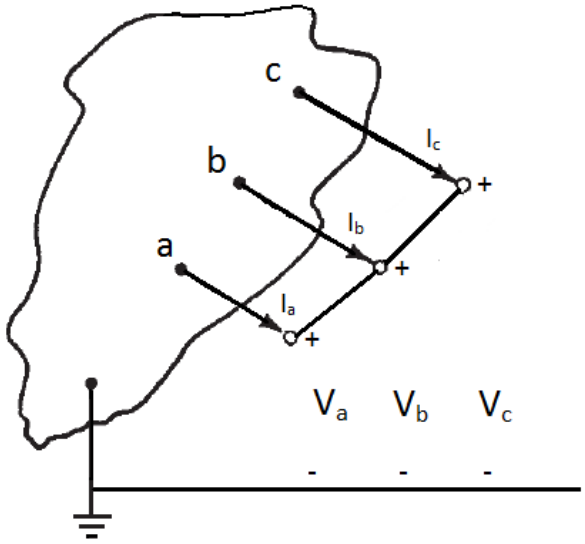
$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Üç fazlı dengeli bir sistemde akımların vektörel toplamı sıfırdır. Sistemde bir dengesizlik olması durumunda sistemde nötr iletkeni mevcut ise bu dengesizlikten dolayı nötr iletkeninden bir akım akar [10][11].

2.4.2 Simetrik Kısa Devre Arızası

Kısa devre arıza tipleri arasında sadece üç faz kısa devre arızaları simetrik arızalardır. Bu durumda her üç faz iletkeninden aynı akım akmaktadır. Bu arıza tipinde negatif sıra bileşeni ve sıfır sıra bileşenin hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Üç faz kısa devre arızasının sembolik devre şeması Şekil 2.10'da verilmiştir.



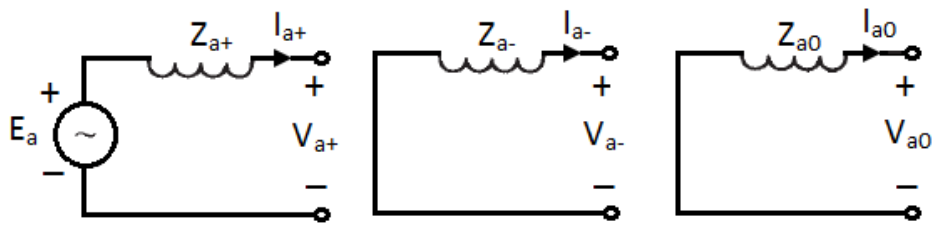
Şekil 2.10 Simetrik üç faz kısa devre arızası

Üç faz kısa devre sonucunda faz gerilimleri sıfır olmaktadır. Buradan yola çıkarak gerilimlerin simetrili bileşenleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$V_a = V_b = V_c = 0 \tag{2.46}$$

Simetrik üç faz kısa devre arızasında pozitif sıra bileşeni, negatif sıra bileşeni ve sıfır sıra bileşenine ait eşdeğer devre gösterimleri Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 Dengeli üç fazlı sistemde simetrili bileşenler eşdeğer devre şeması

Yukarıdaki eşdeğer devrelerden yola çıkarak akımların simetrili bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_h \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_+ & 0 \\ 0 & 0 & Z_- \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_h/Z_+ \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.48}$$

A fazına ait simetrili bileşen akımları kullanılarak sistemde her bir faza ait gerçek akımlar elde edilir.

$$I_a = I_{a0} + I_{a+} + I_{a-} \tag{2.49}$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 * I_{a+} + a * I_{a-} \tag{2.50}$$

$$I_c = I_{a0} + a * I_{a+} + a^2 * I_{a-} \tag{2.51}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_h}{Z_+} \\ a^2 * \frac{V_h}{Z_+} \\ a * \frac{V_h}{Z_+} \end{bmatrix} \tag{2.52}$$

Denklem (2.52) de görüldüğü gibi üç faz kısa devre sonucunda her bir fazdan genliği aynı ve aralarında 120^0 faz farkı olan akımlar akmaktadır. Burada Z_+ değeri arızanın olduğu noktadan kaynağa doğru görünen thevenin empedansını ifade etmektedir [10][11].

2.4.3 Asimetrik Kısa Devre Arızaları

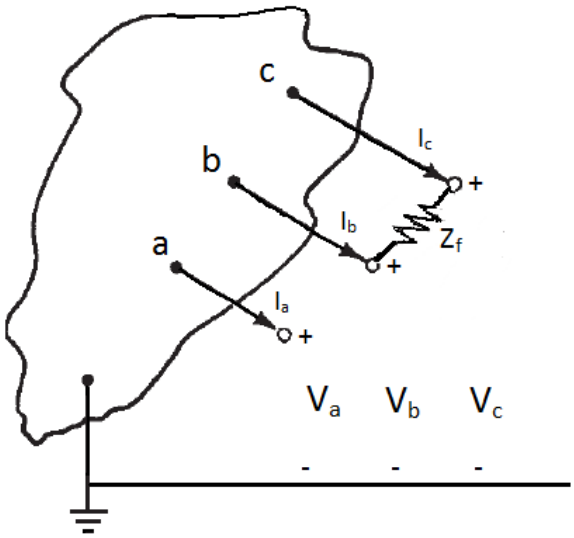
Güç sistemlerinde meydana gelen üç faz kısa devre arızaları dışında kalan arızaların hepsi asimetrik arızalardır. Asimetrik arızalar dengesiz arızalar olmalarından dolayı analiz çalışmalarında problem oluşturmaktadır. Asimetrik arızaları daha kolay analiz etmek için simetrili bileşenler metodu kullanılır. 3 farklı tip asimetrik arıza tipi bulunmaktadır. Bunlar;

- ✓ Faz-faz kısa devreleri
- ✓ İki faz toprak kısa devreleri
- ✓ Faz- toprak kısa devreleri

olarak sınıflandırılır.

2.4.3.1 Faz-Faz Kısa Devre Arızaları

Faz faz kısa devre arızaları genellikle iki iletken arasındaki izolasyonun delinmesi veya yanlış bağlantı-manevralar sonucunda meydana gelir. Faz faz arızalarına ait sembolik eşdeğer devresi Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12 Faz faz kısa devre arızası [10]

Faz faz kısa devre arızasında simetrili bileşen metodu kullanılarak akım ve gerilim değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_b - V_c = Z_f * I_b, I_a = 0\,, \qquad I_c = -I_b \tag{2.53}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2) * I_b \\ \frac{1}{3}(a^2 - a) * I_b \end{bmatrix} \tag{2.54}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} \tag{2.55}$$

$$(V_0 + a^2 * V_{a+} + a * V_{a-}) - (V_0 + a * V_{a+} + a^2 * V_{a-}) = Z_f(I_{a0} + a^2 * I_{a+} + a * I_{a-}) \tag{2.56}$$

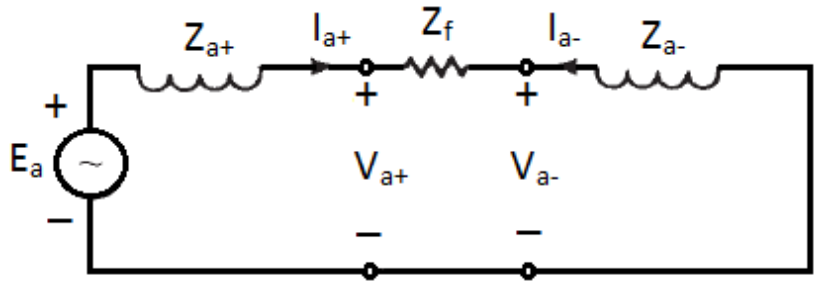
Denklem (2.54) deki eşitlik kullanılarak denklem (2.57) elde edilmektedir.

$$I_{a0} = 0\,, \quad I_{a-} = -I_{a+}\,, \tag{2.57}$$

Denklem (2.56) ve denklem (2.57) yardımıyla,

$$V_{a+} - V_{a-} = Z_f * I_{a+} \tag{2.58}$$

ifadesi elde edilir.



Şekil 2.13 Faz faz kısa devre arızası için simetrili bileşenler bağlantı devresi [10]

Faz faz kısa devre arızası için simetrili bileşenler bağlantı devresinde kirchoff çevre bağıntı denklemleri kullanılarak simetri bileşen akımları hesaplanır.

$$I_{a+} = -I_{a-} = \frac{E_a}{(Z_{a+} + Z_{a-} + Z_f)}\,, \quad I_{a0} = 0 \tag{2.59}$$

Denklem (2.51) ve denklem (2.59) kullanılarak aşağıdaki bağıntılar elde edilmektedir.

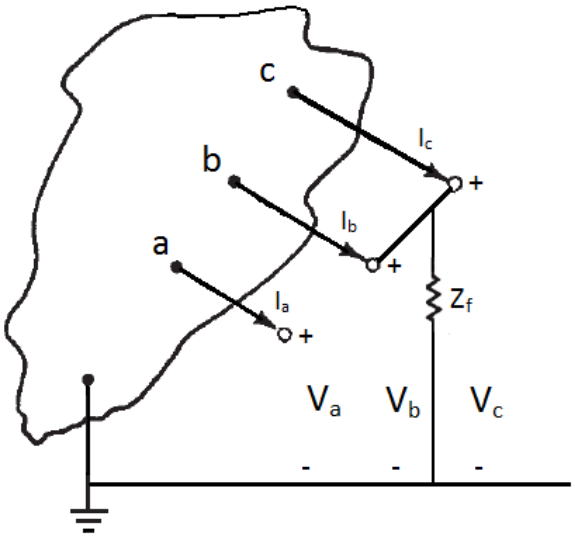
$$I_b = I_{a0} + a^2 * I_{a+} + a * I_{a-} = (a^2 - a) * I_{a+} \quad (2.60)$$

$$I_b = \frac{-j\sqrt{3} * E_a}{(Z_{a+} + Z_{a-} + Z_f)} \quad (2.61)$$

$$I_c = I_{a0} + a * I_{a+} + a^2 * I_{a-} = (a - a^2) * I_{a+} = -I_b \quad (2.62)$$

2.4.3.2 İki Faz-Toprak Kısa Devre Arızaları

İki faz toprak kısa devre arızaları güç sistemlerinde sık karşılaşılan arızalar olamamakla birlikte iki faz iletkenin direkt toprakla yada toprakla bağlantılı nötr hattı veya koruma iletkeni üzerinden kısa devre olması sonucunda oluşur. İki faz toprak kısa devre arızasına ait sembolik eşdeğer devre şeması Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14 İki Faz-toprak kısa devre arızası [10]

İki faz toprak kısa devre arızası sonrası V_b, V_c gerilim ve I_a akım ifadeleri,

$$V_b = V_c = Z_f * (I_b + I_c), I_a = 0 \quad (2.63)$$

elde edilir. I_a değeri denklem (2.49) de yerine konulursa;

$$I_{a0} + I_{a+} + I_{a-} = 0 \quad (2.64)$$

elde edilir. Denklem (2.63) de verilen sistemin gerçek gerilim değerleri denklem (2.41) de kullanılırsa;

$$(V_{a0} + a * V_{a+} + a^2 * V_{a-}) = (V_{a0} + a^2 * V_{a+} + a * V_{a-}) \quad (2.65)$$

$$V_{a+} = V_{a-} \quad (2.66)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (2.50), (2.51) ve (2.55) kullanılarak denklem (2.63) tekrar yazılırsa;

$$V_{a0} + a^2 * V_{a+} + a * V_{a-} = Z_f(I_{a0} + a^2 I_{a+} + a I_{a-} + I_{a0} + a I_{a+} + a^2 I_{a-}) \quad (2.67)$$

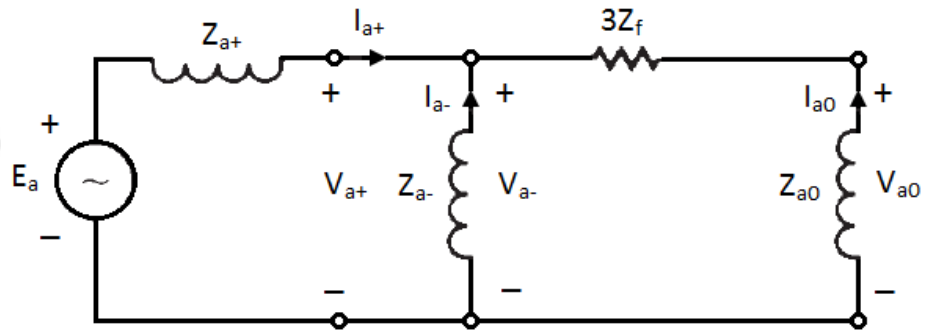
elde edilir. Denklem (2.67) denklem (2.66) da kullanılırsa;

$$V_{a0} - V_{a+} = Z_f(2 * I_{a0} - I_{a+} - I_{a-}) \quad (2.68)$$

elde edilir. Denklem (2.68) ve denklem (2.64) ifadeleri kullanılırsa;

$$V_{a0} - V_{a+} = 3 * Z_f * I_{a0} \quad (2.69)$$

elde edilir. Denklem (2.64), (2.66) ve (2.69) birlikte değerlendirilirse Şekil 2.15'de verilen simetrili bileşen devre modeli elde edilir.



Şekil 2.15 İki faz toprak kısa devre arızası için simetrili bileşenler bağlantı devresi [10]

Şekil 2.15'de verilen simetrili bileşenler devresinden pozitif sıra bileşen akımı aşağıdaki ifadeler yardımıyla elde edilir.

$$I_{a+} = \frac{E_a}{Z_{a+} + [Z_{a-}//(Z_{a0} + 3 * Z_f)]} = \frac{E_a}{Z_{a+} + [\frac{Z_{a-} * (Z_{a0} + 3 * Z_f)}{Z_{a-} + Z_{a0} + 3 * Z_f}]} \quad (2.70)$$

$$I_{a-} = (-I_{a+})\left(\frac{Z_{a0} + 3 * Z_f}{Z_{a-} + Z_{a0} + 3 * Z_f}\right) \quad (2.71)$$

$$I_{a0} = (-I_{a+})(\frac{Z_{a-}}{Z_{a-} + Z_{a0} + 3 * Z_f}) \quad (2.72)$$

Gerçek sisteme ait akım değerleri denklem (2.70), (2.71), (2.72)'in denklem (2.49), (2.50) ve (2.51) denklemlerinde yerine yazılmasıyla bulunur. Simetrili bileşen gerilim değerleri ise simetrili bileşen akım değerlerinin denklem (2.47) de yerine konulması sonucunda elde edilir. Simetrili bileşen gerilim değerleri hesaplandıktan sonra denklem (2.55) kullanılarak sisteme ait gerçek gerilim değerleri hesaplanır. Faz akımları,

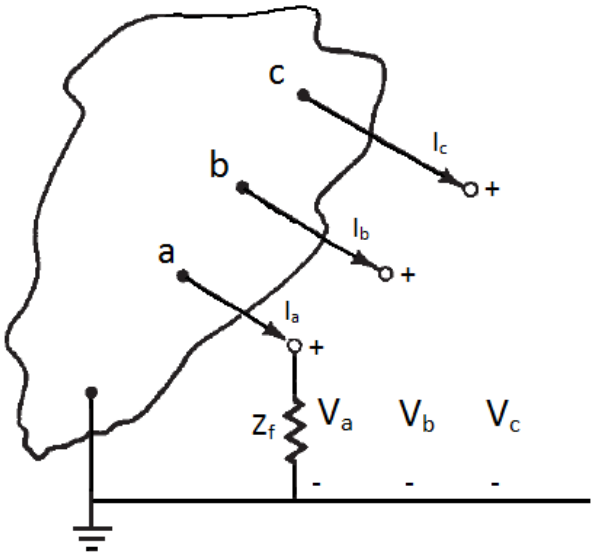
$$I_a = I_{a0} + I_{a+} + I_{a-} = 0 \tag{2.73}$$

$$I_f = I_b + I_c = 3 * I_{a0} \tag{2.74}$$

elde edilir.

2.4.3.3 Faz-Toprak Kısa Devre Arızaları

Faz toprak kısa devre arızaları faz iletkenlerinden herhangi birinin izolasyonun bozulması veya yanlış manevralar sonucunda toprağa temas etmesi ile toprakla irtibatlı direk, ağaç üzerinden toprakla temas sonucunda oluşan arızalardır. Genel olarak hesaplamalarda arıza empedansı değerinin tam olarak bilinmemesinden ve kısa devre hesaplamaları üzerinde etkisinin küçük olmasından dolayı ihmal edilir. Faz toprak kısa devre arızasına ait sembolik eşdeğer devre şeması Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16 Faz toprak kısa devre arızası

Faz toprak kısa devre arızası sonrası gerilim V_a gerilim, I_b ve I_c akım ifadeleri,

$$V_a = Z_f * I_a\,, \quad I_b = 0\,, \quad I_c = 0\,, \tag{2.75}$$

elde edilir. Simetrili bileşen devre akımları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Denklem (2.55)'deki matrisin ilk eşitliğinin ilk satırı ve denklem (2.75) ve (2.76) ifadeleri kullanılırsa;

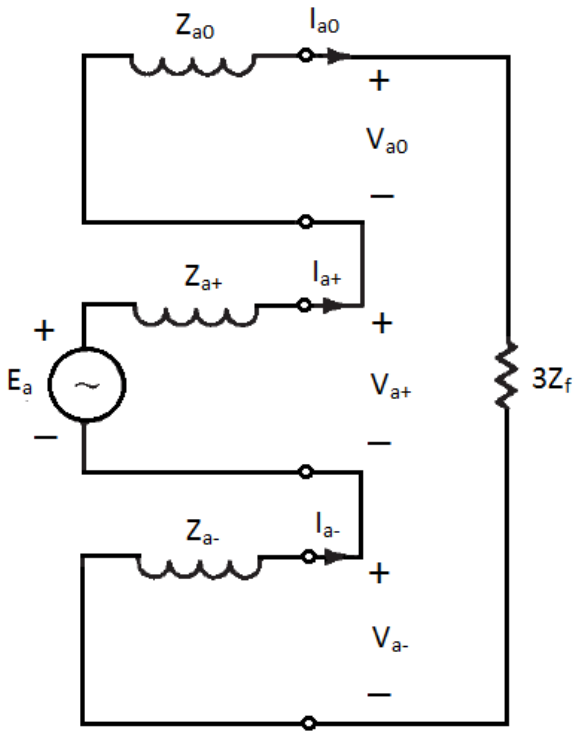
$$V_{a0} + V_{a+} + V_{a-} = Z_f(I_{a0} + I_{a+} + I_{a-}) \quad (2.77)$$

elde edilir. Denklem (2.76) ve (2.77) kullanılarak;

$$(I_{a0} = I_{a+} = I_{a-}) \quad (2.78)$$

$$V_{a0} + V_{a+} + V_{a-} = 3 * Z_f * I_{a+} \quad (2.79)$$

elde edilir. Denklem (2.77) ve (2.78) birlikte değerlendirilirse Şekil 2.17'de verilen simetrili bileşen devre modeli elde edilir.



Şekil 2.17 Faz toprak kısa devre arızası için simetrili bileşenler bağlantı devresi

Şekil 2.17'de verilen simetrili bileşenler devresinden pozitif sıra bileşen akımı,

$$(I_{a0} = I_{a+} = I_{a-}) = \frac{E_a}{Z_{a0} + Z_{a+} + Z_{a-} + 3 * Z_f} \quad (2.80)$$

olarak bulunur. Denklem (2.49), (2.50) ve (2.51) denklem (2.80) yerine yazılırsa

$$I_a = \frac{3 * E_a}{Z_{a0} + Z_{a+} + Z_{a-} + 3 * Z_f} \tag{2.81}$$

$$I_b = 0 \tag{2.82}$$

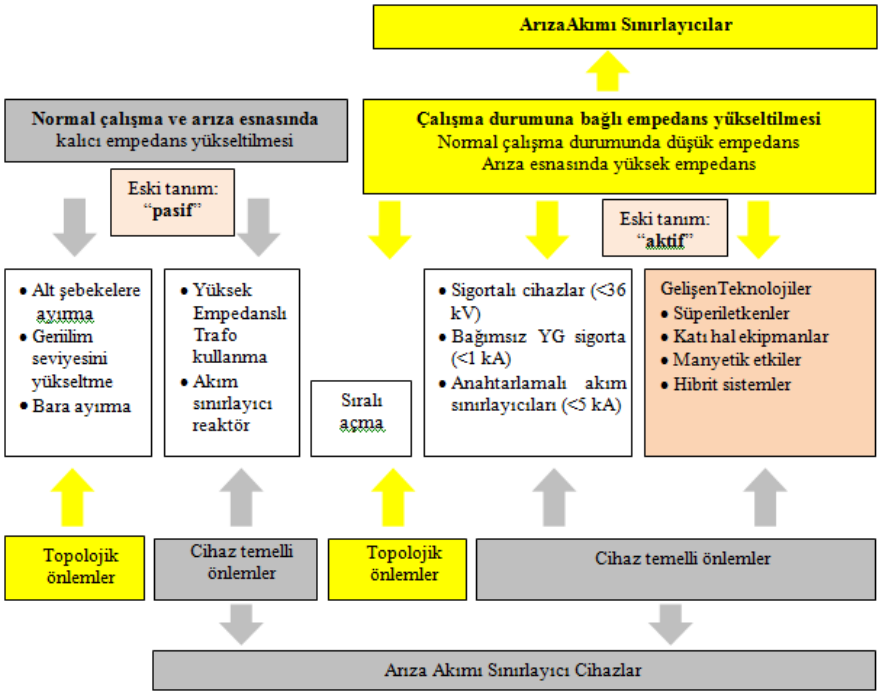
$$I_c = 0 \tag{2.83}$$

elde edilir. Simetrili bileşen devre gerilimleri bulunan simetrili devre akımlarının denklem (2.47) de yerine yazılması ile elde edilir. Simetrili bileşen devre gerilimleri hesaplandıktan sonra denklem (2.55) kullanılarak sistemdeki gerçek gerilimler bulunur [10][11].

BÖLÜM 3

ARIZA AKIM SINIRLAMA YÖNTEMLERİ

Orta Gerilim (OG) ve Yüksek Gerilim (YG) seviyesinde arıza akım sınırlama cihazlarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanması için çeşitli arıza akımı sınırlama yöntem ve cihazları kullanılmaktadır [2]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, arıza akımı sınırlayıcı cihazların ve arıza akım sınırlama yöntemlerinin iki ana sınıf altında toplandığı görülmüştür. Cihaz ve yöntemleri kapsayan bu uygulamalar genel olarak Arıza Akım Sınırlayıcılar (AAS) şeklinde ifade edilmektedir. Bunlar normal çalışma ve arıza esnasında devrede olan geleneksel AAS'ler ve sadece arıza esnasında devrede olan modern AAS'ler dir. Literatürdeki farklı çalışmalarda aynı sınıflar için pasif AAS ve aktif AAS tanımlaması kullanılmaktadır. AAS yöntemleri için genel bir tablo Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Arıza akım sınırlama yöntemleri [1]

Geleneksel arıza akım sınırlama yöntemleri;

- ✓ Arıza akım sınırlama reaktörü,
- ✓ Yüksek empedanslı transformatör,
- ✓ Nötr reaktörü,
- ✓ I_s Akım sınırlayıcı,
- ✓ Akım sınırlayıcı sigortalar,
- ✓ Küçük güçlü transformatör,
- ✓ Transformatör nötr noktasının reaktörle topraklanması,
- ✓ Generatör transformatörünün nötr noktasının reaktörle topraklanması,
- ✓ Güç sisteminin yeniden yapılandırılması,
- ✓ Transformatör merkezlerinde bara ayırma,
- ✓ Transformatör merkezlerinde kritik hatların ayrılması,
- ✓ Yüksek gerilim seviyesinde işletme,
- ✓ Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA),
- ✓ Nötr noktası izoleli sistem kullanmak,

şeklinde sıralanmaktadır [2][27].

Modern arıza akım sınırlama yöntemleri ise;

- ✓ Katı hal arıza akım sınırlayıcılar (KHAAS)
  - o Rezonans tipli KHAAS
    - ▪ Seri rezonans tabanlı KHAAS
    - ▪ Paralel rezonans tabanlı KHAAS
    - ▪ Seri-Paralel rezonans tabanlı KHAAS
  - o Bypass anahtarlı Empedans KHAAS
  - o Köprü tipli KHAAS
- ✓ Süper iletken arıza akım sınırlayıcılar (SAAS)
  - o Rezistif SAAS

- Endüktif SAAS
    - Korunmuş çekirdekli (Shielded-Core Inductive SFCL)
    - Doyurulabilir çekirdekli (Saturable-Core Inductive SFCL)

✓ Hibrit arıza akım sınırlayıcılar

✓ Elektromanyetik arıza akım sınırlayıcılar

olarak belirtilmektedir [2][3].

Literatürde yapılan incelemeler sonucunda ideal arıza akım sınırlayıcıların aşağıdaki özellikleri taşıması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [15].

✓ Normal işletme durumunda herhangi bir empedans göstermemeli gerilim düşümüne sebep olmamalıdır.

✓ Arıza meydana geldiği zaman hemen yüksek empedans durumuna geçmelidir.

✓ İlk periyot içinde arıza akımını tespit etmelidir ve sonraki birkaç periyot içinde arıza akımını istenen seviyelere düşürmelidir.

✓ Kısa süre içerisinde meydana gelen art arda arızalarda çalışabilmelidir.

✓ Arıza temizlendikten sonra personel müdahalesine ihtiyaç duymadan arıza öncesi duruma dönebilmelidir.

✓ Gerilim ve geçici hal kararlılığına etkisi olmamalıdır.

✓ Boyutu küçük ve fiyatı uygun olmalıdır.

✓ Röle ve kesicilerin normal çalışmalarını etkilememelidir.

3.1 Geleneksel Arıza Akım Sınırlama Yöntemleri

Geleneksel arıza akım sınırlama yöntemleri güç sistemlerinde meydana gelebilecek kısa devre akımlarını sınırlandırmak için iki farklı yaklaşım kullanmaktadır. Bunlar;

✓ Topolojik önlemler

✓ Cihaz temelli önlemler

olarak sıralanır.

Topolojik önlemler ile güç sistemine herhangi bir ekipman eklemeden mevcut baraların bölünmesi, şebekenin adalara ayrılması ve daha yüksek gerilim seviyesine çıkılması gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Cihaz temelli önlemlerde ise, güç sistemlerine seri reaktör gibi bir ekipman eklenmekte veya daha yüksek bir empedansa sahip transformatör kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin kullanılması ile güç sistemlerinde empedans artışı meydana gelmekte ve bu empedans sadece kısa devre sırasında değil sürekli olarak sistemde kalmaktadır. Bunun sonucunda kararlılık problemleri ve hat kayıplarında yükselmeler oluşmaktadır.

3.1.1 Akım Sınırlama Reaktörü (ASR)

Uygulamada bilinen, kullanılan ve diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında çoğundan daha ekonomik olan bir yöntemdir. Sistem güvenilirliği üzerinde ihmal edilebilir olumsuz etkiye sahiptir. Güvenlik ihtiyaçları nedeniyle, transformatör merkezlerindeki uygulamalarda geniş bir alana ihtiyaç duyulur. Gerilim kararlılığını ve geçici hal kararlılığını azaltıcı etki gösterebilmektedir. Kuru tip ve yağlı tip ASR'ler mevcuttur [27]. ASR ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilecektir.

3.1.2 Yüksek Empedanslı Transformatör

Yüksek empedanslı transformatör kullanımının arıza akım seviyesini azaltmada önemli bir etkisi vardır. Ancak, sistem empedansının artması geçici durum ve gerilim kararlılığı üzerinde olumsuz etki oluşturabilir. Aynı zamanda güç sistemindeki kayıplarda artış meydana getirirler. Yüksek empedanslı transformatörlerin kullanımı tipik olarak arıza akımı seviyesini % 15 civarında azaltır [27]. Şekil 3.2'de Çin'deki bir yüksek empedanslı transformatör uygulaması görülmektedir.



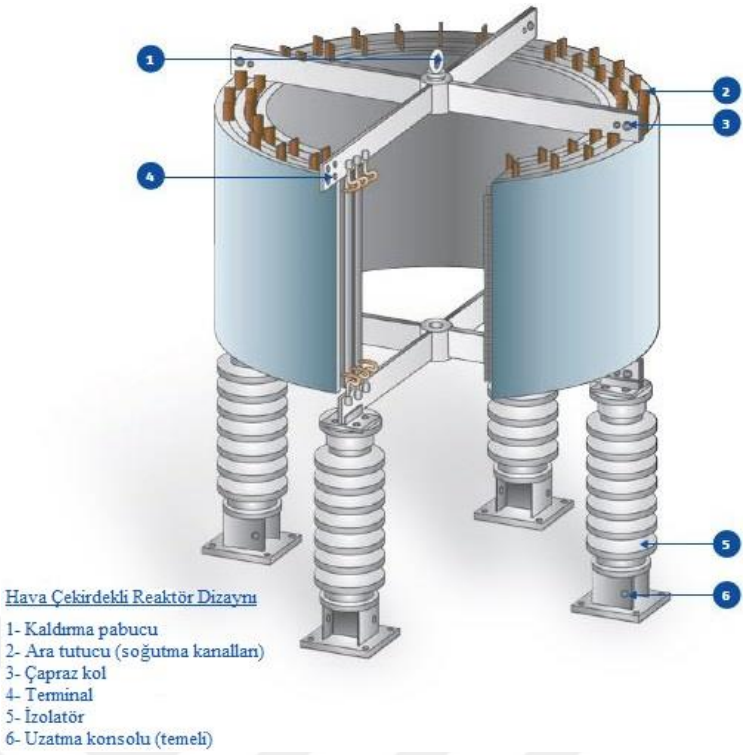
Şekil 3.2 Çin'deki yüksek empedanslı transformatör uygulaması [2]

3.1.3 Nötr Reaktörü

Güç sistemlerinde meydana gelen arızaların büyük bir kısmı tek-faz toprak arızalarıdır. Bu sebepten dolayı nötr reaktör uygulaması arıza akımlarını sınırlamak için kullanılabilecek etkili bir yöntemdir [17]. Nötr reaktörü, faz-toprak arızalarında nötr iletkeni üzerinden toprağa akacak arıza akımını belli bir değerde tutmak için sistem nötr noktası ile toprak arasına bağlanır [18]. Nötr reaktörleri arıza akımlarını belirli bir seviyede tutarak güç sistem ekipmanlarının zarar görmesini engellerken bir yandan da koruma ekipmanlarının ihtiyaç duyduğu akımı sağlayarak arızanın temizlenmesine yardımcı olurlar [19]. Şekil 3.3'de hava çekirdekli nötr reaktörler ve Şekil 3.4'de hava çekirdekli nötr reaktör yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3Hava çekirdekli nötr reaktörleri [20]



Şekil 3.4 Hava çekirdekli nötr reaktörünün yapısı [20]

Hava çekirdekli reaktörler, yağlı tip reaktörlere göre hafiflik, kolay montaj işlemi, daha küçük boyut, sızdırmazlık, minimum bakım gereksinimi ve düşük maliyet gibi birçok avantaja sahiptir.

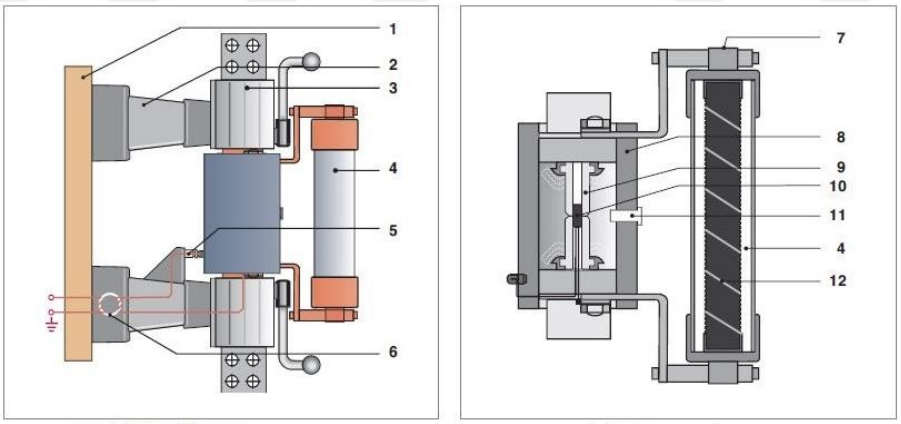
3.1.4 I_s Akım Sınırlayıcı

I_s sınırlayıcılar sigortaların gelişmiş bir versiyonudur. İki kısımdan oluşmaktadır. Normal işletme durumunda akımın büyük bir kısmı sigortaya paralel ana iletken üzerinden akmaktadır. Arıza meydana geldiği zaman ana iletken bağlantısı kesilerek arıza akımı sigortaya aktarılır. Bu şekilde sigortanın sınırlı nominal akımı ile ilgili problem çözülmüştür. I_s sınırlayıcıların, arıza meydana geldikten sonra 1 ms içinde 5 kA'e kadar olan arıza akımlarını kesme yeteneği vardır. Ancak, bu sınırlayıcılar 40 kV anma gerilimi ile sınırlıdır [21]. Şekil 3.5'de bir I_s sınırlayıcı gösterilmiştir.



Şekil 3.5 I_s Sınırlayıcı [22]

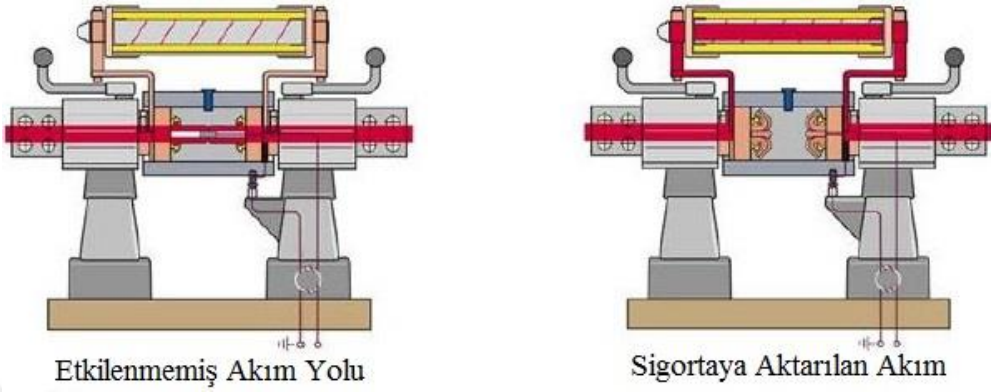
I_s sınırlayıcı ana iletken ve paralelindeki sigorta olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Normal işletme durumunda yük akımı ana iletken üzerinden akarken, arıza durumunda bir tetikleme cihazı kullanılarak ana iletken bağlantısı kesilir ve arıza akımı yüksek arıza akımı kesme yeteneğine sahip sigortaya aktarılır [21]. Şekil 3.6'da 12 kV 2000 A I_s sınırlayıcının kısımları gösterilmiştir.



Şekil 3.6 I_s sınırlayıcının kısımları [22]

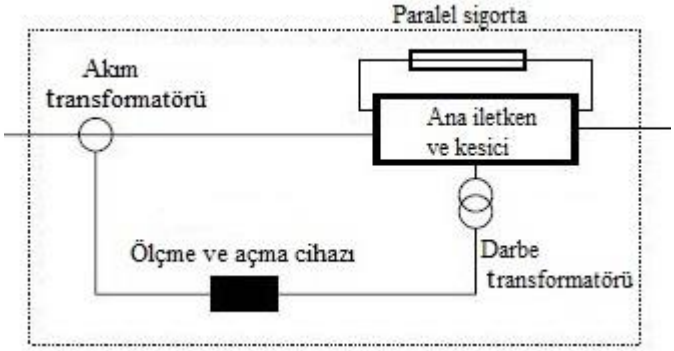
I_s sınırlayıcı; normal işletme durumunda yüksek akım ileten ancak düşük anahtarlama yeteneğine sahip ve oldukça hızla çalışan bir anahtar ve buna paralel bağlanmış yüksek kesme kapasitesine sahip bir sigortanın birleşiminden meydan gelmiştir. Arızanın meydana gelmesi ile ana iletkenin açılır ve akım yaklaşık 0.6 ms içinde paralel

sigortaya üzerinden akmaya başlar ve gerilimin sıfır geçişinde arıza akımı kesilir [23]. Şekil 3.7'de arıza meydana geldiğinde I_s sınırlayıcıdaki akımın komutasyonu gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ana iletken kontakları açılmış ve arıza akımı sigortaya aktarılmıştır.



Şekil 3.7 Arıza sırasında Is sınırlayıcıdaki akım komutasyonu [22]

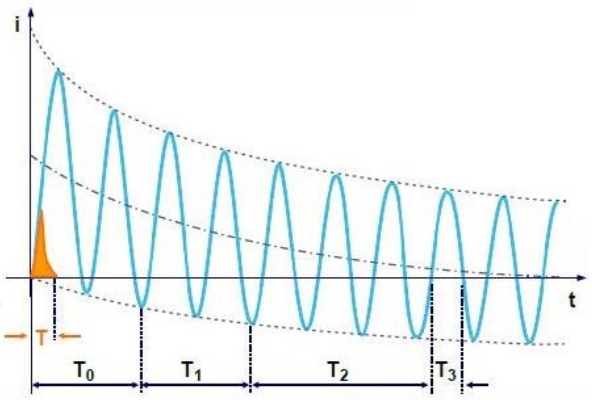
I_s sınırlayıcı üzerinden akan akımı izlemek için elektronik ölçme ekipmanları kullanılır. Şekil 3.8'de I_s sınırlayıcıdaki bu sistemler gösterilmiştir. Kısa devre akımı sınır değere ulaştığı anda ana iletkende açma meydana gelir. Kısa devre akımının ilk yükselişi sırasında I_s sınırlayıcının açıp açmadığını belirmek gereklidir. Bu yüzden ani akım ve I_s sınırlayıcı üzerindeki akımın yükselme hızı sürekli ölçülür ve değerlendirilir. Arıza akımının ani değeri ve yükselme hızı ayar değerine ulaşması veya geçmesi durumunda I_s sınırlayıcı açar [23]. Sonuç olarak I_s sınırlayıcı normal durumda yüksek işletme akımını neredeyse kayıpsız bir şekilde iletir ancak, arıza meydana geldiği anda sınırlayıcı tetiklenerek arıza akımının ilk yükselişi sırasında açar.



Şekil 3.8 I_s sınırlayıcının genel yapısı [24]

I_s sınırlayıcılar normal kesicilere göre arıza akımını daha hızlı bir şekilde keserler. Termik ve dinamik zorlamaların yanı sıra çok yüksek akım seviyeleri sebebiyle kesiciler arıza akımının ilk yükseliş süresinde arızalı devreyi açamazken I_s sınırlayıcılar

bu süre içerinde arıza akımını kesebilmektedir. Şekil 3.9'da I_s sınırlayıcılar ile devre kesicisinin açma süreleri açısından karşılaştırılması gösterilmiştir. I_s sınırlayıcılar arıza durumunda yaklaşık olarak 5-10 ms içinde devreye girerek arıza akımın temizlerken, devre kesicilerin arızayı temizlemek için devreye girme süresi yaklaşık olarak 90-160 ms arasında olmaktadır.



T_0: Koruma rölesinin tepki süresi
T_1: Koruma rölesinin işletme süresi
T_2: Kesicinin işletme süresi
T_3: Ark süresi
T: I_s sınırlayıcının devreye girme süresi
T_0: 10-20 ms
T_1: 30-40 ms
T_2: 40-80 ms
T_3: 10-20 ms
T: 2-10 ms

Şekil 3.9 I_s sınırlayıcı ile kesici karşılaştırması [22]

3.1.5 Akım Sınırlayıcı Sigortalar (ASS)

ASS yüksek hızda selektif koruma yapmak için güç sistemlerinde yıllardır kullanılmaktadır. Arıza meydana geldiği zaman ASS içindeki iletken tel üzerinde oluşan ısı enerjisine bağlı olarak iletken tel erimektedir. Bu durum kısa devre akımının kesilmesi sağlarken aynı zamanda ayırma işlemi yaparak ark oluşmasını da engellemektedir. Sigortaların görevi, sigortanın minimum kesme akımından daha büyük olan kısa devre akımlarının sebep olduğu termal ve dinamik etkilerden sistemi korumaktır. Şekil 3.10'da yük ayırıcısındaki bir ASS uygulaması gösterilmiştir.

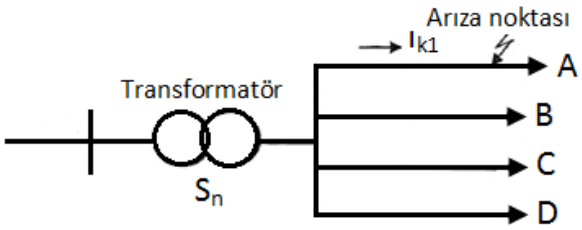


Şekil 3.10 ASS uygulaması [25]

3.1.6 Küçük Güçlü Transformatör

Güç sistemlerinde bütün yükü bir adet transformatör ve bara üzerinden beslemek yerine birkaç adet küçük güçlü transformatör kullanarak beslemek transformatörlerin kısa devre empedanslarını artırmaktadır. Şekil 3.11'de tek transformatörün kullanıldığı sistemin prensip şeması gösterilmiştir.

Yükün bir adet transformatörle beslenmesi durumunda kısa devre akımının genliği sistem empedansı ve gücüne bağlı olarak belirlenen I_{k1} genlikli akım olacaktır.

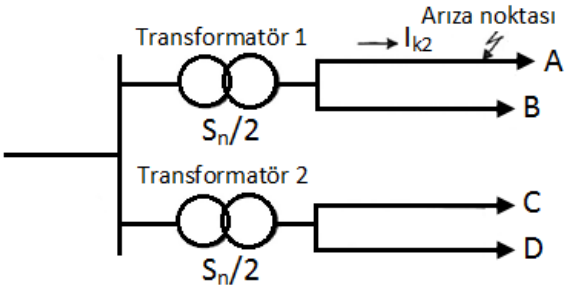


Şekil 3.11 Tek adet transformatör kullanımı [26]

- ✓ A,B,C,D: Yükün bağlandığı fiderler

- ✓ S_n: Transformatörün gücü
- ✓ I_{k1}: Kısa devre akımı

İşletme tesisinin ve yüklerin durum göz önüne alınarak, yüklerin iki farklı baraya bağlanması ve her bir baraya $S_n/2$ gücünde transformatör ile beslenmesi arıza akımının değerini sınırlayacaktır. Transformatör güçlerinin küçülmesinden dolayı kısa devre empedansı büyüyecektir. Bunun sonucu olarak barada meydana gelecek bir arıza durumunda sistem o noktandan görünen thevenin empedansının büyümesinden dolayı arıza akımı genliği küçülmüş olacaktır. Şekil 3.12'debirden fazla küçük güçlü transformatör kullanan sistemin prensip şeması gösterilmiştir.

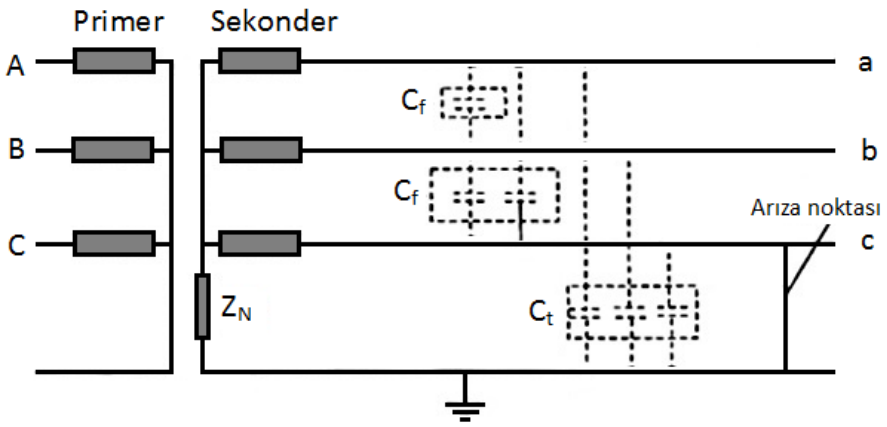


Şekil 3.12 Birden fazla küçük güçlü transformatör kullanımı [26]

Bu tür bir uygulamada $I_{k2} < I_{k1}$ olmaktadır. Fakat iki adet transformatör kullanılmasının maliyeti daha fazla olmaktadır. Transformatörün empedansı büyük olacağı için reaktif güç kaybı ve bu empedanstaki gerilim düşümü de daha fazla olacaktır [26]. Bu sebeplerden dolayı bu yöntem pek tercih edilmemektedir.

3.1.7 Transformatör Nötr Noktasının Reaktör ile Topraklanması

Güç sistemlerinde transformatörler birçok faklı bağlantı şekillerinde kullanılmaktadır. Bunlar içinden sekonder sargısı yıldız ve nötr nokrasının doğrudan topraklı transformatörlerde faz toprak arızası meydana geldiği zaman arıza akım seviyesi çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu arıza akımlarını belirli bir değerde sınırlayabilmek için transformatör nötr noktası ile toprak arasında nötr reaktörü kullanılır. Şekil 3.13'de nötr reaktörü ile topraklanan sistem gösterilmiştir.



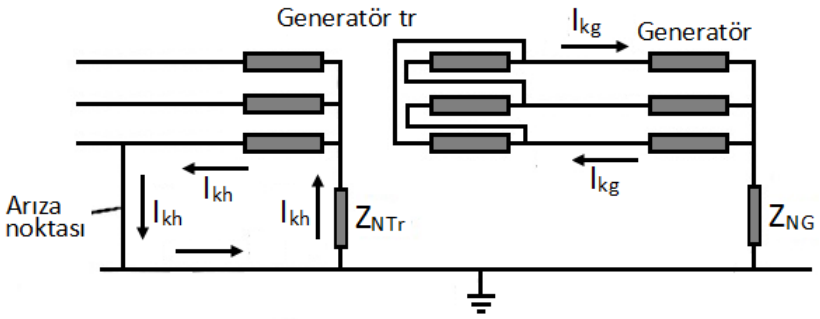
Şekil 3.13 Nötr reaktörü ile topraklanan sistem [26]

- ✓ Z_N: Nötr reaktörü
- ✓ C_f: Fazlar arası kapasite
- ✓ C_t: Fazlar ile toprak arası kapasite

Transformatör yıldız noktasının nötr reaktör üzerinden topraklanması ile sistemde meydana gelecek tek faz toprak arızasında arıza akımı nötr reaktörü üzerinden akacaktır. 34.5 kV şebekede nötr noktasının 20 Ω direnç ile topraklandığı durumda bir faz toprak arızasında akımının genliği yaklaşık 1000 A olacaktır. Nötr ile toprak arasına bağlanan reaktörler genellikle orta gerilimde seviyesinde kullanılmaktadır [26].

3.1.8 Generatör Transformatörünün Reaktör ile Topraklanması

Generatör transformatörlerin yüksek gerilim taraflarında meydana gelen faz toprak arızaları dan dolayı kısa devre akım seviyeleri yüksek değerlere çıkmaktadır. Transformatörün yüksek gerilim sargısı yıldız noktası reaktör üzerinden topraklanır. Bu sayede yüksek gerilim tarafında meydana gelen faz toprak arızalarında arıza akımı sınırlanmış olur. Yüksek gerilim tarafında meydana gelen faz toprak arızalarında diğer fazların gerilimlerinin yükselmesi ve reaktör üzerindeki gerilim düşümünün fazla olmasından dolayı reaktör maliyeti artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı nötr reaktrörü genel olarak orta gerilim seviyesinde kullanılır [26]. Şekil 3.14'de generatör transformatörünün nötr reaktör ile topraklanması gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Generatör transformatörünün yıldız noktasının reaktör ile topraklanması [26]

3.1.9 Güç Sisteminin Yeniden Yapılandırılması

Kesin kuralları olan bir metot değildir. Daha çok şebekedeki uygulama mühendislerinin tecrübelerine dayanarak gerçekleştirilmektedir. Birçok geleneksel arıza akım sınırlama yöntemi (bara ayırma, kritik hatların ayrılması vb.) burada kullanılmaktadır. Sisteme yeni bir ekipman eklenmektense kısa devre akım değeri yüksek olan merkezlerde farklı manevralar ile arıza akımları sınırlandırılır. Bu yöntemle arıza akımları önemli oranda düşürülebilmektedir. Ayrıca, uygun şekilde yapıldığında sistemin gerilim kararlılığı ve geçici kararlılığı üzerinde olumlu etkisi görülür. Mevcut sistemde gerçekleştirilen operasyonlar olduğu için ekstra bir maliyet getirmemektedir [27].

3.1.10 Transformatör Merkezlerinde Bara Ayırma

Bu yöntemde bara kısa devre akım seviyesini azaltmak için ilgili bara iki veya daha fazla parçaya ayrılır ve yükler bu baralar üzerinden beslenir. Ancak, bu yöntem güç sisteminin güvenilirliğini önemli ölçüde azaltıcı etki yaptığından sistem operatörleri tarafından tercih edilmek istenmemektedir. Ayrıca, geçici durum ve gerilim kararlılığı üzerinde de negatif etkileri bulunmaktadır. Bu olumsuz etkiler rağmen, arıza akımlarını azaltma açısından, bara ayırma uygulaması ASR'den daha etkili bir uygulamadır. Bundan dolayı bara ayırma yöntemi sonsuz reaktanslı bir ASR uygulamasının eşdeğeridir. Bu yöntem sadece acil durumlarda kabul edilebilir geçici bir strateji olarak düşünülebilir [27].

3.1.11 Transformatör Merkezlerinde Kritik Hatları Ayırma

Baraların kısa devre akım seviyesini azaltmak için kritik hatların baralardan ayrılması prensibine dayanır. Bu iletim hatlarının sisteme bağlantısı, transformatör merkezinin

dışında yapılır. Bara ayırma yöntemine benzer olup, güç sisteminin işletmesi açısından olumsuz etkilere neden olur. Güç sisteminin güvenilirliği, geçici durum kararlılığı ve gerilim kararlılığı üzerindeki istenmeyen etkileri bu yöntemin temel dezavantajları olarak bilinir [27].

3.1.12 Gerilim Seviyesini Yükseltme

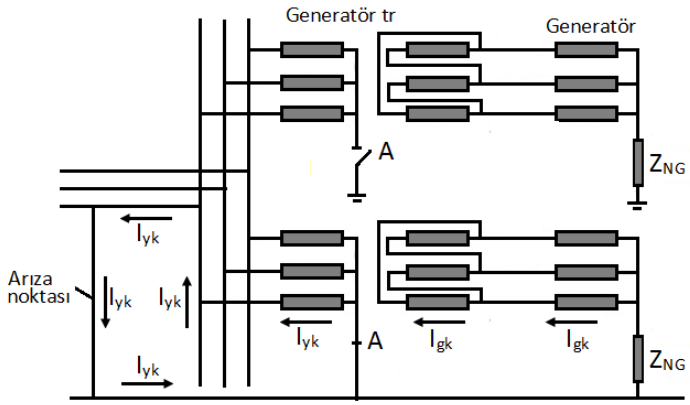
Mevcut güç sistemi adalara ayrılarak, bu adaların yeni tasarlanacak olan daha yüksek gerilimli bir iletim hattına bağlanması esasına dayanmaktadır [17]. Sistemdeki akım, yüksek gerilime geçiş sebebiyle azaldığından arıza meydana geldiğinde de arıza akımının seviyesi azalmış olmaktadır. Arıza akımlarını sınırlamada faydalı ve pratik bir yöntem olmakla beraber maliyet faktörü göz önünde bulundurulmalıdır

3.1.13 Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) Sistemlerinin Kullanılması

İletim hatlarının YGDA bağlantılar ile değiştirilmesi, arıza akımlarının seviyesini azaltacaktır. Ancak bu yöntem ekonomik değildir [27]. İletim sisteminin Alternatif Akım (AA)'dan Doğru Akım (DA)'a çevirmek için mevcut güç sistem ekipmanlarının (iletim hatları, direkler, koruma sistemleri, kesiciler, ayırıcılar vb.) DA'da çalışabilecek şekilde yenilenmesi gerekmektedir. Ayrıca AA'ı DA'a çevirmek için güç sisteminin birçok noktasına dönüştürücülerin eklenmesi gerekmektedir.

3.1.14 Nötr/Yıldız Noktası İzole Sistem

Bu yöntemin kullanılabilmesi için aynı barayı besleyecek birden fazla generatör olması gerekmektedir. Bu generatör trafolarının biri veya birkaçının yüksek gerilim yıldız noktası topraktan izole edilir. Bu sayede yüksek gerilim tarafında meydana gelebilecek bir faz toprak arızalarında arıza akımı sınırlanmış olur [26]. Şekil 3.15'de bu sistemin prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Nötr noktası izoleli sistem

- ✓ A: Ayırıcı
- ✓ I_{yk}: Yüksek gerilim faz-toprak kısa devre akımı
- ✓ I_{gk}: Generatör kısa devre akımı

Generatör transformatörünün sekonder sargısının yıldız noktası izolasyonunun bu uygulamaya uygun olması gerekmektedir. Ayrıca, yüksek gerilim terminallerinden transformatöre gelebilecek transiyent gerilimlerin genliklerinin de nötr noktasında ve sargı içinde transformatörün temel izolasyon seviyesini aşmaması gerekir. Yıldız noktası izole edilmiş generatör arıza durumunda kısa devre akımını beslemeyecektir. Bu durumda koruma sistemlerinin doğru çalışıp çalışmadığı analiz edilmelidir. Şekil 3.15'de A ile gösterilen toprak ayırıcılarından biri açılarak faz-toprak kısa devre akımı sınırlandırılmıştır. Generatörlerin bir kısmı arızayı beslerken bir kısmında faz toprak arıza akımı akmayacaktır [26]. Böylece sistemde meydana gelen arıza akımının seviyesi azaltılmış olur.

3.2 Modern Arıza Akım Sınırlama Yöntemleri

Modern AAS'ler geleneksel AAS'lerin aksine güç sistemlerinin normal işletme durumunda herhangi bir empedans artışı göstermemekte sadece arıza durumunda devreye girerek yüksek empedans göstermektedir. Normal işletme durumunda sıfır empedans göstermesi sebebiyle enerji kaybı ve sistem kararlılığındaki bozulma azaltılırken, arıza durumunda yüksek empedans göstermesi ile de kısa devre akımı sınırlanır, termal ve mekanik zorlanmalar minimize edilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar farklı tipte AAS'ler olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmaların büyük bir kısmı OG seviyesinde olmasına rağmen YG seviyesinde de arıza akım sınırlayıcılar

geliştirilmektedir. Literatürde karşılaşılan AAS tipleri ve detayları bu bölümün alt başlıklarında verilmiştir.

3.2.1 Katı Hal Arıza Akım Sınırlayıcılar (KHAAS)

Katı-hal arıza akımı sınırlayıcılar (KHAAS) güç elektroniği ekipmanları ile anahtarlama yapan arıza akım sınırlayıcılardır. Normal işletme durumunda KHAAS üzerinde herhangi bir empedans oluşmadığı için gerilim düşümün ve enerji kaybı gibi sistem üzerinde negatif etkisi bulunmamaktadır [28]. Arıza durumunda, güç elektroniği ekipmanları kullanılarak yapılan anahtarlamalar sonucunda KHAAS üzerinde yüksek empedans oluşturulur ve bu sayede arıza akımları sınırlandırılır. KHAAS'ler yüksek maliyetleri, karmaşık yardımcı sistemleri ve düşük güvenilirlik gibi nedenlerden dolayı güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılamamaktadır [24]. Diğer modern yöntemlere kıyasla hızlı anahtarlama yapabilmesi ve Süperiletken arıza akım sınırlayıcılarda kullanılan dondurucu tanklara ihtiyaç duymaması KHAAS'nin avantajlı tasarım özellikleridir [29].

3.2.1.1 Rezonans Tipli KHAAS

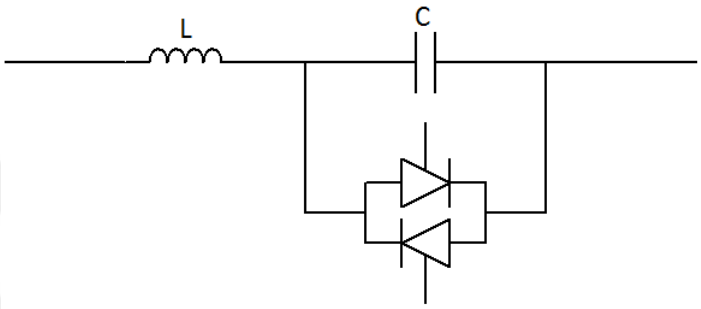
Rezonans tipli KHAAS'ler, Endüktans (L) ve Kapasite (C) nin sabit frekans altında rezonans halinde çalışması prensibine dayanır. Normal işletme durumunda L ve C rezonans halinde olmasından dolayı yaklaşık olarak sıfır empedans gösterirler. Arıza durumunda ise güç elektroniği ekipmanların anahtarlanması sonucunda L veya C devre dışı bırakılır ya da devreye alınarak yüksek empedans oluşması sağlanır. Bu sayede arıza akımı sınırlanmış olur. Kullanılan rezonans devresine bağlı olarak arıza durumunda gerilim düşümüne sebep olabilirler [30]. Rezonans tipi KHAAS 3 ana gruba ayrılır.

- ✓ Seri rezonans tabanlı KHAAS
- ✓ Paralel rezonans tabanlı KHAAS
- ✓ Seri-Paralel rezonans tabanlı KHAAS

Seri Rezonans Tabanlı KHAAS

Seri rezonans tabanlı KHAAS'ler şebeke frekansında L ve C nin seri rezonans halinde çalışma prensibi ile elde edilmektedir. İletim hattına seri olarak bağlanırlar. Normal

işletme durumunda L ve C rezonans halinde olduğu için frekansa bağlı olarak çok düşük bir empedans oluşabilmektedir. Ancak arıza meydana gelmesi durumunda güç elektroniği ekipmanlarının anahtarlanması ile C devre dışı bırakılır, yüksek bir empedans oluşması sonucunda arıza akımı sınırlandırılır. Arıza durumunda oluşan gerilim düşümünü ortadan kaldırmak için L değerinin artırılması ve C değerinin azaltılması gerekmektedir. Daha büyük değerli L seçilmesinin arıza akım sınırlama üzerinde de olumlu etkisi bulunmaktadır. Şekil 3.16'da seri rezonans tabanlı KHAAS devresi gösterilmiştir [31].

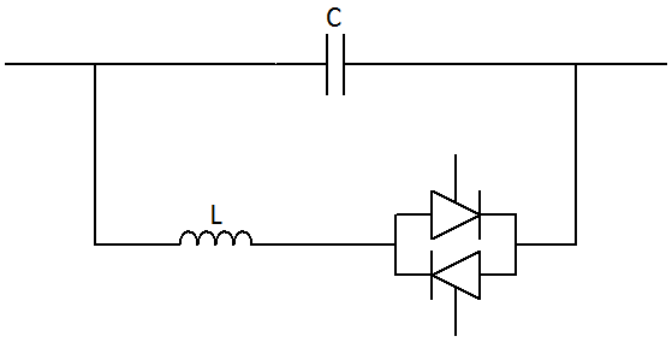


Şekil 3.16 Seri rezonans tabanlı KHAAS devresi [31]

Paralel Rezonans Tabanlı KHAAS

Paralel rezonans tabanlı KHAAS'ler şebeke frekansında L ve C nin paralel rezonans halinde çalışma prensibi ile elde edilmektedir. Bu arıza akım sınırlayıcıda iletim hattına seri olarak sadece C bağlanır, L ve güç elektroniği anahtarlama ekipmanları C'ye paralel olarak bağlanır. Normal işletme durumda C'nin sürekli devrede olması yük akımının C üzerinden akmasına sebep olmaktadır. Ayrıca normal işletme durumunda C iletim hattında seri kompanzasyon işlevi de gerçekleştirmektedir [32]. Arıza meydana gelmesi durumunda L'ye seri olarak bağlı güç elektroniği devresi iletime geçerek L'yi devreye alır ve paralel rezonans devresinin oluşmasını sağlar. Paralel rezonans sonucunda yüksek empedans oluşarak arıza akımı sınırlandırılır [33].

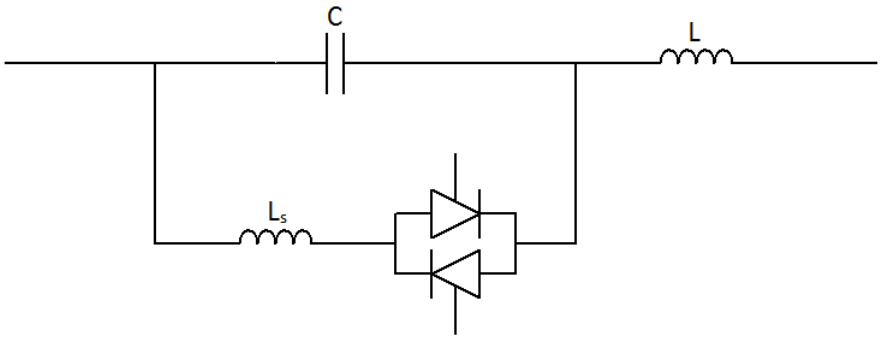
Şekil 3.17'de paralel rezonans tabanlı KHAAS devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Paralel rezonans tabanlı KHAAS devresi

Seri-Paralel Rezonans Tabanlı KHAAS

Seri-paralel rezonans tipli KHAAS'ler şebeke frekansına ayarlı seri ve paralel rezonans devrelerinin birleşiminden oluşmaktadır. Normal işletme durumunda seri rezonans devresi devrede olup arıza akım sınırlayıcı üzerindeki gerilim düşümü ihmal edilecek kadar az olmaktadır. Arıza meydana gelmesi durumunda C paralel güç elektroniği iletime geçerek paralel rezonans devresinin oluşmasını sağlar. Paralel rezonans devresinin oluşması ile L sistem üzerinde yüksek empedans oluşturarak arıza akımının sınırlanmasını sağlar. Arıza akımı sınırlanırken gerilim üzerinde dalgalanmalar oluşmaktadır. Gerilim dalgalanmasını azaltmak için büyük L değeri, küçük C değeri, seri direnç ve şönt kapasite kullanılabilir [31].Şekil 3.18'deseri-paralel rezonans tabanlı KHAAS devresi verilmiştir.

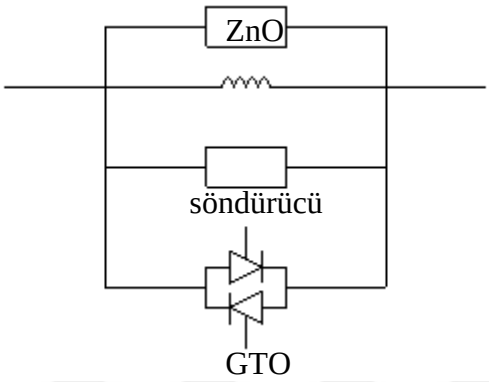


Şekil 3.18 Seri-paralel rezonans tabanlı KHAAS devresi [31]

3.2.1.2 Bypass Anahtarlı Empedans KHAAS

Bu arıza akım sınırlayıcı, enerji hattına seri bağlı bir empedans ve bu empedansa paralel bağlı ZnO (varistör), söndürücü ve bir adet Gate Turn-Off (GTO) tristör çiftinden oluşmaktadır. Normal işletme durumunda GTO iletimde olup, arıza meydana gelmesi

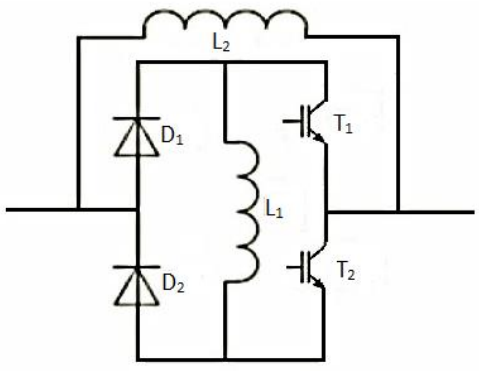
durumunda GTO kesime girerek arıza sınırlayıcının yüksek bir empedans oluşturmasını sağlar. Böylece arıza akımı sınırlandırılır. Normal işletme durumunda GTO'nun sürekli devrede olmasından dolayı anahtarlama kayıpları oluşmaktadır. Buna ek olarak sürekli anahtarlanmadan dolayı uzun süreli çalışmalarda güvenlik problemleri oluşabilmektedir [34]. Şekil 3.19'da bypass anahtarlı empedans KHAAS devresi gösterilmiştir.



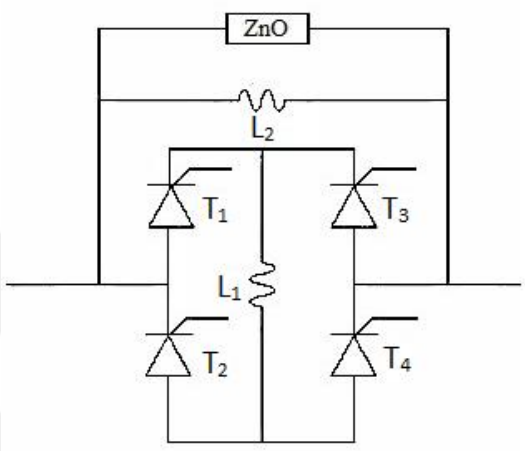
Şekil 3.19 Bypass anahtarlı empedans KHAAS devresi [35]

3.2.1.3 Köprü Tipi KHAAS

Köprü tipi KHAAS'ler kullanılan güç elektroniği ekipmanlarına göre farklı kombinasyonları bulunmaktadır. Yarı kontrollü köprü tipi KHAAS, DA reaktör (L_1), iki adet diyot (D_1, D_2), iki adet IGBT (T_1, T_2) ve bir adet arıza akım sınırlayıcı reaktör (L_2)'nin birleşiminden oluşmaktadır. Normal işletme durumunda tüm güç elektroniği elemanları iletimde olup yük akımı güç elektroniği ekipmanları üzerinden akmaktadır. DA reaktörü üzerinden sabit bir akım geçmekte ve üzerindeki gerilim düşümü yaklaşık olarak sıfır olmaktadır. Arıza meydana gelmesi durumunda IGBT elemanları kesime girerek arıza akımının sınırlayıcı reaktör üzerinden akmasını sağlamaktadır. Arıza akım sınırlayıcı reaktörü aşırı gerilimlerden korumak için ZnO (vatistör) kullanılabilir [34]. Şekil 3.20'de bu modeldeki köprü tipi KHAAS devresi ve Şekil 3.21'de ise köprüsü tristörlerden oluşan tam kontrollü köprü tipi KHAAS devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Yarı kontrollü köprü tipi KHAAS devresi [34]



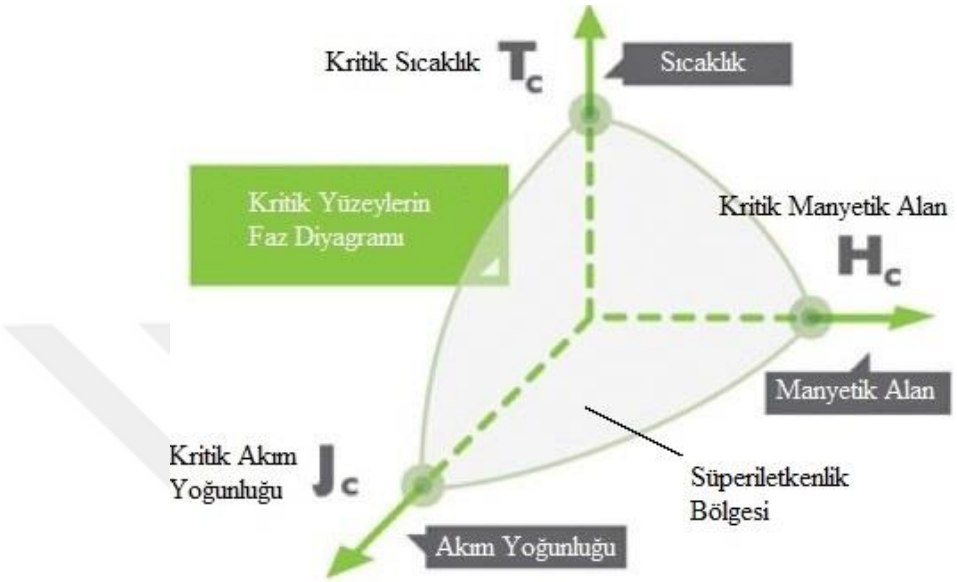
Şekil 3.21 Tam kontrollü köprü tipi KHAAS devresi [36]

3.2.2 Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılar (SAAS)

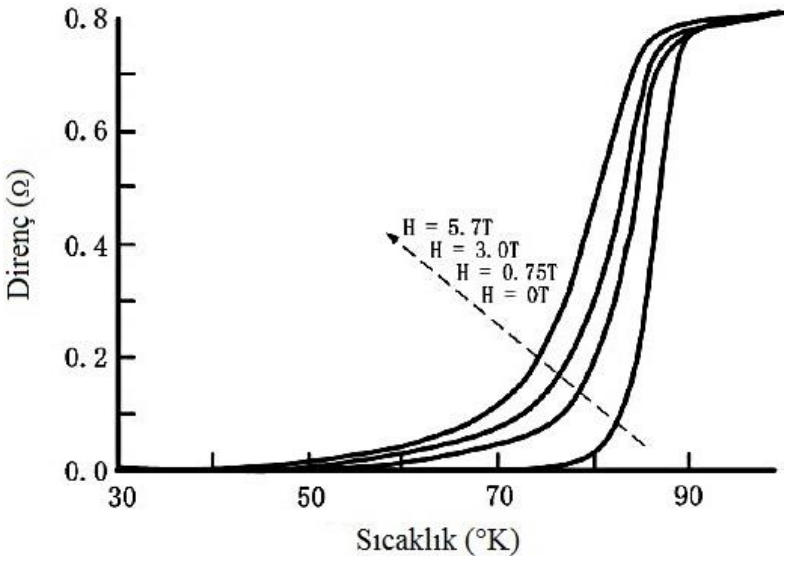
Süperiletken arıza akım sınırlayıcılar (SAAS), güç sistemlerindeki arıza akımlarını sınırlamak için geleneksel arıza akım sınırlama yöntemlerinin aksine sisteme herhangi bir empedans eklemeden arıza akımlarını sınırlamaktadır.

SAAS çalışma prensibi, süperiletken malzemenin belirli bir kritik akım değerini aşması durumunda süperiletken malzemenin direncinin otomatik olarak yükselmesine dayanmaktadır. Geçmişte süperiletken malzemeler çok düşük sıcaklıklarda (-269°C) çalışabildiği için süperiletken malzemelerin arıza akım sınırlayıcılarda kullanılması ekonomik açıdan uygun olmamaktaydı. Ancak son yirmi beş yılda süperiletken malzemedeki gelişme ile Yüksek Sıcaklıklı Süperiletkenlerin (YSS) keşfi soğutma problemini büyük ölçüde azaltmıştır. Yeni YSS malzemeler çok daha yüksek sıcaklıklarda (-196°C) çalıştırılabilir ve sıvı nitrojen (LN_2) kullanılarak basitçe soğutulabilir [37]. Her süperiletken malzeme farklı kritik sıcaklık (T_c) değerine sahiptir. Süperiletken malzemeler bu kritik sıcaklık değerinin altında çalıştığı sürece herhangi bir

direnç göstermemektedirler [38]. Kritik sıcaklık değerinin aşılması durumunda süperiletken malzeme üzerinde direnç artarak arıza akımı sınırlamış olur. Şekil 3.22'de süperiletkenlik olgusunun kritik yüzeylerinin faz diyagramı gösterilmiştir.Şekil 3.23'de ise YBCO süperiletken malzemenin dış manyetik alandaki sıcaklık-direnç eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.22 Süperiletkenlik kritik yüzeylerinin faz diyagramı [38]

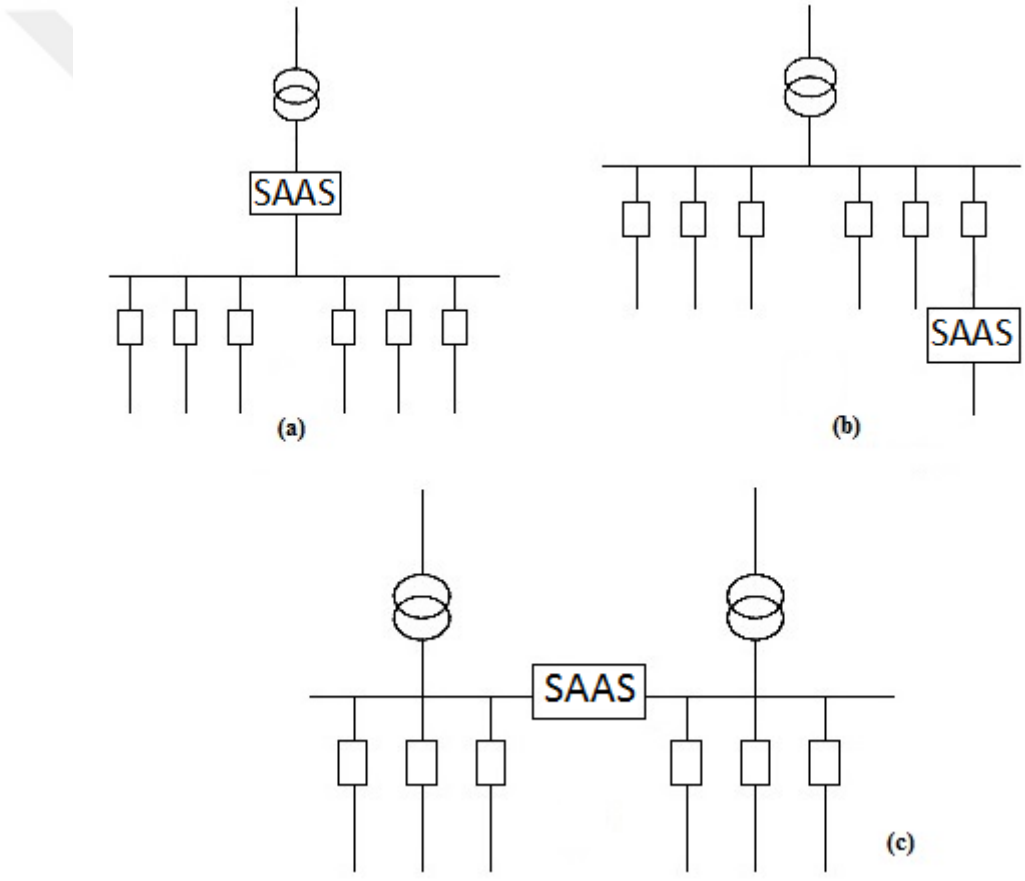


Şekil 3.23 YBCO'nun dış manyetik alandaki sıcaklık-direnç eğrisi [39]

Çalışma Prensibi

SAAS'ler, süperiletken malzemenin kritik sıcaklık değerinin altında herhangi bir direnç göstermemesinden dolayı normal çalışma durumunda sistem üzerinde bir kayıp

oluşturmamaktadır. Arıza meydana gelmesi durumunda ise, arıza akımından dolayı süperiletken üzerindeki sıcaklık artışı süperiletkenin sıcaklığının kritik sıcaklık değerinin üzerine çıkmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda süperiletken malzeme artan bir direnç etkisi göstererek arıza akımını sınırlamaktadır. SAAS'ler, arıza akımının ilk periyot içerisinde sınırlamaya başlayarak sistem üzerinde geçici kararlılığında artmasına sağlamaktadırlar [40]. SAAS'ler, dağıtım ve iletim sistemlerinde birçok farklı yerde uygulanabilir. Şekil 3.24'de SAAS'nin güç sistemlerindeki bazı tipik uygulama yerleri gösterilmiştir. SAAS, Şekil 3.24(a)' da transformatör çıkışında, Şekil 3.24(b)'de fider çıkışında ve Şekil 3.24(c)'de bara bölme pozisyonunda bulunmaktadır.



Şekil 3.24 SAAS'nin uygulama yerleri [37]

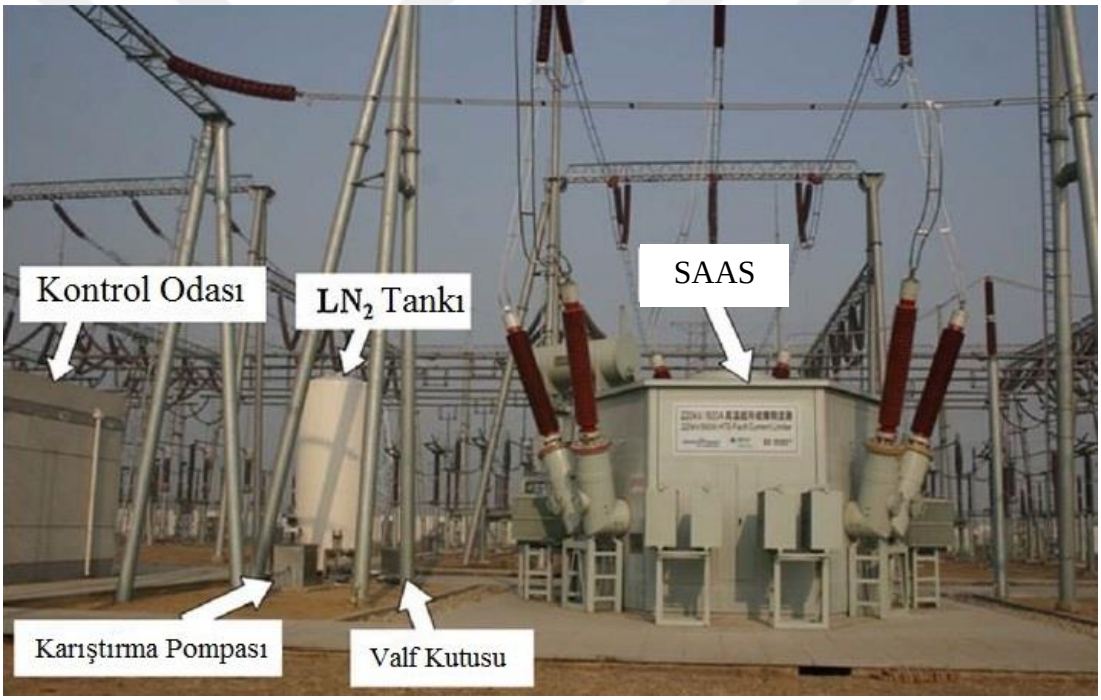
İdeal SAAS özellikleri,

- ✓ Normal işletme durumunda sıfır veya düşük bir empedans göstermesi, gerilim düşümü ve güç kaybına sebep olmaması,
- ✓ Arıza durumunda ise büyük empedans göstermesi,

- ✓ Arıza meydana gelmesi durumunda empedansın hızlı yükselmesi,
- ✓ Bir periyottan veya 16 ms'den daha az bir süre içerisinde hızlı bir algılama ve sınırlama eylemini başlatma (60 Hz için),
- ✓ Arıza ortadan kaldırıldıktan sonra hızlı bir toparlanma (yarım periyot veya 8 ms) gösterme (60 Hz için),
- ✓ Belirlenen arıza akımında güvenilir şekilde akım sınırlama,
- ✓ İyi bir güvenilirlik,

olarak sıralanabilir [41].

Şekil 3.25'de Çin'deki Shigezhuang transformatör merkezindeki 220 kV/300 MVA SAAS gösterilmiştir [42].

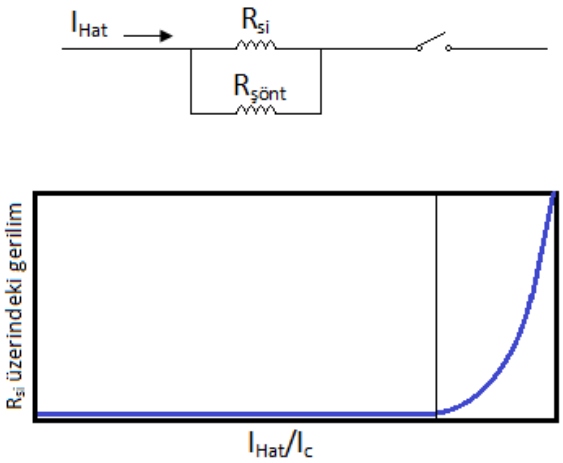


Şekil 3.25 220 kV/300 MVA SAAS [42]

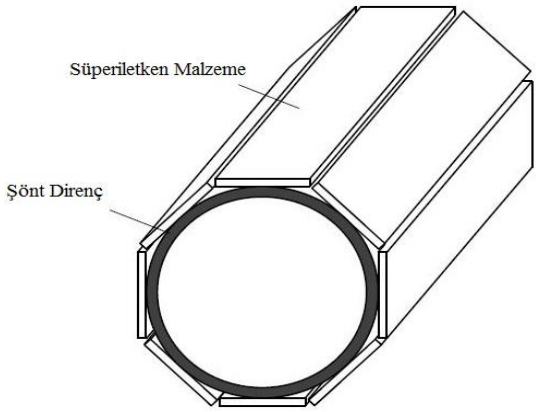
3.2.2.1 Rezistif SAAS

Rezistif SAAS'lerin, endüktif SAAS'lere kıyasla daha basit bir yapı, küçük boyut ve daha düşük bir yatırım maliyeti gibi avantajları bulunmaktadır. Normal işletme durumunda sınırlayıcının süperiletken durumunda olmasından dolayı herhangi bir gerilim düşümü veya empedans görülmemektedir. Arıza meydana gelmesi durumunda süperiletken durumunda olan sınırlayıcı akımın belli bir değerinden sonra nonliner

olarak bir direnç göstererek arıza akımını sınırlamaktadır [44]. Arıza akımına bağlı olarak, süperiletken ekipmandaki hızlı direnç artışından dolayı süperiletken üzerinde bir gerilim oluşmaktadır. Süperiletken üzerinde oluşan gerilimden dolayı hat akımı süperiletken ekipmana paralel endüktansa aktarılmaktadır. Bu sayede paralel endüktans süperiletken üzerindeki gerilim artışını sınırlar. Arıza akımı bir periyottan kısa bir sürede sınırlanmaktadır. Şekil 3.26'da rezistif SAAS devresi ve cihaz akımı I_{Hat}'ın süperiletken malzemenin kritik akımı I_c'ye oranının bir fonksiyonu olarak süperiletken direnci R_{si} üzerindeki gerilim gösterilmiştir. I_{HAT}/I_c oranına bağlı olarak süperiletken üzerindeki direnç değişimi görülmektedir. Şekil 3.26'da verilen eğri sabit sıcaklık ve sabit manyetik alan altında ölçülmüş verilerden alınmıştır. YSS malzemeler için iletken boyunca gözlemlenen 1.0 μV/cm gerilimin düşümündeki akım, kritik akım olarak tanımlanır [43]. Şekil 3.27'de rezistif SAAS malzemesinin yapısı akım oranına bağlı gerilim değişimi gösterilmiştir [33].



Şekil 3.26 Rezistif SAAS devresi ve I_{Hat}/I_c'nin fonksiyonu olan R_{si} üzerindeki gerilim



Şekil 3.27 Şönt dirençli rezistif SAAS malzemesinin yapısı [33]

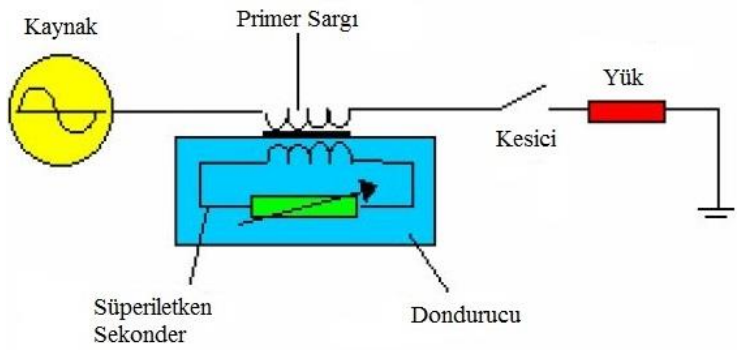
3.2.2.2 Endüktif SAAS

Endüktif SAAS uygulamaları iki başlık altında sınıflandırılabilir.

- ✓ Korunmuş Çekirdekli Endüktif SAAS (Shielded-Core Inductive SFCL)
- ✓ Doyurulabilir Çekirdekli Endüktif SAAS (Saturable-Core Inductive SFCL)

<u>Korunmuş Çekirdekli EndüktifSAAS</u>

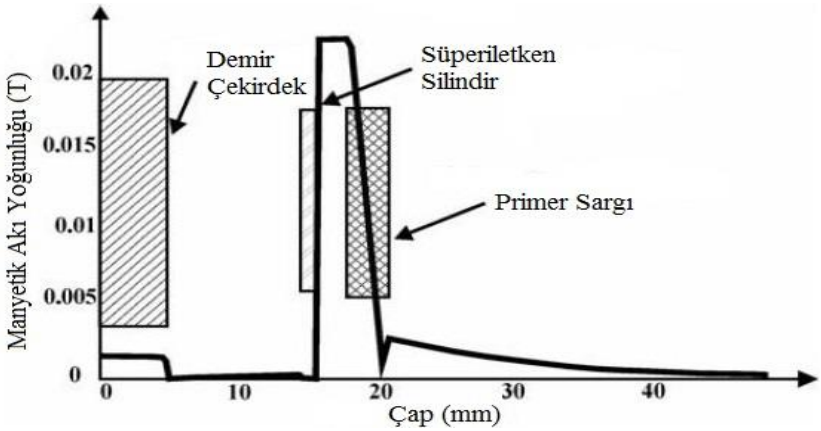
Korunmuş çekirdekli endüktif SAAS'nın çalışma prensibi manyetik olarak endüklenen akımın süperiletkenin kritik akım değerini geçmesi durumunda, süperiletken durumdan rezistif geçişine dayanmaktadır. Bu tip sınırlayıcılar, sekonder sargısı kısa devre edilmiş transformatör gibi tasarlanır ve sekonder sargı olarak genellikle YSS silindir kullanılmaktadır. YSS silindir, normal şartlar altında sınırlayıcının demir çekirdeğindeki primer sargı tarafından üretilen akıyı iletmek için kullanılmaktadır. Sekonder sargı üzerinden sınırlayıcının kritik akımından daha yüksek bir akımın geçmesi durumunda, sınırlayıcı süperiletken durumundan rezistif duruma geçer ve primer sargı tarafından üretilen akı demir çekirdeğe girer. Sonuç olarak primer sargı endüktansının hızlı bir şekilde artmasından dolayı arıza akımı sınırlandırılır [45]. Şekil 3.28'de korunmuş çekirdekli endüktif SAAS devresi gösterilmiştir [46].



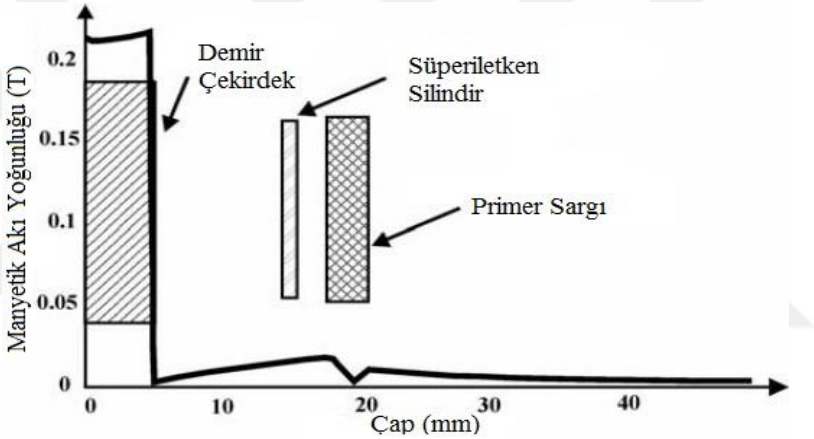
Şekil 3.28 Korunmuş çekirdekli endüktif SAAS devresi [46]

Normal işletme durumunda, sınırlayıcının sekonder sargısı süperiletken durumunda olup çekirdeğin kalkanı gibi davranmaktadır. Arıza meydana gelmesi durumunda, manyetik alan kaynaklı akım sınırlayıcının kritik akımını aşar ve sınırlayıcının rezistif duruma geçmesini sağlar. Bunun sonucunda, manyetik alanın demir çekirdeğe nüfuzu, sınırlayıcı empedansının artmaya devam etmesine olanak sağlar. Şekil 3.29'da eksenel kesitte süperiletkenlik durumunda manyetik indüksiyon gösterilmiştir. Şekil 3.30'da ise

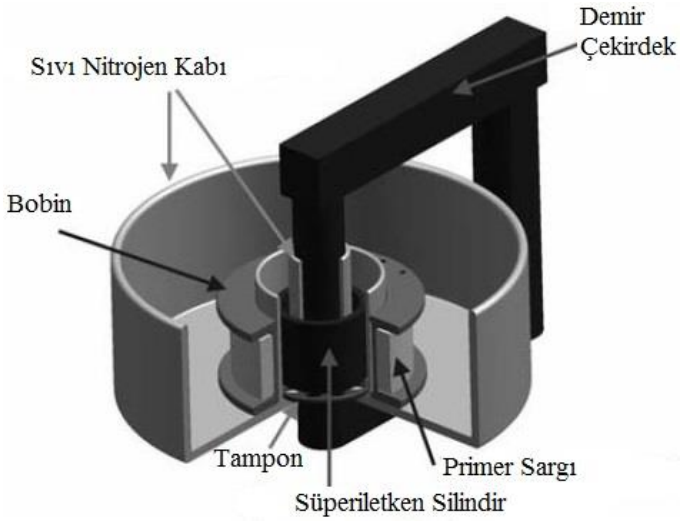
eksenel kesitte rezistif durumda manyetik indüksiyon gösterilmiştir. Şekil 3.31'de da bu tip endüktif SAAS modeli gösterilmiştir [48].



Şekil 3.29 Eksenel kesitte süperiletkenlik durumunda manyetik indüksiyon [48]



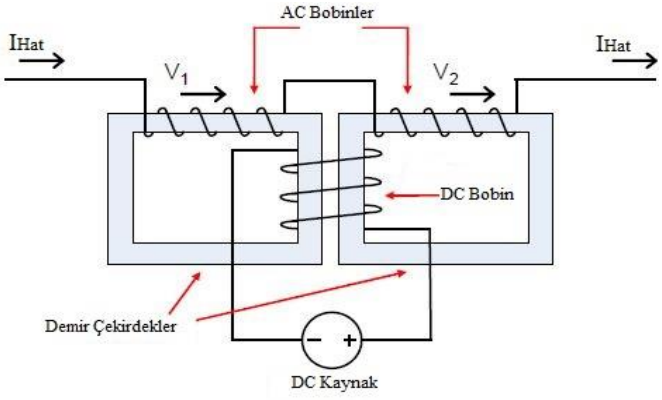
Şekil 3.30 Eksenel kesitte rezistif durumda manyetik indüksiyon [48]



Şekil 3.31 Korunmuş çekirdekli endüktif SAAS modeli [48]

Doyurulabilir Çekirdekli Endüktif SAAS

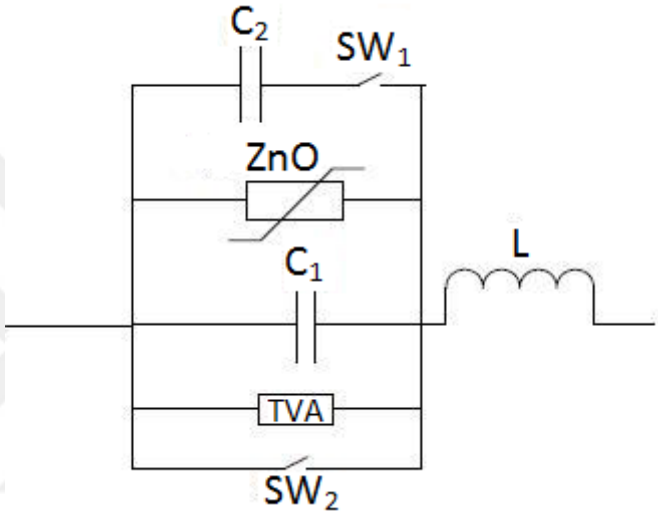
Doyurulabilir çekirdekli endüktif SAAS'ler, rezistif ve korummuş çekirdekli SAAS'lerin aksine artan empedans elde etmek için süperiletkenin söndürmesine (rezistif durumda hızlı gelişen anormal ve kontrol edilemez durum) dayanır ki AA hatta endüktif reaktansı değiştirmek için demir çekirdeğin manyetik özelliklerinin dinamik davranışını kullanır. Bu yapı iki demir çekirdek ve her faz için iki AA sargı kullanır. AA sargılar, AA hat ile seri bir endüktans oluşturmak için çekirdeğin etrafına sarılmış olan geleneksel iletkenlerden yapılır. Demir çekirdek ayrıca manyetik bias sağlayan sabit akımlı süperiletken sargılara da sahiptir. Normal durumda (AA akım sistemin maksimum anma akımını aşmadığı zaman), YSS bobin DA uyarmayla, çekirdeği tamamen doyurur ve çekirdek "1" nispi geçirgenliğine sahiptir. AA bobinlere göre, demir çekirdek hava gibi davranır bu yüzden AA empedans (endüktif reaktans) hava çekirdekli bir reaktöre benzerdir. Arıza şartları altında, akımın negatif ve pozitif tepe değeri çekirdeği her yarım periyot boyunca artan hat empedansı ile sonuçlanan doygunluktan çıkarmaya zorlar. Sonuçta, arıza akımının tepe değerinde önemli bir azalma olur. Sınırlama eylemi sırasında çekirdeğin doyumun (saturasyonun) içine ve dışına olan ani dinamik hareketi, akımın dalga şeklinde harmonikler üretir. Ancak, normal şartlar altında, gerilim ve akımın dalga şekilleri doyurulabilir çekirdekli endüktif SAAS tarafından etkilenmez. Bu tip SAAS normal durumda, hava çekirdekli reaktörün empedansına ve arıza durumunda çok yüksek empedansa sahip olan değiştirilebilir endüktanslı demir çekirdekli reaktördür. Bu yapıdaki YSS DA alan sargılarının kullanım amacı, işletme kayıplarını azaltmaktır [43]. Şekil 3.32'de doyurulabilir çekirdekli endüktif SAAS devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.32 Doyurulabilir çekirdekli endüktif SFCL devresi [43]

3.2.3 Hibrit Arıza Akım Sınırlayıcı (HAAS)

HAAS ilk olarak 2001 yılında Tetiklemeli Vakum Anahtarlı (TVA) arıza akım sınırlayıcılar olarak ortaya çıkmıştır. Arıza akımlarını sınırlamak için mekanik anahtarlar, KHAAS, SAAS ve diğer teknolojilerin kombinasyonunu kullanırlar. Devre kesicilerin ve mekanik tabanlı anahtarların arıza akımlarını birkaç periyot içinde cevap veremediği bilinen bir konudur. Güç elektroniği anahtarlama ise gerilimin sıfır geçişinde ve çok hızlı açma yapabilmektedir. Şekil 3.33'de HAAS ait eşdeğer devre verilmiştir [30].



Şekil 3.33 HAAS eşdeğer devresi [30]

Normal çalışma durumunda C_1 ve L seri rezonans durumunda oldukları için sıfır empedans gösterirler. ZnO olası aşırı gerilimlerden cihazı korumaktadır. Normal çalışma durumunda TVA ve SW_2 devre dışıdır. SW_2 manyetizma vakum kontaktörü 3-10 ms arasında devreye girerek TVS'yi uzun süreli arkların korozyonundan korumaktadır. Arıza meydana geldiği zaman C_1 devre dışı bırakılır aynı anda TVA ve SW_2 devreye alınır. Böylece arıza akımı L endüktansı üzerinden sınırlanmış olur [47].

3.2.4 Elektromanyetik Arıza Akım Sınırlayıcı (EAAS)

Elektromanyetik Arıza Akım Sınırlayıcı (EAAS), arıza akımının büyüklüğüne bağlı olarak kendi empedansını otomatik ayarlayabilen bir arıza akım sınırlayıcıdır. Böylece yakın değer aralığı içindeki akımların geçmesine izin vermektedir. EAAS güç sistemindeki cihaz ve ekipmanları korumak için yaklaşık olarak 8 ms de devreye girmektedir.

Arıza durumundaki empedans değişimi kısa devre akımı ile orantılı bir şekilde değişir. Arıza akımındaki artış ne kadar fazla ise empedans artışı da aynı şekilde artmaktadır. Normal şartlar altında yaklaşık olarak sıfır empedans gösterir ve herhangi bir gerilim düşümüne sebep olmaz. EAAS'ler kendinden tetiklemeli cihazlardır, arıza temizlendikten sonra akıma bağlı olarak otomatik sıfır empedans durumuna dönmektedir. Bu yöntem akıllı şebekeler için güvenilir ve etkili bir arıza akım sınırlama olanı sağlamaktadır. Cihaz empedansının akım değerine bağlı olarak değişmesinden dolayı Dinamik Arıza Akım Sınırlayıcı (DAAS) olarak isimlendirilir.

EAAS'ler çekirdek üzerine sarılmış bir bobinin endüktif reaktans değişimi prensibine göre çalışır. Çekirdek üzerinde artan geçirgenlik bobin üzerinden geçen akımla orantılı olarak artan bir reaktansın oluşmasına yol açar. Çeşitli akı yoğunluğu için, manyetik malzeme geçirgenliği manyetik doyma altındaki çalışmalarda sabittir. Bu sebepten dolayı, akım değişim aralıklarında sabit bir endüktif reaktansa yol açar. Ancak, EAAS'lerde kullanılan çekirdek malzemesi etki alanı rastgele hizalanmış, geleneksel çekirdeklerle karşılaştırıldığında, içeri ve dışarı doğru radyal olarak hizalanmış bir manyetik alana sahiptir. EAAS'ler 9.35 MVA 12 kV 0.45 kA değerinde 2008 den beri kullanılmaktadır [49].

EAAS'lerin avantajları,

- ✓ Arıza akımının değerini ilk periyotta sınırlar.
- ✓ Yüksek empedanslı arızalarda bile arıza akımını etkili bir şekilde sınırlar.
- ✓ Üç saniye içinde art arda meydana gelen üç kısa devre akımına termal yönden dayanır.
- ✓ Meydana gelen arıza akımına yarım periyot içinde cevap verdiği için güç kalitesini bozmaz ve arızanın temizlenmesinin ardından bir periyot içinde otomatik olarak devre sıfır empedans durumuna döner.

Dezavantajları ise,

- ✓ Çok karmaşık bir yapıya sahip olması,
- ✓ Kapasitif gücü yüksek sistemlerde uygulama zorluğu oluşması

olarak ifade edilebilir.

BÖLÜM 4

AKIM SINIRLAMA REAKTÖRÜ (ASR)

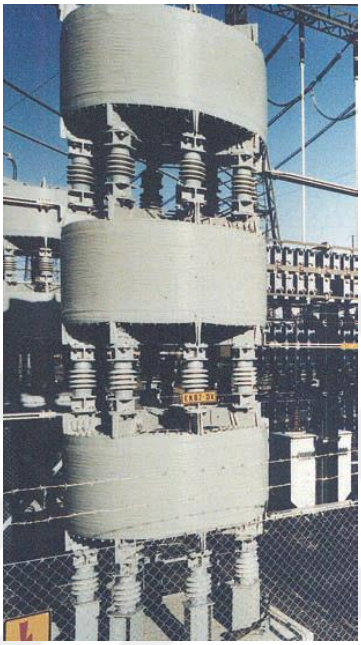
ASR'ler geleneksel arıza akım sınırlama yöntemleri arasındaki en pratik ve en iyi bilinen uygulamalardır. ASR'ler, arıza akımını sınırlamak için devreye bağlanan seri reaktörlerdir [50][51]. Sisteme seri olarak bağlanarak sistemin toplam empedansını artırır ve arıza akımının genliği azaltmış olur. Bu sayede, sistemde kullanılan tüm ekipmanlar üzerindeki zorlayıcı etkiler azalır. Güç sisteminde kullanıldığı yere göre gerilim düşümlerine ve reaktif güç kayıplarına yol açmasına rağmen, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha ekonomiktir. Gerilim kararlılığı ve geçici durum kararlılığı üzerinde azaltıcı etkisi bulunmaktadır. Transformatör merkezleri üzerindeki etkileri ihmal edilebilir olmakla birlikte, güvenlik önlemleri nedeniyle büyük alanlar kaplamaktadırlar.

ASR'ler kuru tip ve yağlı tip olmak üzere iki başlık altında toplanırlar. Kuru tip ASR'lerin demir çekirdekli ve hava çekirdekli olmak üzere iki farklı tipi mevcuttur. Her bir ASR'nin birbirine göre avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır. ASR tip seçimi sistem ihtiyaçları göz önüne alınarak belirlenir. Kuru tip demir çekirdekli ASR devreye seri bağlanır, arıza durumunda demir çekirdeğin doyma ihtimalinin çok yüksek olmasından dolayı tercih edilmez. Bu nedenlerden dolayı, güç sistemlerinde kuru tip hava çekirdekli ASR kullanılmaktadır. Hava çekirdekli ASR'nin en büyük problemi etrafındaki alana dağılan manyetik akıdan dolayı oluşan güvenlik problemidir. ASR'nin çevresi personel güvenliği açısından çitlerle çevrilmelidir.

Yağlı tip ve kuru tip reaktörlerin özellikleri genel olarak birbirine benzemektedir. Yağlı tip ASR'ler, özellikle kirli ortamlar için tasarlanmıştır. Şekil 0.1'de Üç fazlı kutu tip hava çekirdekli akım sınırlayıcı reaktör gösterilmiştir.

Yağlı tip reaktörlerin kuru tipe göre avantajları aşağıda verilmiştir [27];

- ✓ Yağın dielektrik sabiti havadan daha büyüktür. Bu nedenle kuru tip ASR ile karşılaştırıldığında yağlı tip ASR daha küçük boyutludur.
- ✓ Yağın ısı transfer yeteneği havaya göre daha yüksektir. Bu nedenle tasarım aşaması sırasında bazı avantajları ve tasarrufları olur.



Şekil 4.1 Üç fazlı kutu tip hava çekirdekli ASR [52]

Akım sınırlayıcı reaktörlerin önemli teknik parametreleri,

- ✓ Nominal gerilim,
- ✓ Nominal frekans,
- ✓ Sitemin kısa devre kapasitesi,
- ✓ Temel izolasyon seviyesi,
- ✓ Sürekli çalışma akımı,
- ✓ Anma endüktansı,
- ✓ Tip (kuru veya yağlı),
- ✓ Sınıf (dahili veya harici),

olarak sıralanabilir.

4.1 ASR Uygulamalarında Dikkat Edilecek Hususlar

ASR'ler güç sistemlerinde meydana gelen arıza akımlarını sınırlamada önemli etkilere sahiptir. Ancak, bunların sisteme bağlandığı yere göre farklı negatif etkileri bulunabilmektedir. ASR'lerin devreye alınmadan önce sistem üzerinde oluşabilecek aşağıdaki etkileri incelenmesi gerekmektedir. Bu etkiler [27];

- ✓ Gerilim düşümü: ASR sisteme bağlandığı noktaya göre gerilim düşümüne sebep olabilir.
- ✓ Geçici kararlılık: Gerilim kararlılığının yanı sıra, ASR sistemin geçici kararlılığını da bozabilir.
- ✓ Enerji tüketimi: ASR'ler fider veya transformatör çıkışlarında kullanılacaksa normal işletme durumunda da sistem akımı ASR üzerinde akacağından dolayı enerji kaybına neden olacaktır. ASR tasarım aşamasında bunun göz önünde bulundurulması gerekir.
- ✓ Dağılan manyetik akı: ASR etrafında yayılan yüksek manyetik akı göz önüne alındığında ASR çevresinde güvenlik mesafeleri gereklidir.
- ✓ Geçici toparlanma gerilimi: Güç sistemlerinde kullanılan kesiciler herhangi bir sebepten dolayı akımı kestiği zaman kesicinin kontakları arasında bir geçici toparlanma gerilimi oluşur. Kesiciler için toparlanma gerilimin maksimum değeri ve toparlanma gerilimin yükselme hızı çok önemlidir. Eğer sistemde meydana gelen toparlanma gerilimi ve gerilimin yükselme hızı kesicinin sınır değerlerini aşarsa bu ikinci bir arkın tutuşma olasılığını artıracaktır. Buda kesici ve diğer devre ekipmanları üzerinde olumsuz etki yaratacaktır.

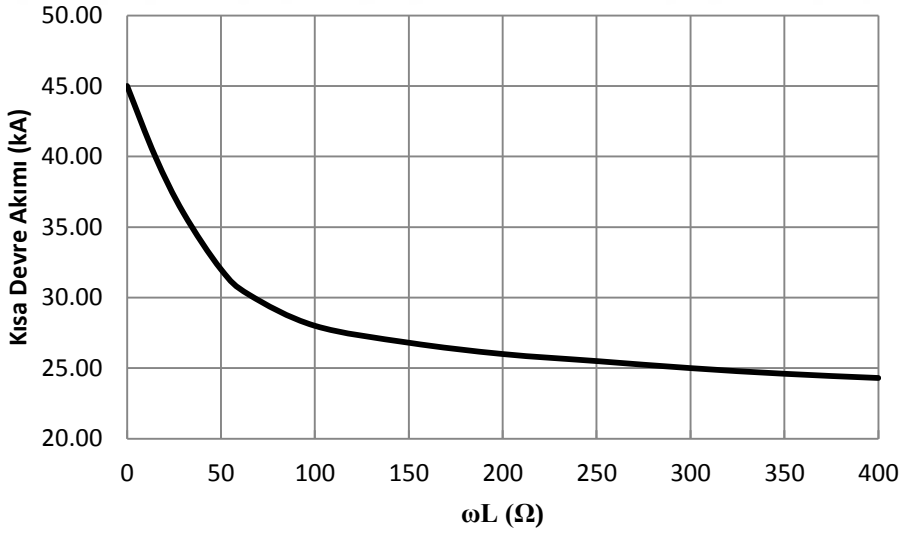
Gerçekleştirilen analiz ve çalışmalar, ASR'lerin kesici toparlanma gerilimini ve toparlanma geriliminin yükselme hızını farklı şekilde etkilediğini göstermektedir [53][54].

- ✓ ASR, geçici toparlanma geriliminin tepe noktasını azaltır ve bu bir avantajdır.
- ✓ ASR, toparlanma geriliminin yükselme hızını ise arttırır ve bu bir dezavantajdır

Toparlanma geriliminin yükselme hızı, geçici toparlanma geriliminden daha kritik bir öneme sahip olduğundan ASR kurulumundan önce geçici durum incelemelerinin iyi yapılması gerekmektedir.

4.2 ASR Endüktans Değerinin Belirlenmesi

ASR'ler sistemin çalışma koşullarına göre özel imal edildikleri için teknik parametrelerinin düzgün belirlenmesi önem arz etmektedir. Seri reaktörün değeri kullanıldığı yere ve sınırlanmak istenen akım miktarına bağlıdır. Şekil 4.2'de ASR reaktansı ωL'nin bir fonksiyonu olarak simule edilen sistemin maksimum arıza akımı gösterilmiştir. L değeri arttıkça arıza akım seviyesi de azalmaktadır. Ancak, kritik değerden sonra L artışına rağmen arıza akımındaki değişim çok az olmaktadır. Şekil 4.2'deki değişime göre bu değer genellikle 50-100 Ω arasında bir değer olarak belirlenmektedir. Arıza akımını azaltma açısından baktığımızda ωL için 50-100 Ω arasında bir değer seçilmesi bu tez çalışmasında incelenen sistem için uygun görülmüştür. Ancak, reaktör değerinin uygulamada geçici durum kararlılığı, gerilim kararlılığı ve geçici toparlanma gerilimi kısıtlamaları göz önüne alınarak tekrar hesaplanmalıdır. 50-100 Ω arasında seçilen değer de sadece arıza akımı sınırlama miktarı göz önüne alınmıştır. Bu sebepten dolayı, seçilen değerin kullanılması zorunlu değildir. Seri reaktör için en uygun değerin belirlenmesi için şebeke üzerinde kararlılık, gerilim düşümü, enerji kaybı ve geçici toparlanma gerilimi gibi analizler yapılarak optimum değer belirlenir [54].



Şekil 4.2 Endüktansın arıza akımı üzerindeki etkisi [54]

4.3 ASR'lerin Kullanıldığı Yerler

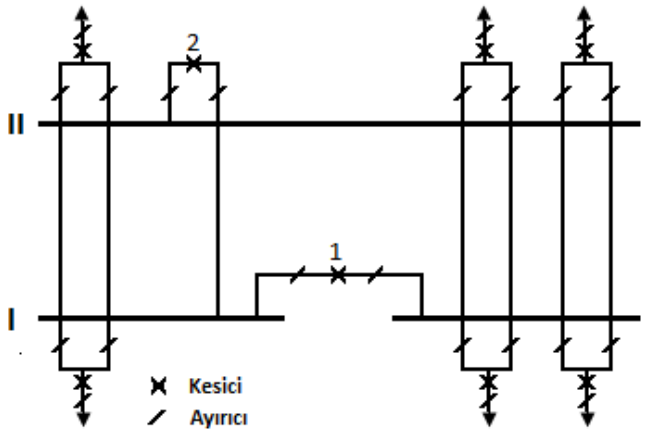
Arıza akımlarını sınırlamak için kullanılan akım sınırlayıcı reaktörlerin transformatör merkezlerinde birçok yerde kullanılmaktadır. Bunlar;

- ✓ İki ana bara arasında,
- ✓ Ana bara transfer bara arasında,
- ✓ Kritik fider girişlerine,
- ✓ Transformatör merkezleri veya bara grupları arasına,
- ✓ Transformatör Çıkışlarında,

olarak sıralanabilir.

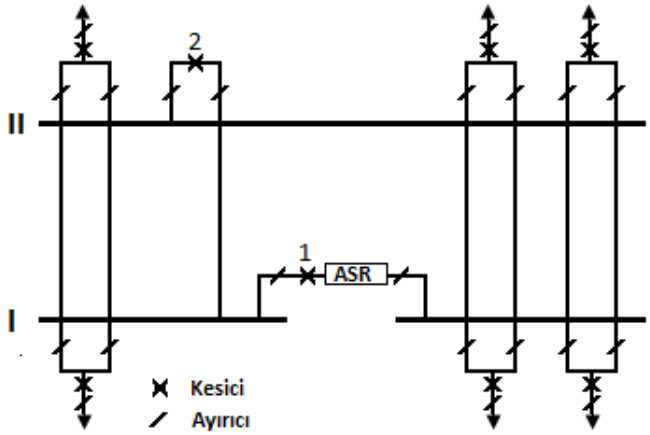
4.3.1 İki Ana Bara Arasında Kullanım

Transformatör merkezlerinde birçok bara tipi (2 ana bara, ana bara transfer bara, 2 ana bara 1 transfer bara gibi) kullanılmaktadır. Arıza akımlarını sınırlamak için bara böleme işlemi yapılır ve bu baralar kesici ve/veya ayırıcı üzerinden birbirine bağlanır. Ancak, bara bölme transformatör merkezlerin güvenilirliğini azalttığı için bu yöntem zorunlu olamadıkça tercih edilmemektedir [26]. Şekil 4.3'de 2 ana baralı sistemde bara ayırma yöntemi gösterilmiştir [27].



Şekil 4.3 Çift baralı düzenleme [27]

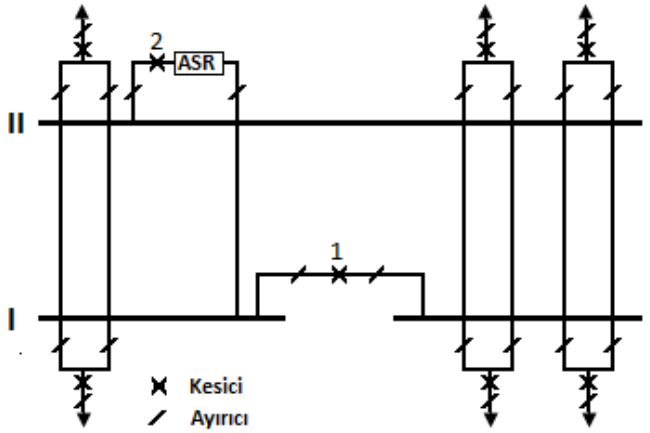
Şekil 4.3'de, 1 ve 2 numaralı kesiciler sırasıyla bara bölüm kesicisi ve bara bağlantı kesicileridir. Bara bölme işlemi yaptıktan sonra ana baralar seri reaktör üzerinden seri bağlanır. Bu bağlantı yapısı Şekil 4.4'de gösterilmiştir. ASR herhangi bir fiderle doğrudan seri bağlantılı olmadığından geçici durum kararlılığı ve gerilim kararlılığı üzerinde olan etkileri göz ardı edilebilir [27].



Şekil 4.4 ASR'nin bara bölüm kesicisiyle seri bağlantısı [27]

4.3.2 Ana Bara Transfer Bara/Ana Bara Arasında Kullanım

Bu durumda seri reaktör bara bölme işlemi yapılmadan 2 ana bara arasına yada ana bara ile transfer barası arasına seri bağlanır. Bağlantı yapısı Şekil 4.5'de gösterilmiştir. ASR, 2 numaralı kesici yani bypass kesicisi ile seri bağlıdır. Burada da ASR'nin gerilim kararlılığı ve geçici durum kararlılığı üzerinde önemli bir etkisi olmayacaktır [27].

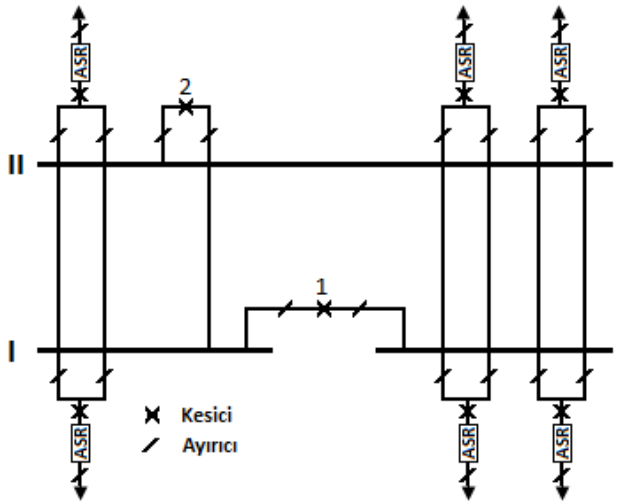


Şekil 4.5 ASR'nin bypass kesicisiyle seri bağlantısı [27]

4.3.3 Kritik Fider Girişlerinde Kullanım

Transformatör Merkezlerinin (TM) kısa devre akım değerleri etkileyen en önemli etkenlerden biri o transformatör merkezine bağlı fiderlerin kısa devre akım katkılarıdır. Her bir fiderin kısa devre akımına katkısı farklı olabilmektedir. Kısa devre akımına katkısı en yüksek olan fiderler kritik fider olarak belirlenir ve bu fiderler kısa devre akımının büyük kısmını oluşturur. Kritik fiderler seri reaktör bağlanarak TM kısa devre

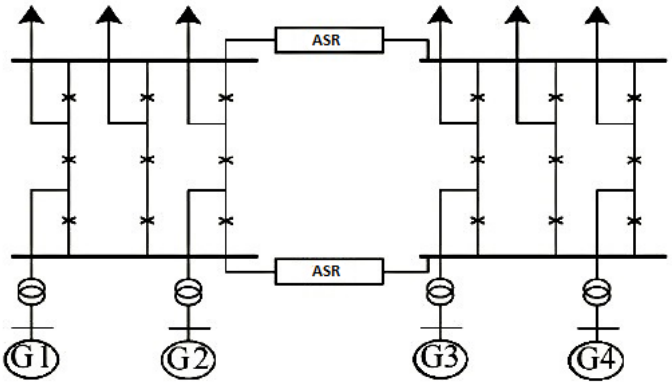
akımı seviyesi sınırlandırılır. TM kısa devre akımındaki azalma kritik fiderlerin kısa devre akım katkılarına bağlı olarak değişmektedir. Kritik fider çıkışlarına seri reaktör bağlantı şeması Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Burada ASR, fider ile doğrudan seri bağlantılı olduğundan gerilim kararlılığında ve geçici durum kararlılığında önemli azalmalar beklenir [27]



Şekil 4.6 ASR'nin fiderlerle seri bağlantısı [27]

4.3.4 Transformatör Merkezleri veya Bara Grupları Arasına Kullanım

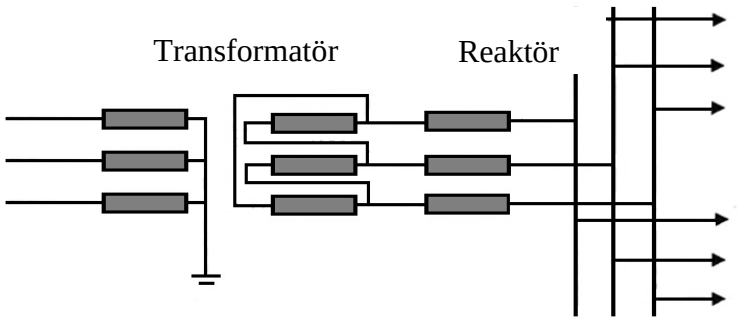
Güç sisteminde birçok bara ve/veya transformatör grupları bulunmaktadır. Genel olarak güvenilirlik, gerilim kararlılığı ve geçici durum kararlılığı üzerine olan pozitif etkilerden dolayı baralar ve transformatör grupları birbirlerine bağlanırlar. Ancak, arıza akımlarını artırmasından dolayı bu bağlantılar dezavantaj da oluşturmaktadır. Baralar arası bağlantının ASR'ler üzerinden yapılması arıza akımlarının azaltılması açısından faydalı olmaktadır. Komşu baraların ASR ile bağlantısı Şekil 4.7'de gösterilmiştir [17].



Şekil 4.7 ASR'nin baralar arası bağlantısı [27]

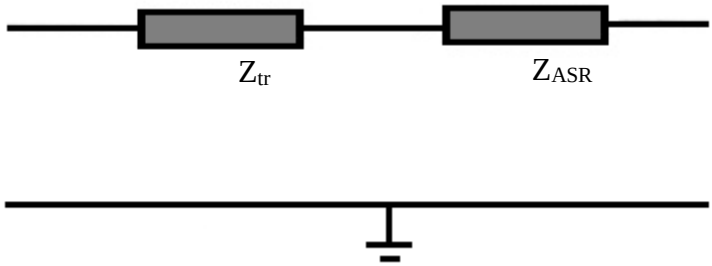
4.3.5 Transformatör Çıkışlarında Kullanım

TM kısa devre akımını sınırlamak için transformatör çıkışlarına seri reaktör bağlanır. Bu sayede kısa devre durumunda devrenin empedansının artması ile arıza akımları sınırlanır [26]. Şekil 4.8'de bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.8 ASR'nin transformatör çıkışındaki bağlantısı [26]

Transformatör çıkışına akım sınırlayıcı reaktörler bağlı sistemin basitleştirilmiş eşdeğer devresi Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Transformatör ve ASR empedansının seri bağlantısı [26]

ASR'den sürekli olarak yük akımı akmaktadır. Bu nedenle ASR'de akan akımın genliği ile orantılı olarak gerilim düşümü ve akımın karesi ile orantılı olarak da reaktif güç kaybı meydana gelmektedir. ASR, transformatörün anma akımını sürekli olarak taşıyabilmeli ve transformatörün anma kısa devre akımına transformatör için belirlenen süre boyunca dayanabilmelidir [26].

BÖLÜM 5

BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, Elektro Manyetik Transiyent (EMT) çalışmalarında kullanılan indirgenmiş modelin detayları ve doğrulama analizlerinin sonuçları verilmiştir.

EMT analizleri arkasında barındırdığı matematik sebebi ile yüksek işlem gücüne ihtiyaç duymaktadır. Bu işlem gücü hesaplanan düğüm sayısı ile orantılı olarak artmaktadır. Güç sistemlerinde yaşanan bir olayda, şebekenin yapısına bağlı olarak yakın noktaların uzak noktalardan çok daha fazla etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle EMT analizleri tüm şebeke modeli üzerinde değil, şebekenin belli bir kısmını içeren indirgenmiş şebeke modelleri üzerinde yapılmaktadır. Burada kritik nokta indirgenmiş modelin, yapılacak çalışmanın nitelikleri göz önüne alındığında, tüm şebeke modeline kıyaslanabilir ve hatası kabul edilebilir olmasıdır.

Literatürde şebeke indirgeme ile ilgili yaklaşımlar genel olarak üç ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar,

- ✓ Model eşdeğer metodu,
- ✓ Tahmin eşdeğer metodu,
- ✓ Tutarlılık eşdeğer metodu,

olarak sıralanabilir [55].

5.1 Model Eşdeğer Metodu

Model eşdeğeri metodu, lineer güç sistemlerinde şebebekenin bir kısmının birtakım matematiksel denklemler yardımıyla eşdeğerinin hesaplanması için kullanılır. Bu yöntemde gerçek güç sistemi iki bölüme ayrılır. Birincisi gerçek güç sistemi içerisinde analizlerin yapılacağı bölüm iken, ikinci kısın ise analiz yapılacak bölümün dışında kalan indirgenmek istenen kısımdır. Bu yöntem daha çok geçici kararlılık analizlerinde

küçük salınmaları olan şebekelerin indirgenmesinde kullanılır. İndirgeme için güç sistem ekipmanları (generatör, yük vb.) kullanılmaz. Matematiksel denklemler şebekenin anlık yük akışı ve kısa devre durumları referans alınarak hesaplanır. Farklı yük akışı ve kısa devre koşulları altında matematiksel denklemelerin tekrar hesaplanması gerekmektedir [55].

5.2 Tahmin Eşdeğer Metodu

Tahmin eşdeğer metodu, büyük güç sistemlerinde gerçek zamanlı olarak güvenlik değerlendirmelerinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde güç sisteminin indirgenmek istenen kısmının yapısı veya teknik detaylarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Güç sisteminin analiz yapılacak kısmı ile indirgenmek istenen kısmını birbirinden ayıran sınır belirlenir. Daha sonra bu sınır kısmında güç sisteminin cevapları zamana bağlı olarak kaydedilir. Şebekenin indirgenmek istenen kısmı sistemin cevap kayıtlarına göre belirlenir. Bu yöntem gerçek zamanlı olarak çalıştığı için şebekenin indirgenme hızı büyük önem kazanmaktadır. Ayrıca, indirenmiş sistem orijinal sistemin kayıtları kullanılarak oluşturulduğu için analiz sonuçlarındaki doğruluk yapılan kayıtlardaki hassasiyetle doğru orantılıdır [55].

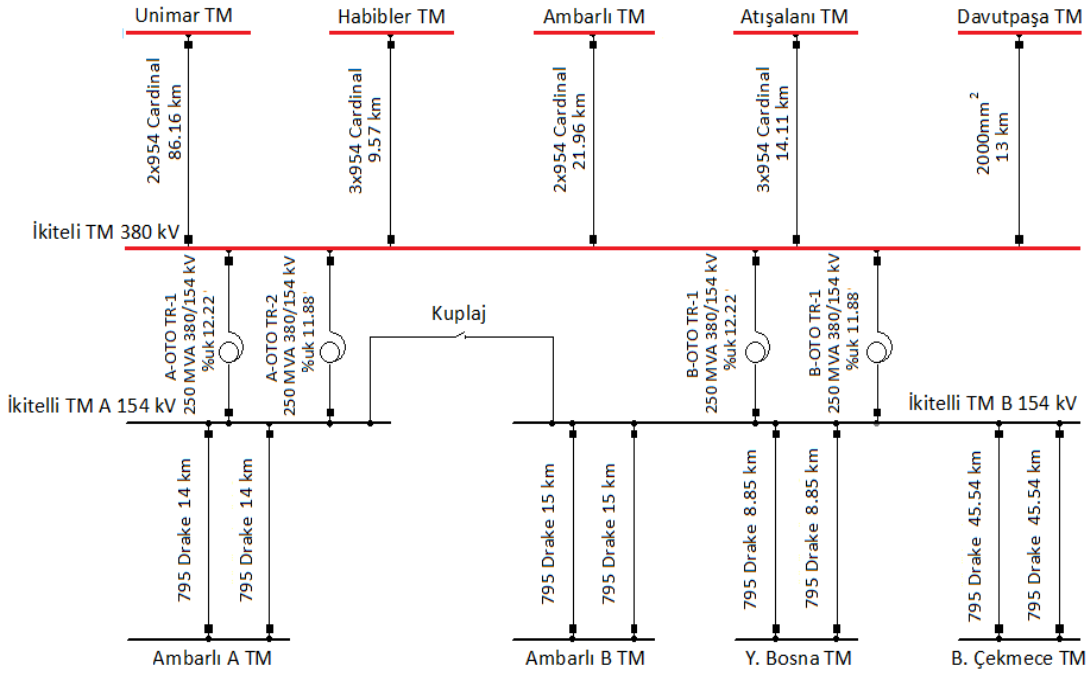
5.3 Tutarlılık Eşdeğer Metodu

Tutarlılık eşdeğer metodu, güç sistemlerinde büyük salınımların olduğu durumları generatör rotor açısının farklı değerlerinin karşılaştırılması ile gerçek sisteme en yakın rotor açısının belirlenmesi sağlanır. Şebekenin indirgenmek istenen kısmına uygun generatör seçimi ve bu generatörün rotor açısının belirlenmesi bu yöntemin temelini oluşturur. Ayrıca yük akışı analizlerinin doğruluğunu artırmak için generatör yanında bir yük tanımlanır. Şebekenin indirgenmek istenen kısmı tek bir generatör-yük grubu yerine birden fazla generatör ve yük gruplarına ayrılması analiz sonuçların doğruluğunu artıracaktır [55].

5.4 Test Sistemi

Test sistemi olarak, TEİAŞ iletim sistemi içinde kısa devre akım değerlerinin yüksekliği ve fider-tranformatör sayısının fazlılığı gibi parametreler göz önünde tutularak belirlenen İkitelli TM seçilmiştir. İkitelli TM'de 1 adet 380 kV ve 2 adet 154 kV bara bulunmaktadır. 380 kV barası, 2 adet 250 MVA transformatör üzerinden 154 kV A

barasına bağlanırken, 2 adet 250 MVA trafo üzerinden 154 kV B barasına bağlanmaktadır. 380 kV barasında 5 adet fider, 154 kV A barasında 3 fider ve 154 B barasında 6 adet fider olmak üzere toplamda 14 fider bara kısa devre akımına katkıda bulunmaktadır. İkitelli TM'ye ait tek hat diyagramı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 İkitelli TM tek hat diyagramı

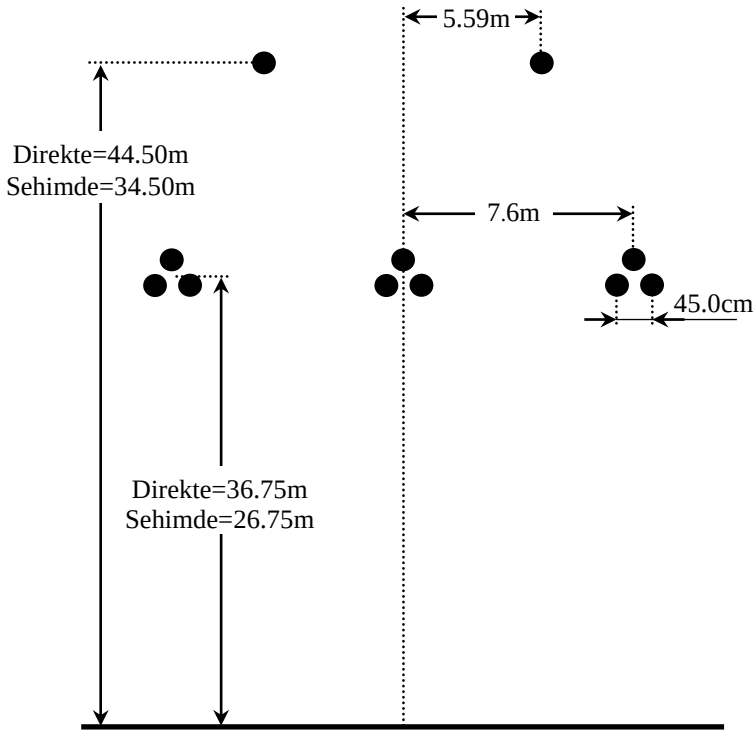
İkitelli TM'ye ait indirgenmiş şebeke modeli kısa devre odaklı olarak oluşturulmuştur. Arıza öncesi yük akışları ile ilgilenilmemiştir. İkitelli TM ile bağlantılı 380 kV ve 154 kV şebeke modellenmiştir. Modelle çalışması sırasında en önemli nokta indirgenmiş şebekenin modelinin gerçek şebeke modelinden ayrılacağı noktaların belirlenmesidir. Bu amaçla indirgeme yapılacak bölgedeki TM'lerin fiderleri detayları olarak incelenmiştir. İndirgeme yapılan TM'de gerçek şebekenin etkisi TM'den görünen thevenin eşdeğeri ile temsil edilmektedir. Bu amaçla indirgeme yapılan her TM'de hem 3 faz hem tek faz toprak kısa devreler yapılmış, fiderlerin katkıları ayrıştırılmış ve elde edilen bu parametrelerden Thevenin gerilim kaynağı ve empedansına geçilmiştir. Thevenin gerilim kaynağı ve empedansı hesabı ile ilgili detaylar EK-A'da verilmiştir.

İkitelli TM eşdeğer devre modeli oluşturulurken 380 kV ve 154 kV baralarında meydana gelen kısa devre akımlarına katkı sağlayan TM'ler modellenmiştir. Kısa devre akımına katkı sağlamayan TM'lere ait thevenin kaynak ve iletim hattı modele dahil edilmemiştir. İkitelli TM ile bağlantılı iletim hatlarına ait teknik bilgiler Çizelge 5.1'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 5.1 İkitelli TM ile bağlantılı iletim hatları [56]

İletim Hattı	Gerilim (kV)	Uzunluk (km)	Kesit	Hat tipi	Devre Adet
İkitelli-Ambarlı B	380	21.96	C2X954	Havai	Tek
İkitelli-Atışalanı	380	14.11	C3X954	Havai	Tek
İkitelli-Davutpaşa	380	13.00	2000mm^2	Yer altı	Tek
İkitelli-Habibler	380	9.57	C3X954	Havai	Tek
İkitelli-Unimar	380	86.16	C2X954	Havai	Tek
İkitelli-Ambarlı A	154	14.00	795	Havai	Çift
İkitelli-Ambarlı B	154	15.00	795	Havai	Çift
İkitelli-B. Çekmece	154	45.54	795	Havai	Çift
İkitelli-Yenibosna	154	8.85	795	Havai	Çift

Çizelge 5.1'de verilen havai hatların hepsi 3PA tipi direk ile modellenmiştir. Koruma iletkeni olarak 96mm^2 kesitli galvanize çelik iletken kullanılmıştır. İletim hattı boyunca toprak özdirenci 100 Ω/m alınmıştır. Modellenen direk konfigürasyonu Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2 Direk konfigürasyonu (3PA) Digsilent PowerFactory Modeli

Kısa devre hesapları IEC 60909 standardına uygun olarak yapılmış, gerilim faktörü (C) 1 olarak alınmıştır. Baralara ait üç faz ve faz-toprak kısa devre akımlarının genlikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 İkitelli TM'ye ait üç faz kısa devre akımları

Bara Adı	**Gerilim (kV)**	**Üç faz kısa devre Akım (kA)**	**Faz-toprak kısa devre Akım (kA)**
İkitelli	380	30.02	30.80
İkitelli A	154	21.70	20.80
İkitelli B	154	26.80	24.90

Eşdeğer devre modeli oluşturmak için kullanılan, 380kV, 154kV A ve 154kV B baralarına ait üç faz kısa devre analizleri ve fiderlerin kısa devre akımına olan katkıları sırasıyla Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de verilmiştir [57]

*AT BUS 120610 [IKITELLI 380.00] AREA 1 *** FAULTED BUS IS: 120610 [IKITELLI 380.00] *** 0 LEVELS AWAY ****
(PU) V+:/0.0000/0.00 VA:/0.0000/0.00 VB:/0.0000/0.00 VC:/0.0000/0.00
THEVENIN IMPEDANCE, X/R (PU) Z+:/0.005210/75.302, 3.81231

X--------- FROM ----------X	AREA	CKT	I/Z	/I+/	AN(I+)	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)	/Z+/	AN(Z+)	APP X/R
				THREE PHASE FAULT										
110110 [UNIMAR 380.00]	1	1	PU/PU	19.0932	-88.59	19.0932	-88.59	19.0932	151.41	19.0932	31.41	0.0157	86.16	14.886
120011 [AMBARLI-B 380.00]	1	1	PU/PU	26.8217	-92.63	26.8217	-92.63	26.8217	147.37	26.8217	27.37	0.0049	83.79	9.197
120411 [ATISALANI 380.00]	1	1	PU/PU	22.4085	-90.57	22.4085	-90.57	22.4085	149.43	22.4085	29.43	0.0039	85.14	11.768
120611 [IKITELLI 380.00]	1	@1	PU/PU	123.0175	-89.89	123.0175	-89.89	123.0175	150.11	123.0175	30.11	0.0000	0.00	0.000
120622 [IKITELLI 154.00]	1	1	PU/PU	7.7685	-99.09	7.7685	-99.09	7.7685	140.91	7.7685	20.91	0.0464	87.92	27.597
INITIAL SYM. S.C. CURRENT(I''k)(RMS) PU				198.9864	-90.57	198.9864	-90.57	198.9864	149.43	198.9864	29.43			

*AT BUS 120611 [IKITELLI 380.00] AREA 1 *** FAULTED BUS IS: 120611 [IKITELLI 380.00] *** 0 LEVELS AWAY ****
(PU) V+:/0.0000/0.00 VA:/0.0000/0.00 VB:/0.0000/0.00 VC:/0.0000/0.00
THEVENIN IMPEDANCE, X/R (PU) Z+:/0.005210/75.302, 3.81231

X--------- FROM ----------X	AREA	CKT	I/Z	/I+/	AN(I+)	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)	/Z+/	AN(Z+)	APP X/R
				THREE PHASE FAULT										
120510 [DAVUTPASA 380.00]	1	1	PU/PU	55.6516	-91.34	55.6516	-91.34	55.6516	148.66	55.6516	28.66	0.0016	85.02	11.472
120610 [IKITELLI 380.00]	1	@1	PU/PU	75.9915	-91.67	75.9915	-91.67	75.9915	148.33	75.9915	28.33	0.0000	0.00	0.000
120621 [IKITELLI 154.00]	1	1	PU/PU	2.8202	-97.37	2.8202	-97.37	2.8202	142.63	2.8202	22.63	0.0449	87.85	26.694
120621 [IKITELLI 154.00]	1	2	PU/PU	2.6002	-97.53	2.6002	-97.53	2.6002	142.47	2.6002	22.47	0.0487	88.02	28.952
120643 [IKITELLI 34.500]	1	1	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
120644 [IKITELLI 34.500]	1	1	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
120710 [HABIBLER 380.00]	1	1	PU/PU	62.0471	-87.92	62.0471	-87.92	62.0471	152.08	62.0471	32.08	0.0018	85.20	11.901
INITIAL SYM. S.C. CURRENT(I''k)(RMS) PU				198.9864	-90.57	198.9864	-90.57	198.9864	149.43	198.9864	29.43			

Şekil 5.3 İkitelli TM 380kV barası kısa devre etüdü [57]

*AT BUS 120621 [IKITELLI 154.00] AREA 1 *** FAULTED BUS IS: 120621 [IKITELLI 154.00] *** 0 LEVELS AWAY ****
(PU) V+:/0.0000/0.00 VA:/0.0000/0.00 VB:/0.0000/0.00 VC:/0.0000/0.00
THEVENIN IMPEDANCE, X/R (PU) Z+:/0.017371/80.607, 6.04493

X--------- FROM ----------X	AREA	CKT	I/Z	/I+/	AN(I+)	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)	/Z+/	AN(Z+)	APP X/R
				THREE PHASE FAULT										
120222 [AMBARLI-A 154.00]	1	1	PU/PU	12.2511	-95.61	12.2511	-95.61	12.2511	144.39	12.2511	24.39	0.0259	77.95	4.683
120222 [AMBARLI-A 154.00]	1	2	PU/PU	12.2511	-95.61	12.2511	-95.61	12.2511	144.39	12.2511	24.39	0.0259	77.95	4.683
120421 [ATISALANI 154.00]	1	1	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
120421 [ATISALANI 154.00]	1	2	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
120611 [IKITELLI 380.00]	1	1	PU/PU	17.1178	-99.69	17.1178	-99.69	17.1178	140.31	17.1178	20.31	0.0472	87.86	26.721
120611 [IKITELLI 380.00]	1	2	PU/PU	15.7822	-99.85	15.7822	-99.85	15.7822	140.15	15.7822	20.15	0.0512	88.02	28.986
120645 [IKITELLI 34.500]	1	1	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
120646 [IKITELLI 34.500]	1	1	PU/PU	0.4443	-97.10	0.4443	-97.10	0.4443	142.90	0.4443	22.90	0.1150	86.45	16.133
121322 [BAGCILAR 154.00]	1	1	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
INITIAL SYM. S.C. CURRENT(I''k)(RMS) PU				57.8095	-97.99	57.8095	-97.99	57.8095	142.01	57.8095	22.01			

Şekil 5.4 İkitelli TM 154kV A barası kısa devre etüdü [57]

AT BUS 120622 [IKITELLI 154.00] AREA 1 *** FAULTED BUS IS: 120622 [IKITELLI 154.00] *** 0 LEVELS AWAY ***

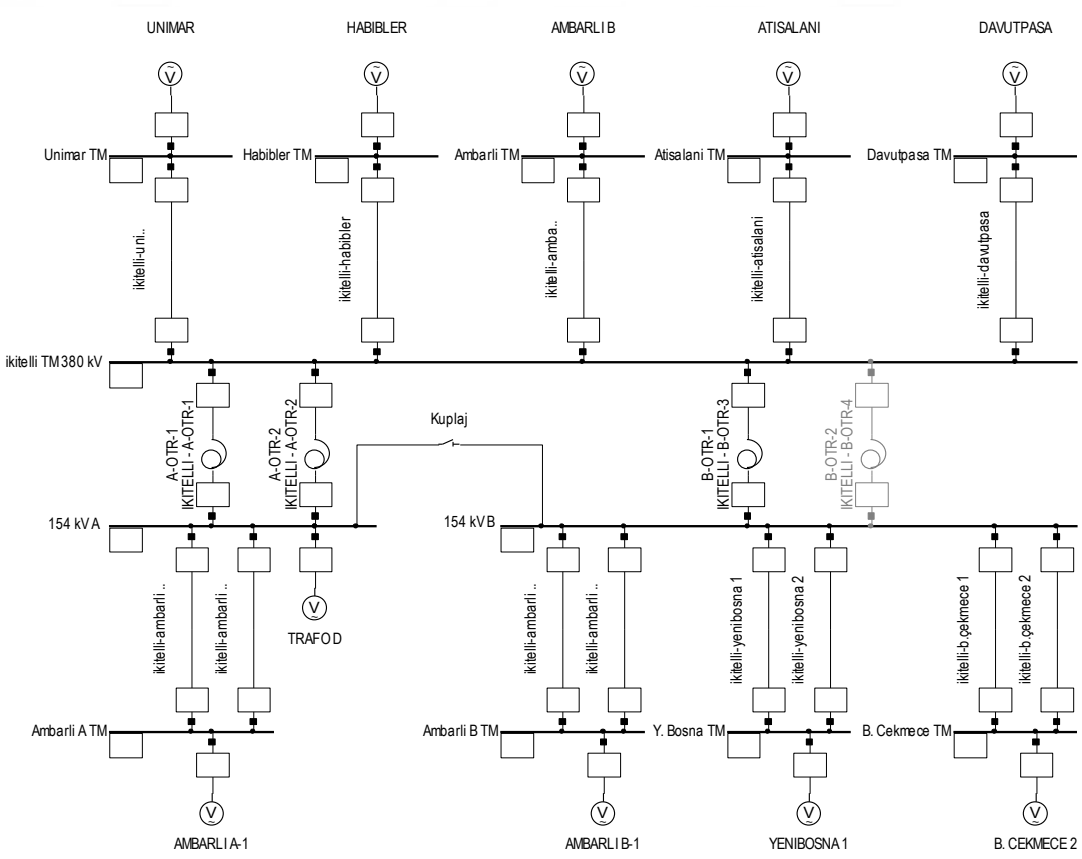
(PU) V+:/0.0000/0.00 VA:/0.0000/0.00 VB:/0.0000/0.00 VC:/0.0000/0.00

THEVENIN IMPEDANCE, X/R (PU) Z+:/0.013866/79.417, 5.35201

X--------- FROM ----------X	AREA	CKT	I/Z	/I+/	AN(I+)	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)	/Z+/	AN(Z+)	APP X/R
				X----------THREE PHASE FAULT----------X										
110721 [BUYUKCEKMECE154.00]	1	1	PU/PU	3.8610	-96.28	3.8610	-96.28	3.8610	143.72	3.8610	23.72	0.0758	77.96	4.687
110721 [BUYUKCEKMECE154.00]	1	2	PU/PU	3.8610	-96.28	3.8610	-96.28	3.8610	143.72	3.8610	23.72	0.0758	77.96	4.687
120022 [AMBARLI-B 154.00]	1	1	PU/PU	10.6274	-92.09	10.6274	-92.09	10.6274	147.91	10.6274	27.91	0.0220	77.95	4.683
120022 [AMBARLI-B 154.00]	1	2	PU/PU	10.6274	-92.09	10.6274	-92.09	10.6274	147.91	10.6274	27.91	0.0220	77.95	4.683
120610 [IKITELLI 380.00]	1	1	PU/PU	17.2128	-99.84	17.2128	-99.84	17.2128	140.16	17.2128	20.16	0.0488	87.93	27.627
120641 [IKITELLI 34.500]	1	1	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
120642 [IKITELLI 34.500]	1	1	PU/PU	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.000
121522 [YENIBOSNA 154.00]	1	1	PU/PU	12.6728	-99.19	12.6728	-99.19	12.6728	140.82	12.6728	20.81	0.0147	77.97	4.692
121522 [YENIBOSNA 154.00]	1	2	PU/PU	12.6728	-99.19	12.6728	-99.19	12.6728	140.82	12.6728	20.81	0.0147	77.97	4.692
INITIAL SYM. S.C. CURRENT(I''k)(RMS) PU				71.4171	-96.92	71.4171	-96.92	71.4171	143.08	71.4171	23.08			

Şekil 5.5 İkitelli TM 154kV B barası kısa devre etüdü [56]

Eşdeğer devre modeli oluşturmak için 380 kV, 154 kV A ve 154 kV B baralarına ait üç faz kısa devre akımları ve fiderlerin bu kısa devre akımına olan katkılarından faydalanılmıştır. Digsilent Power Factory ortamında oluşturulan İkitelli TM'ye ait eşdeğer devre modeli Şekil 5.6'de verilmiştir.



Şekil 5.6 İkitelli TM Eşdeğer Devre Modeli

Eşdeğer devre modelinde kuplajın açık olduğu durumda 380 kV, 154 kV A ve 154 kV B baralarında yapılan 3 faz kısa devre analizi sonucunda elde edilen kısa devre akımlarının kısa devre etüdünde belirtilmiş olan 3 faz kısa devre akımları ile karşılaştırılması Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 İkitelli TM'ye ait gerçek ve hesaplanan üç faz kısa devre akımları

Bara Adı	**Arıza Tipi**	**Gerilim (kV)**	**Üç faz kısa devre akımı (kA)**	**Eşdeğer model üç faz kısa devre akımı (kA)**
İkitelli	3 Faz	380	30.02	31.36
İkitelli A		154	21.70	22.75
İkitelli B		154	26.80	27.74
İkitelli	Faz-toprak	380	30.80	30.28
İkitelli A		154	20.80	21.11
İkitelli B		154	24.90	26.18

Eşdeğer devre modeli ile yapılan çalışmanın üç fazlı dengeli kısa devre hesabı bakımından gerçek sistemi yansıttığı Çizelge 5.3'deki sonuçlardan görülmektedir.

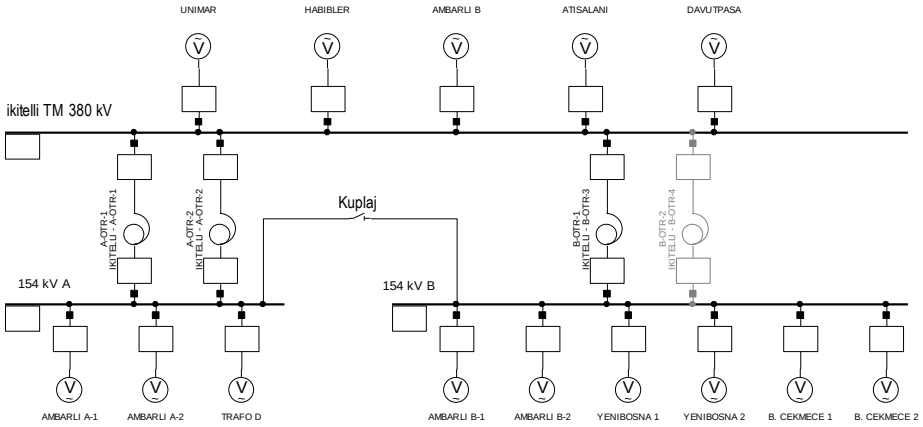
BÖLÜM 6

ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu bölümde ikitelli TM için oluşturulan eşdeğer devre modeli üzerinde bara ayırma, transformatör empedansı artırma, seri reaktör ve seri rezonans tipli KHAAS kullanımının kısa devre akımı sınırlama konusundaki etkileri incelenmiştir.

6.1 Bara Ayırma Etkileri

İkitelli TM'de 154 kV gerilim seviyesinde transformatör merkezi 154 kV A ve 154 kV B baraları üzerinden işletilmektedir. Bara ayırma yönteminin etkilerini inceleyebilmek için 154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı ve açık olması durumları dikkate alınmıştır. Bara ayırma yöntemine kullanılacak devre topolojisi Şekil 6.1'de verilmiştir.

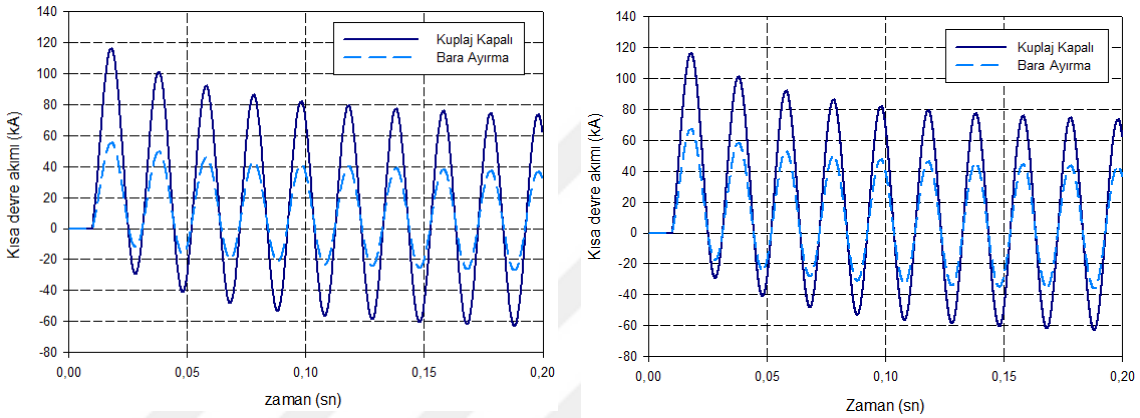


Şekil 6.1 Bara ayırma yöntemi devre topolojisi

154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı ve açık olması durumları için 154 kV baralarda oluşan kısa devre akım değerleri Çizelge 6.1ve Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 154 kV bara ayırma kısa devre sonuçları

Bara Adı	**Arıza Tipi**	**Kuplaj Kapalı**	**Kuplaj Açık**
154 kV A (kA)	3 Faz	48.24	22.75
154 kV B (kA)		48.24	27.74
154 kV A (kA)	Faz-toprak	45.02	21.11
154 kV B (kA)		45.02	26.18



(a) (b)

Şekil 6.2 Bara ayırma kısa devre sonuçları (a) 154 kV A barası (b) 154 kV B barası

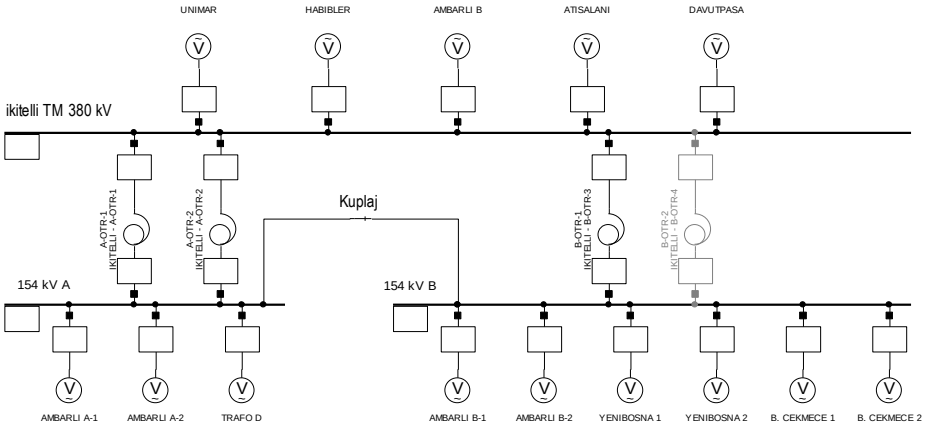
154 kV baralarda meydana gelen kısa devre akım değerlerinin farklı olması, 154 kV B barasını besleyen transformatörlerden birinin devre dışı olmasından kaynaklanmaktadır

TM'lerde bara bölme işlemi yapılırken bara güçlerinin yaklaşık olarak birbirine yakın seçilmesi bara kısa devre akım değerleri arasındaki farkı azaltacaktır. Bir diğer önemli konu ise baraların bağlantılı oldukları TM'lerin kısa devre akım katkılarıdır. Bara ayırma işleminde baralara bağlı TM'lerin kısa devre durumunda ilgili baraya katkı sağladıkları kısa devre akım miktarlarının da göz önüne alınması gerekmektedir.

6.2 Transformatör Empedansı Artırmanın Etkileri

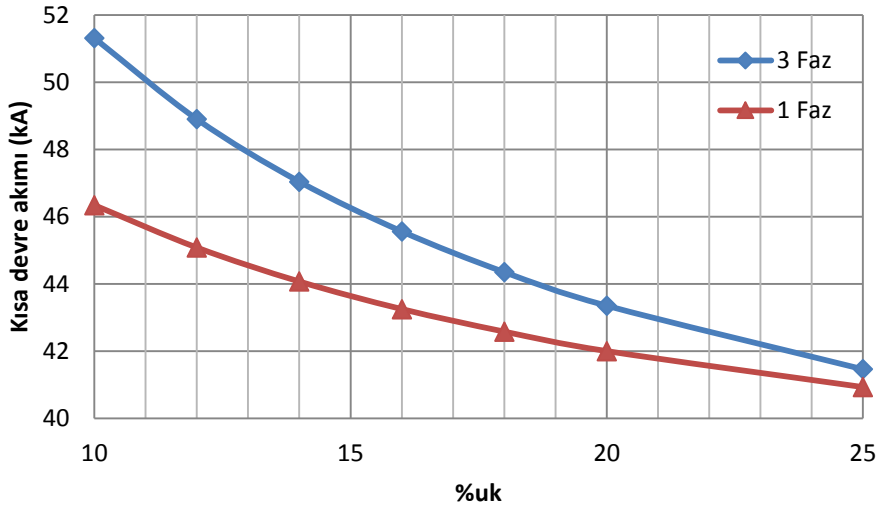
Transformatör empedans değerlerinin artırılmasının incelenen TM için kısa devre akımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analizlerde baralar arası kuplajın kapalı olduğu durumu için 154 kV barayı besleyen tüm transformatörlerin empedansları artırılmıştır.

Transformatör empedans artırma yönteminde kullanılan devre topolojisi Şekil 6.3'de verilmiştir.



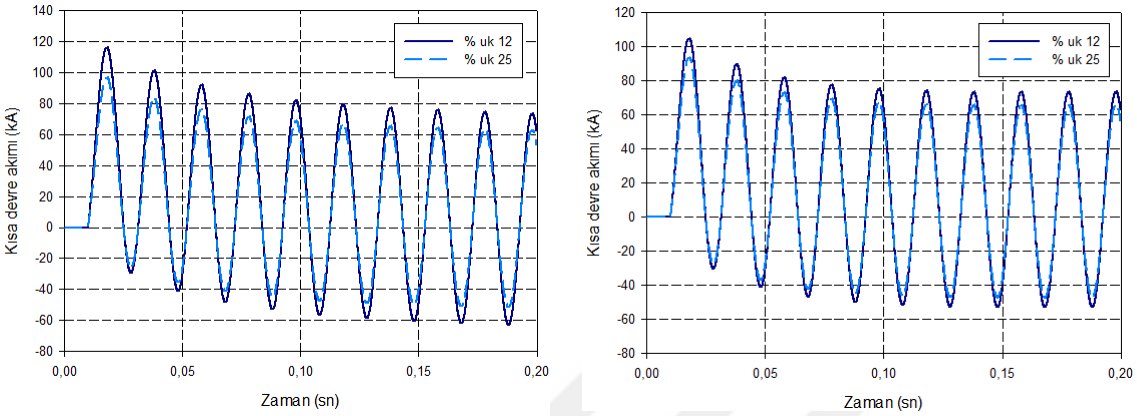
Şekil 6.3 Transformatör empedans artırma devre topolojisi

Transformatör empedans değerinin artmasının, sistemdeki empedans artışına bağlı olarak kısa devre akımlarının azalmasına neden olduğu bilinmektedir. Ancak, empedanstaki bu artış transformatör kayıplarının da artmasına neden olmaktadır. Baralar arası kuplajın kapalı olması durumunda 154 kV barayı besleyen tüm transformatörlerin % uk değerleri 10–25 arasında değiştirilmiştir. Transformatör % uk değerindeki değişime bağlı olarak 154 kV barasında meydana gelen 3 faz ve 1 faz-toprak kısa devre akım değerlerinin değimi Şekil 6.4'de sunulmuştur.



Şekil 6.4 Transformatör % uk değerine bağlı olarak 154 kV barasındaki kısa devre akım değişimleri

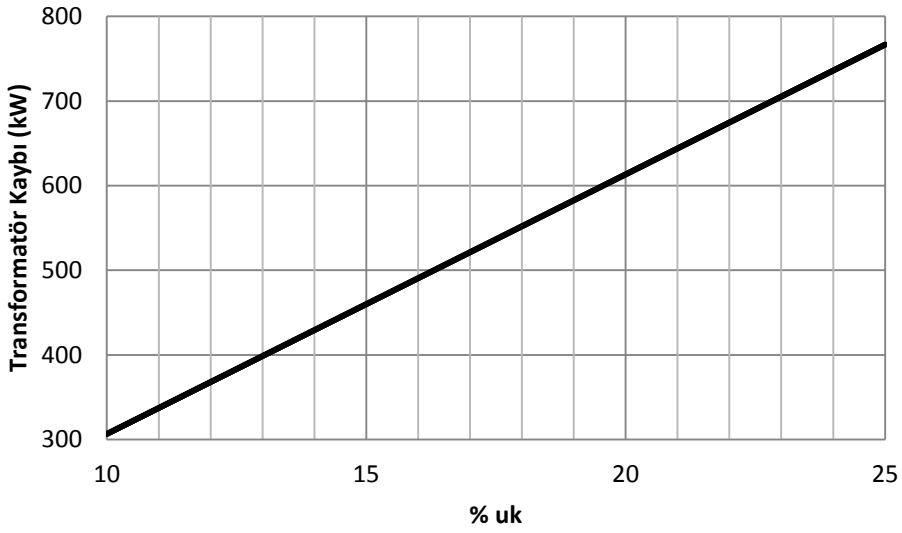
154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı olması durumunda, 154 kV baraları besleyen bütün transformatörlerin %uk değerini 25 yaparak 154 kV A barasında 3 faz ve 1 faz kısa devre arızası yapılmıştır. Transformatör % uk değerinin 12 den 25 yükseltilmesinin kısa devre akım üzerindeki etkisi Şekil 6.5'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.5 Transformatör empedansı artırma kısa devre sonuçları (a) 3 faz kısa devre sonuçları (b) 1 faz kısa devre sonuçları

Gerçekleştirilen çalışmada, transformatör empedansındaki artışa bağlı olarak meydana gelen bakır kayıplarının değişimi de incelenmiş olup, sonuçlar Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada transformatör demir kayıplarının sabit olduğu varsayılmıştır.



Şekil 6.6 Transformatör % uk değerine bağlı olarak transformatör kayıp değişimi

Analiz sonuçları incelendiğinde İkitelli TM'de bulunan bütün transformatörlerin % uk değerlerinin 25'e çıkarılması ile 154 kV barada meydana gelen kısa devre akım seviyesinin azaldığı görülmüştür. Ancak yinede oluşan kısa devre akımlarının31.5 kA sınır değerinin üstünde olduğu tespit edilmiştir. Transformatör empedansını artırma sonucunda kısa devre akım seviyesi sınır değerin altına düşürülse bile, mevcut işletmedeki transformatörler yerine daha yüksek % uk değerine sahip transformatörlerinin kullanılması ekonomik açıdan uygun görülmemektedir. İşletme koşullarında değiştirmesi planlanan ya da yeni kurulacak TM'lerde % uk değeri daha yüksek transformatörler kullanılabilir.

6.3 Seri Reaktör Kullanımının Etkileri

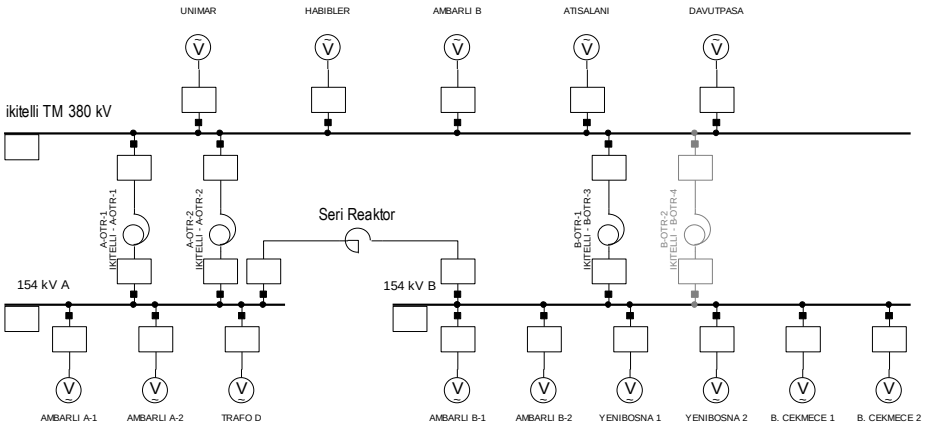
Seri reaktör uygulaması, AAS konusunda en çok kullanılan yöntemlerden birdir. Seri reaktörler, normal işletme koşullarında da devrede olmalarından dolayı sistem üzerinde ek kayıplara sebep olurlar. İhtiyaca göre, TM içerisinde farklı noktalarda kullanılmaktadırlar. Bunlar;

- ✓ İki ana bara arası,
- ✓ Ana bara transfer bara arası,
- ✓ Kritik fider çıkışları,
- ✓ Bara grupları arası,
- ✓ Transformatör çıkışları,

olarak sıralanabilir. Seri reaktörler çalışma koşullarına göre özel imal edildikleri için değerlerinin doğru belirlenmesi önem arz etmektedir. Seri reaktörün değeri kullanıldığı yere ve sınırlanmak istenen akım miktarına göre farklılık göstermektedir.

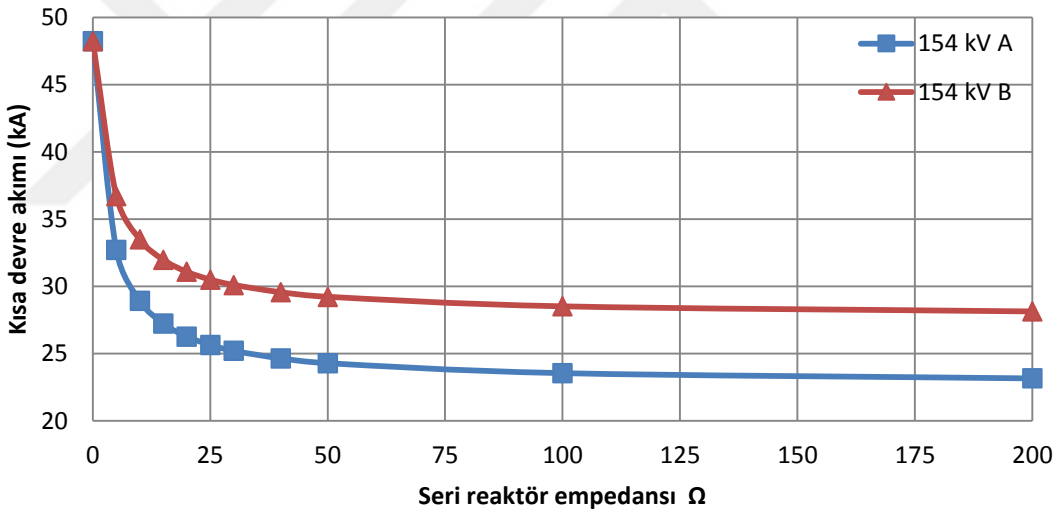
6.3.1 Bara Arızalarında Seri Reaktör Kullanımının Etkileri

İkitelli TM eşdeğer devre modelinde 154 kV baralarda meydana gelen kısa devre akım katkıları incelendiğinde en fazla kısa devre akım katkısı baraları birbirine bağlayan kuplaj üzerinde oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı, 154 kV baraların seri reaktör üzerinden birbirine bağlanması durumu incelenmiştir. Eşdeğer devre topolojisi Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7 154 kV baralar arası seri reaktör ile bağlantı eşdeğer devre topolojisi

Seri reaktörün empedansı 2-200Ω arasında değiştirilmiştir. Seri reaktör empedansının değerine bağlı olarak 154 kV A be 154 kV B baralarında meydana gelen kısa devre akımlarının değişimleri Şekil 6.8'degösterilmiştir.

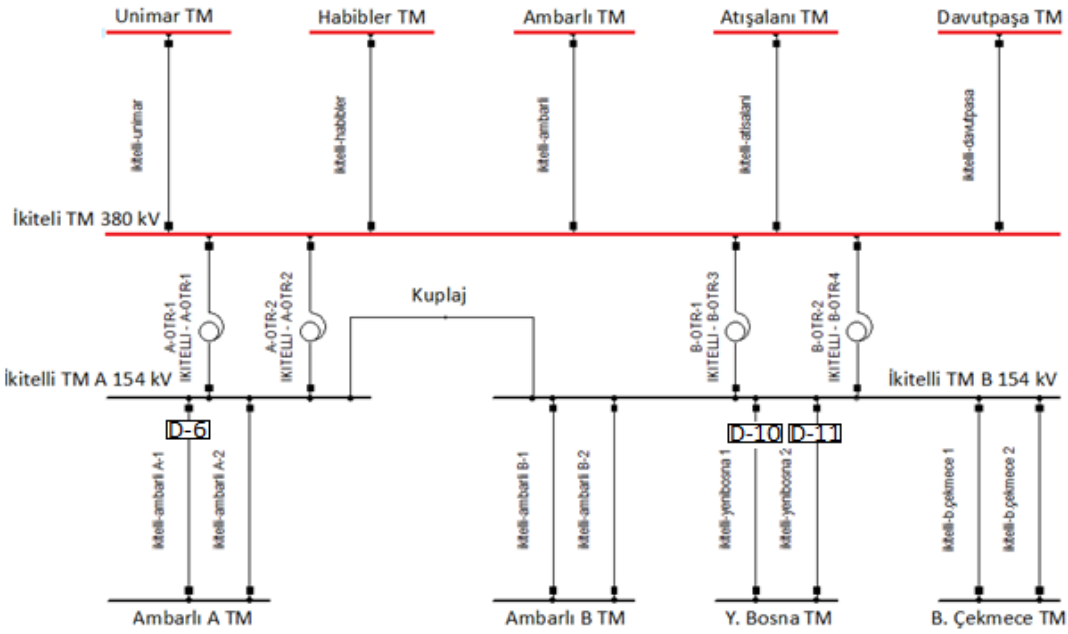


Şekil 6.8 Seri reaktör değerine bağlı olarak 154 kV A ve 154 kV B baralarında meydana gelen 3 faz kısa devre akım değişimi

Seri reaktör empedansının artması ile kısa devre akımının azaldığı, bununla birlikte empedansın belli bir değerinden sonra kısa devre akımındaki değişimin düştüğü Şekil 6.8'den görülmektedir. Seri reaktör empedansının 25-50Ω değer aralığından sonra kısa devre akımının sınırlanması konusundaki etkisinin azaldığı belirlenmiş ve bu nedenle analizlerde seri reaktör empedansının 25Ω olarak seçilmesi uygun görülmüştür. Seri reaktörün değeri sadece akım sınırlama etkisi göz önüne alınarak seçilmiştir. Seri

reaktörün sistem üzerinde kararlılık, gerilim düşümü ve enerji kaybı gibi etkileri de incelenerek farklı değerler kullanılabilir.

Seri reaktör bağlamanın, 154 kV baralar arası kuplaj bağlantısı dışında meydana getirdiği etkilerin ortaya konması için farklı senaryolar oluşturulmuştur. Belirlenen bağlantı noktaları için örnek gösterim Şekil 6.9'da verilmiştir. TM'deki seri reaktörün kullanıldığı yerler D-5\D-10 şeklinde belirtilmiştir. Burada D-5, Durum 5 anlamına gelmektedir. Kısa devre analiz tablolarında her durum için açıklama yapılmıştır. Empedansı 25Ω olarak belirlenen seri reaktörün TM'de farklı noktalara bağlanması durumunda 154 kV baralarda meydana gelen 3 faz kısa devre akım değerleri Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.9 Kuplajın kapalı olması durumunda seri reaktörün TM içindeki konumları

Çizelge 6.2 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV A barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı

Durum	Seri Reaktör Yeri	154 kV B Barasından Gelen Kısa Devre Akım Katkısı (kA)	154 kV A Barası Kısa Devre Akımı (kA)	Reaktör Sayısı
1	Reaktör Yok	27.091	48.799	0
2	Baralar Arasında	3.016	25.837	1
3	TR-1 çıkışında	27.445	45.559	1
4	TR-1, TR-2 çıkışında	27.859	41.770	2
5	TR-1, TR-2, TR-3 çıkışında	23.406	37.602	3
6	Ambarlı A-1 fiderinde	27.091	46.078	1
7	Ambarlı A-2 fiderinde	27.091	46.078	1
8	Ambarlı B-1 fiderinde	24.739	46.448	1
9	Ambarlı B-2 fiderinde	24.739	46.448	1
10	Y.Bosna 1 fiderinde	24.440	46.148	1
11	Y.Bosna 2 fiderinde	24.440	46.148	1
12	B.Çekmece 1 fiderinde	26.585	48.294	1
13	B.Çekmece 2 fiderinde	26.585	48.294	1

*154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı olduğu kabul edilmiştir.
*TR: Transformatör

İncelenen durumların şekil üzerinde belirtmek için, Durum 6 (D-6), Durum 10 (D-10), Durum 11 (D-11) olarak Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Diğer durumları incelerken de seri reaktörler ilgili noktalara bağlanarak analizler yapılmıştır.

Çizelge 6.3 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV B barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı

Durum	Seri Reaktör Yeri	154 kV A Barasından Gelen Kısa Devre Akım Katkısı (kA)	154 kV B Barası Kısa Devre Akımı (kA)	Reaktör Sayısı
1	Reaktör Yok	21.711	48.799	0
2	Baralar Arasında	2.905	31.065	1
3	TR-1 çıkışında	18.115	45.559	1
4	TR-1, TR-2 çıkışında	13.911	41.770	2
5	TR-1, TR-2, TR-3 çıkışında	14.196	37.602	3
6	Ambarlı A-1 fiderinde	18.992	46.078	1
7	Ambarlı A-2 fiderinde	18.992	46.078	1
8	Ambarlı B-1 fiderinde	21.711	46.448	1
9	Ambarlı B-2 fiderinde	21.711	46.448	1
10	Y.Bosna 1 fiderinde	21.711	46.148	1
11	Y.Bosna 2 fiderinde	21.711	46.148	1
12	B.Çekmece 1 fiderinde	21.711	48.294	1
13	B.Çekmece 2 fiderinde	21.711	48.294	1

*154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı olduğu kabul edilmiştir.

154 kV A ve 154 kV B baralarında yapılan kısa devre analiz sonuçları incelendiğinde seri reaktör için en uygun yerin baralar arası olduğu görülmektedir. Baralar arasındaki reaktör her iki barada meydana gelen kısa devre durumunda kuplaj üzerinden gelen kısa devre katkısını azaltmaktadır. Bunun sonucunda kuplajın kapalı olmasına rağmen 154 kV barasının kısa devre akımı 31.5kA'lik sınır değerin altında kalmıştır. Baralar arası reaktör kullanmak kısa devre akımını düşürürken aynı zamanda sistem arz güvenilirliğini de korumuş olmaktadır.

154 kV baralar arasındaki kuplajın açık olması durumunda da bara kısa devre akım değerleri sınır değerin üstüne çıkabilir. İkitelli TM de baraların açık olması durumunda 154 kV bara kısa devre akımları sınır değer altındadır. Ancak, artan enerji talebini karşılamak için sistem her geçen gün hızla gelişmektedir. Bunun sonucunda bara kısa devre akım değerleri de hızla yükselmektedir. Bu sebepten dolayı 154 kV baralar arasındaki kuplajın açık olması durumunda seri reaktörün TM içinde farklı noktalara

seri bağlanması sonucunda 154 kV A ve 154 kV B baralarındaki 3 faz kısa devre akım değişimleri Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.4 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV A barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı

Durum	Seri Reaktör Yeri	154 kV A Barası Kısa Devre Akımı (kA)	Reaktör Sayısı
1	Reaktör Yok	22.961	1
2	TR-1 çıkışında	19.002	1
3	TR-1, TR-2 çıkışında	14.360	2
4	Ambarlı A-1 fiderinde	20.243	1
5	Ambarlı A-2 fiderinde	20.243	1

*154 kV baralar arasındaki kuplajın açık olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 6.5 Seri reaktörün TM içindeki yerine bağlı olarak 154 kV B barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımı

Durum	Seri Reaktör Yeri	154 kV B Barası Kısa Devre Akımı (kA)	Reaktör Sayısı
1	Reaktör Yok	27.952	1
2	TR-3 çıkışında	23.517	1
3	Ambarlı B-1 fiderinde	25.601	1
4	Ambarlı B-2 fiderinde	25.601	1
5	Y.Bosna 1 fiderinde	25.301	1
6	Y.Bosna 2 fiderinde	25.301	1
7	B.Çekmece 1 fiderinde	27.447	1
8	B.Çekmece 2 fiderinde	27.447	1

*154 kV baralar arasındaki kuplajın açık olduğu kabul edilmiştir.

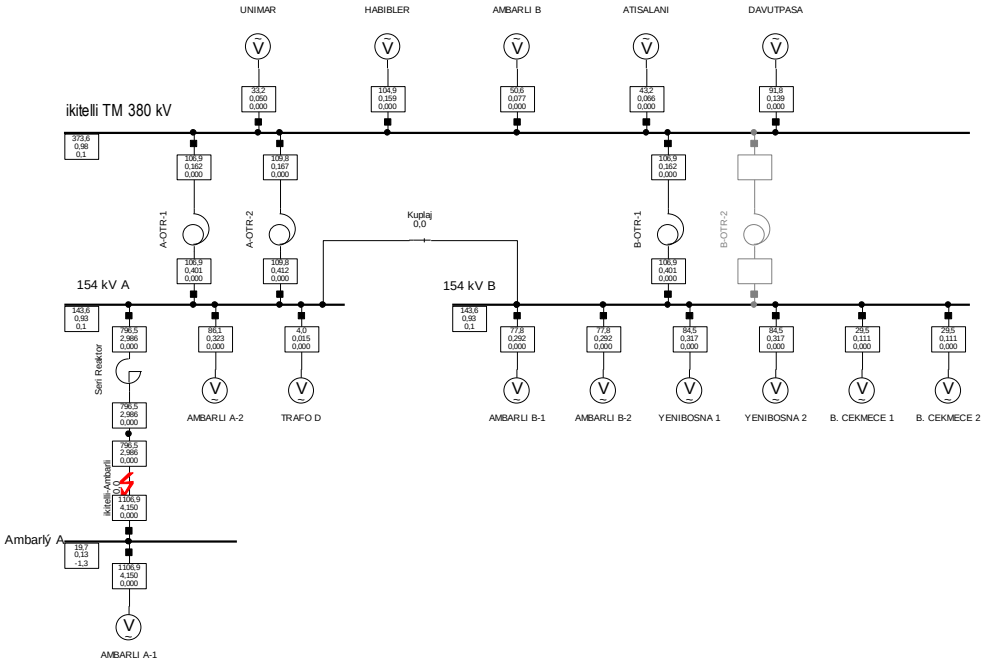
154 kV baralar arasındaki kuplajın açık olması durumunda 154 kV A ve 154 kV B barasında yapılan kısa devre analiz sonuçları incelendiğinde kısa devre akımının en fazla sınırlandırıldığı yerlerin transformatör çıkışları olduğu görülmektedir. Bara ayırmanın zorunlu olduğu transformatör merkezlerinde baralar arasında seri reaktör konulamıyorsa ve baralar bağımsız olarak işletilecek ise baralardaki kısa devre

akımlarını azaltmak için seri reaktörün transformatör çıkışlarına konulması uygun olacaktır.

Bara arızalarında meydana gelen kısa devre akımını sınırlamak için TM içinde farklı noktalara seri reaktör bağlanmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde iletim hattına bağlanan seri reaktörlerin arıza akımı sınırlama konusunda etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi arızanın TM içinde olması ve ilgili iletim hattı üzerinden TM'ye akan kısa devre akım katkısının çok az olmasıdır. Arızanın iletim hattının herhangi bir yerinde olması durumunda, iletim hattına seri olarak bağlı reaktörün arıza akımını sınırlama üzerindeki etkiliği daha fazla olacaktır.

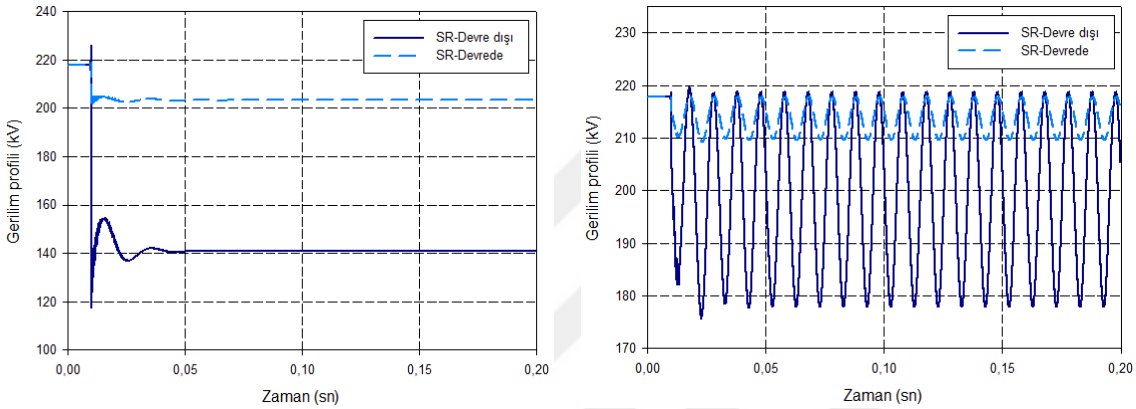
6.3.2 İletim Hattı Arızalarında Seri Reaktör Kullanımının Etkileri

Önceki bölümlerde TM içinde bulunan baralarda kısa devre olması durumda meydana gelen kısa devre akımları ve bu akımları sınırlamak için birtakım yöntemlerin etkinlikleri olarak incelenmiştir. Fider başına seri bağlı reaktörün TM içindeki barada yapılan kısa devre akımını sınırlama konusunda etkisinin yeterli olmadığı belirtilmiştir. Ancak, arıza yeri olarak TM içindeki bara değil de, seri reaktörün bağlı olduğu hattın ortası seçildiğinde sonuçlar değişmektedir. İletim hattı ortasında yapılacak arıza senaryosu için kullanılacak devre topolojisi Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10 Seri reaktör hat uygulaması eşdeğer devre topolojisi

Analizlerin yapılacağı hat olarak İkitelli-Ambarlı A-1 hattı seçilmiştir. Kuplajın kapalı olduğu varsayılarak ikitelli-ambarlı iletim hattının ortasından 3 faz ve 1 faz kısa devre arızaları yapılmıştır. Yapılan arızalar sonucunda seri reaktörün bağlı olduğu baradaki gerilim ve arıza noktasındaki kısa devre akımı değişimi incelenmiştir. Seri reaktörün devre de olması ve olmaması durumları için analizler tekrarlanarak seri reaktörün sistem üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Seri reaktörün bağlı olduğu baranın 3 faz ve 1 faz-toprak arızları sonucunda, gerilim fazlar arası tepe değerinin profil değişimi Şekil 6.11'de verilmiştir.

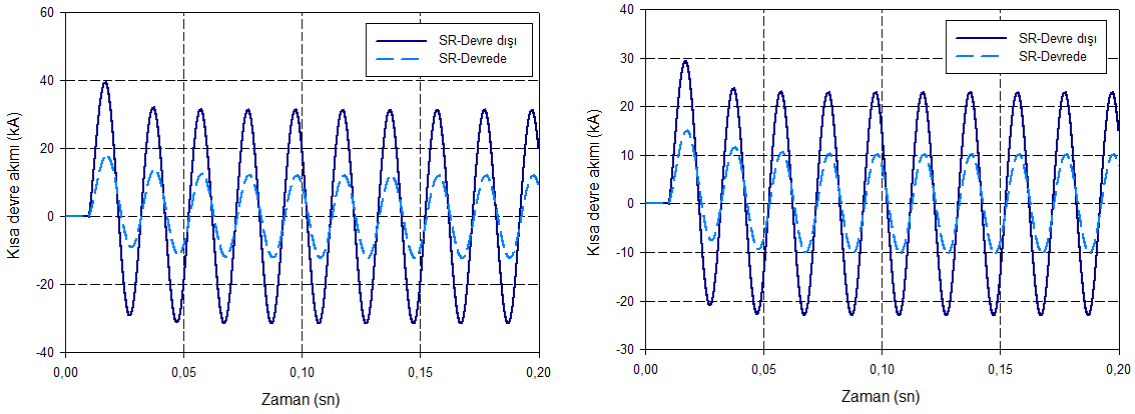


(a) (b)

Şekil 6.11 Seri reaktörün (SR) bağlı olduğu baranın gerilim profili değişimi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası

Şekil 6.11'de görüldüğü gibi her iki arıza durumu içinde arızanın meydana gelmesi ile barada bir gerilim düşümü oluşmaktadır. Seri reaktörün devreye girmesi ile barada meydana gelen gerilim düşümü miktarı azalmıştır.

Seri reaktörün iletim hattına seri bağlanması sonucunda yük akımı sürekli olarak reaktör üzerinden akacaktır. Bunun sonucu olarak enerji kaybı meydana gelecektir. Ayrıca kararlılık ve gerilim düşümü üzerinde de olumsuz etkileri mevcuttur. Bütün bu olumsuz etkilerinin yanında iletim hattında meydana gelen arıza akımlarını sınırlamak için geleneksel arıza akım yöntemleri içinde etkili bir yöntemdir. İkitelli-Ambarlı A-1 iletim hattının ortasında meydana gelen 3 faz ve 1 faz-toprak kısa devre arıza akımlarına seri reaktörün etkisi Şekil 6.12'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.12 Seri Reaktörün (SR) kısa devre arıza akımı üzerindeki etkisi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası

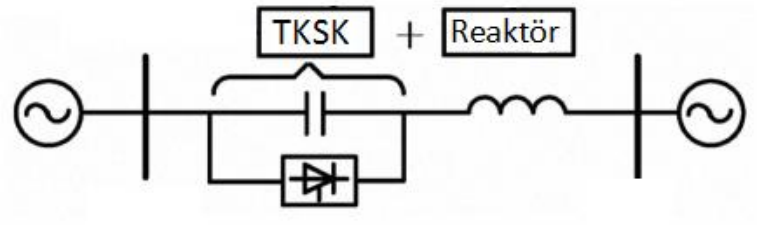
6.4 Seri Rezonans Tipli KHAAS

Seri reaktör ile ilgili uygulamalar önceki bölümlerde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Seri reaktörün arıza akımlarını sınırlama konusunda etkili bir yöntem olmasının yanında sistem üzerinde olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Seri reaktörün sistem üzerindeki olumsuz yöntemleri ortadan kaldırmak için modern arıza akım sınırlama yöntemlerinden biri olan seri rezonans tipli KHAAS yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem Tristör Korumalı Seri Kompanzasyon (TKSK) sistemi ile seri reaktör uygulamasının birleşiminden oluşmaktadır.

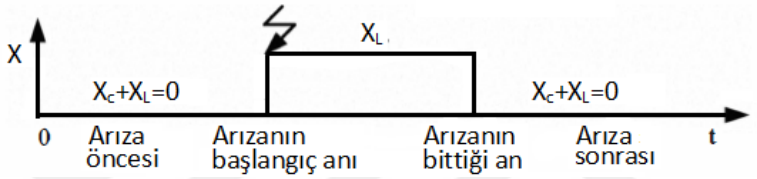
Seri kompanzasyon sistemi hatta seri bağlanarak hattın endüktansını kompanze etmekte ve hattın sanal olarak kısalmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, iletim sisteminde transfer edilen aktif güç ve sistem kararlılığı artırılır. Seri kompanzasyonlu hatta kısa devre olması durumunda seri kapasitör üzerinde aşırı gerilim oluşur. Bu gerilimden seri kapasitörün zarar görmemesi için atlama aralığı (spark gap)ve Metal Oksit Varistör (MOV) kullanılmaktadır. Ancak, gelişen teknoloji ile birlikte seri kapsitörlerin aşırı gerilimlerden korunması için yarı iletken teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. Yarı iletken teknolojisin kolay kontrol edilmesinden dolayı seri kapasitörün devreye alınıp çıkartılması kolayca kontrol edilmektedir. Yarı iletken elemanlar 110 kA maksimum akımda çalışabilmekte ve çok hızlı bir şekilde soğumaktadırlar [58].

Normal işletme durumunda reaktör ve kapasitör seri rezonans durumda olduğundan dolayı sistem üzerinde herhangi bir gerilim düşümü, enerji kaybı ve kararlılık

üzerindeki olumsuz etkileri bulunmamaktadır. Arıza meydana geldiği zaman kapasitöre paralel bağlı yarı iletken iletim geçerek kapasitörü devre dışı bırakmakta ve arıza akımının sadece reaktör üzerinden akmasını sağlayarak arıza akımını sınırlanmaktadır [58]. Seri rezonans tipli KHAAS genel yapısı Şekil 6.13'de ve çalışma karakteristiği ise Şekil 6.14'de verilmiştir.



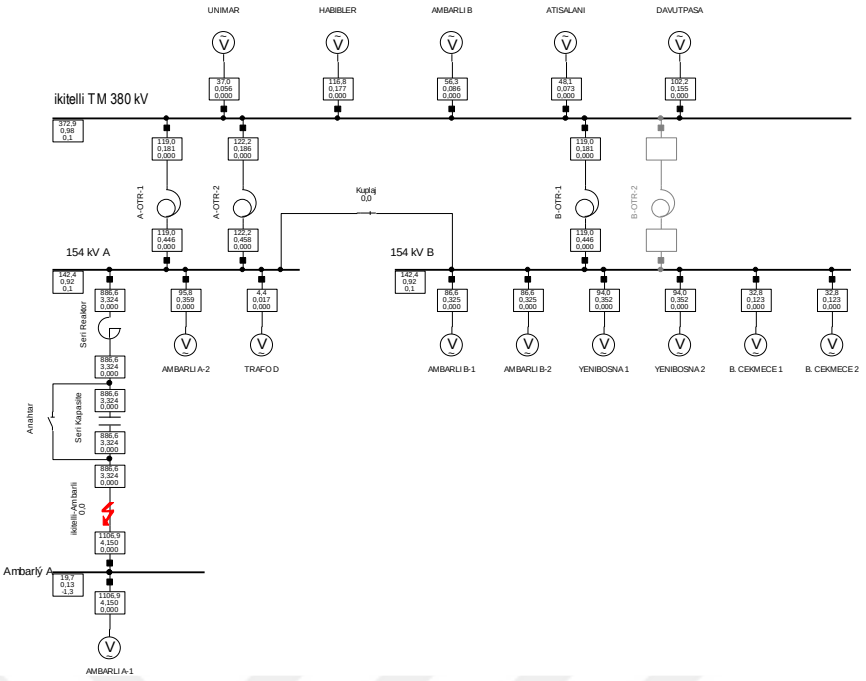
Şekil 6.13 Seri rezonans tipli KHAAS yapısı [59]



Şekil 6.14 Seri rezonans tipli KHAAS çalışma karekteristiği [59]

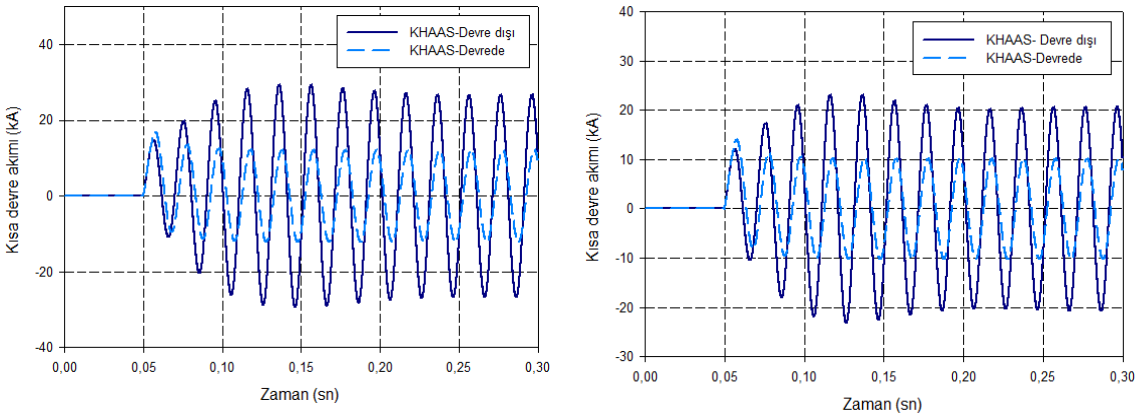
Seri rezonans tipli KHAAS için iki önemli parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Birincisi, kısa devre akım sınır değeri (bu değer yaklaşık olarak 1.5xIn (In hattın akım taşıma kapasitesi) veya 2xIn seçilir) hat akımının bu değeri geçmesi durumunda yarı iletken iletime geçecektir. İkinci parametre ise hat akımının yükselme hızı yanı di/dt (di/dt yaklaşık olarak 0.2pu/ms olarak seçilir) dir [59]. Bu iki parametrenin doğru bir şekilde ayarlanması seri rezonans tipli KHAAS'nın daha iyi sonuç vermesini sağlamaktadır.

Seri rezonans tipli KHAAS İkitelli-Ambarlı A-1 iletim hattına seri bağlanarak hattın ortasında oluşturulan 3 faz ve 1 faz-toprak kısa devre akımlarını sınırlama konusundaki etkinliği incelenmiştir. Analizde kullanılan eşdeğer devre topolojisi Şekil 6.15'de verilmiştir.



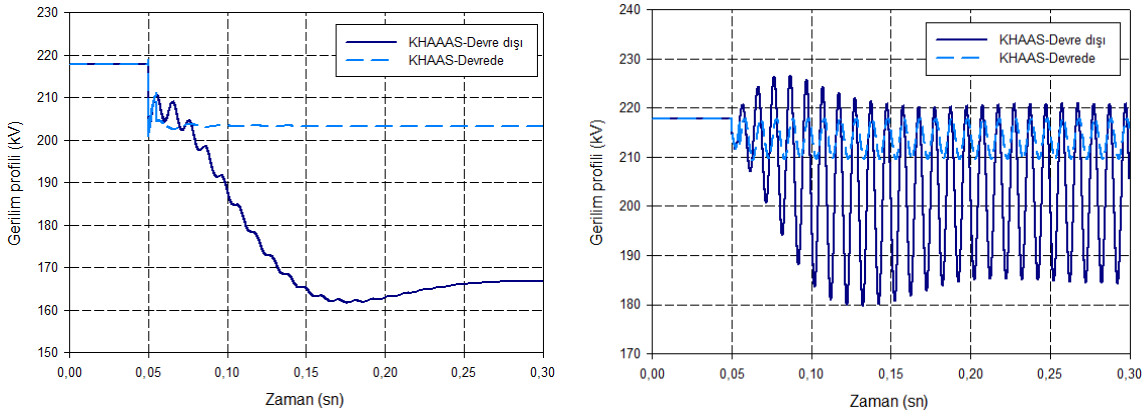
Şekil 6.15 Seri rezonans tipli KHAAS uygulama devre topolojisi

Analizlerde kısa devre eşik değeri olarak 2xIn alınmış ve 154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı olduğu varsayılmıştır. Kısa devre akımının eşik değeri aşması ile birlikte yarı iletken elemanın iletime geçerek seri kapasitörü devre dışı bırakılması ve seri reaktör ile arıza akımının sınırlandırılması sağlanmıştır.3 faz ve 1 faz-toprak kısa devre analiz sonuçları Şekil 6.16'de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde seri rezonans tipli KHAAS'nın arıza akımlarını başarılı bir şekilde sınırladığı görülmektedir. Ayrıca, 154 kV barada meydana gelen gerilim düşümü de azalmıştır. 154 kV barada meydana gelen gerilim profili Şekil 6.17'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.16 Seri rezonans tipli KHAAS'ın arıza akımı üzerindeki etkisi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası



(a) (b)

Şekil 6.17 Seri rezonans tipli KHAAS'ın bağlı olduğu baranın gerilim değişimi (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası

Seri rezonans tipli KHAAS kullanımı sırasında aşağıdaki konulara da dikkat edilmesi gerekmektedir [58][59];

- ✓ Devre elemanlarının değerleri seçilirken akım sınırlama miktarının yanında hattın kompanzasyon miktarının da %80'in altında kalmasına dikkat edilmedir.
- ✓ Reaktörün faklı değerlerinin geçici karalılık üzerindeki etkileri analiz edilmelidir.
- ✓ AAS'nın optimum yeri analizler sonucunda belirlenmelidir.
- ✓ Özel koruma sistemleri ve mesafe koruma röleleri üzerinde olumsuz etkileri incelenmelidir.

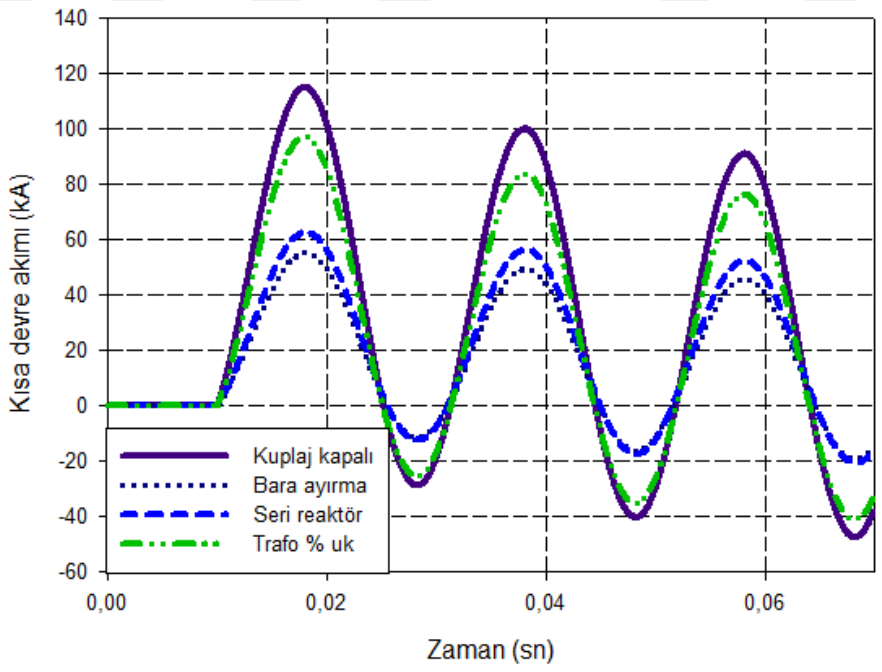
6.5 Farklı AAS Yöntemlerinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Bu tez çalışması kapsamında 4 farklı arıza akım sınırlama yöntemi incelenmiştir. Her bir yöntemin arıza akımlarını sınırlama konusunda farklı çözümler üretmesinin yanında sistem üzerinde de farklı olumsuz etkileri olabilmektedir. Çalışmada kullanılan yöntemlerin sadece arıza akım sınırlama etkinlikleri incelenmiştir. Tez çalışmasında kullanılan AAS yöntemleri;

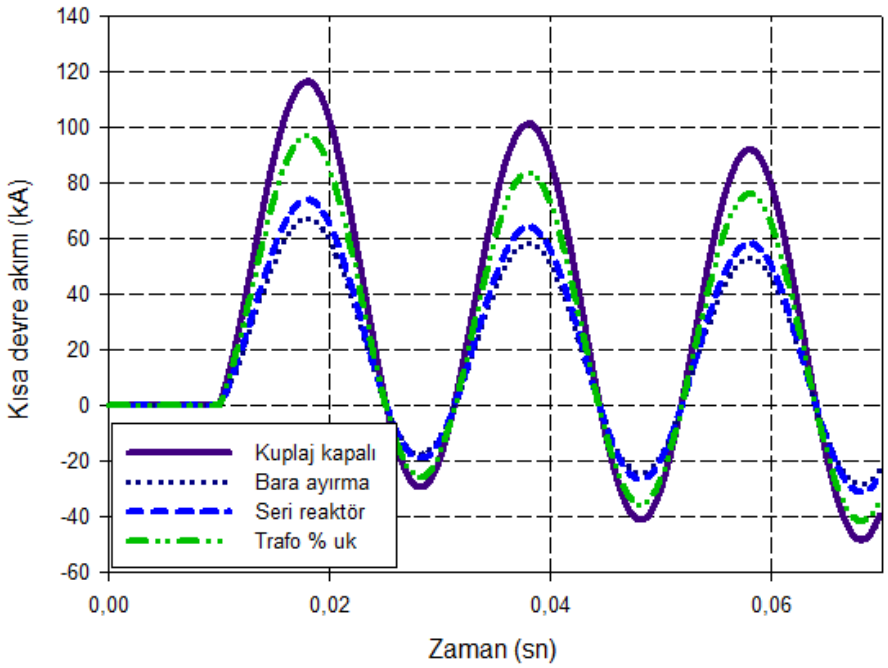
- ✓ Bara ayırma,
- ✓ Transformatör % uk değeri artırma,
- ✓ Seri reaktör kullanma,
- ✓ Seri rezonans tipli KHAAS kullanama,

olarak belirlenmiştir. TM içindeki barada meydana gelen arızalarda kısa devre akımlarını sınırlamak için bara ayırma, transformatör % uk değeri artırma ve seri reaktör uygulama yöntemlerinin etkinlikleri incelenmiştir. Ayrıca iletim hattının ortasına meydana gelen arızalarda kısa devre akımını sınırlamak için seri reaktör, seri rezonans tipli KHAAS yöntemlerinin kısa devre akımı sınırlama üzerindeki etkinlikleri incelenmiştir.

Farklı AAS yöntemlerinin arıza akımı azaltma performanslarının arızanın 154 kV A barasında ve 154 kV B barasında 3 faz kısa devre arızası meydana gelmesi durumu için incelenecektir. Birinci durumda (Durum-1) kuplajın kapalı olduğu varsayılıp en kötü durum için kısa devre akımı belirlenmiştir. İkinci durumda (Durum-2) 154 kV baralar arasındaki kuplaj açılarak bara bölme işlemi yapılmış, 154 kV A ve 154 kV B barasının kısa devre akım değişimi incelenmiştir. Üçüncü durumda (Durum-3) 154 kV baralar arası kuplajın kapalı olduğu varsayımı ile 154 kV baraları besleyen tüm transformatörlerin % uk değerleri yaklaşık olarak 12 den 25 çıkarılmıştır. Dördüncü durumda (Durum-4) 25 Ω değerinde seri reaktör 154 kV baralar arasına bağlanmıştır. Aynı arıza için 4 faklı kısa devre akım değişimleri 154 kV A barası için Şekil 6.18'de 154 kV B barası için Şekil 6.19'daverilmiştir.



Şekil 6.18 154 kV A barası için arıza akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.19 154 kV B barası için arıza akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması

Analiz sonuçları incelendiğinde bara arızalarında akım sınırlama konusunda en etkili yöntemin bara ayırma yöntemi olduğu görülmektedir. Ancak bara ayırma yönteminin güvenilirlik üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Diğer AAS yöntemleri incelendiğinde baralar arası seri reaktör uygulamasının da arıza akım sınırlama konusunda etkili bir yöntem olduğu görülmektedir. Ancak transformatör % uk değerinin 25 çıkarılmasına rağmen kısa devre akım seviyesi 31.5 kA'lik sınır değerin üstünde kalığı için bu TM için etkili bir yöntem olmadığı görülmektedir. Baralar arasında kullanılan seri reaktörün sürekli bir yük akımına maruz kalmadığı için seri reaktörün kayıp ve sistem kararlılığı üzerindeki olumuz etkileri ortadan kalkmaktadır. Bu sebepten dolayı arıza akım sınırlama konusunda en iyi yöntem bara ayırma olsada sistem güvenilirliği kayıp ve kararlılık gibi konular da göz önüne alındığında baralar arası seri reaktör uygulamasının daha uygun bir yöntem olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre akımlarını sınırlamak için kullanılan yöntemler ve bu alanda yapılan uygulamalar incelenmiştir. Kısa devre akımlarını sınırlamak için kullanılan yöntemler iki başlık altında toplanmıştır. Bunlar geleneksel AAS yöntemleri ve modern AAS yöntemleridir.

Analizler için pilot bölge olarak İkitelli TM seçilmiştir. Benzetim modelleri Digsilent PowerFactory analiz programında oluşturulmuştur. Geleneksel AAS yöntemlerinin hala kullanılıyor olması sebebiyle öncelikle bu yöntemlerle analizler yapılmıştır. Ayrıca, modern ASS'lerden seri rezonans tipli KHAAS'nin arıza akımı üzerindeki etkileri de analiz edilerek sonuçlar sunulmuştur. Günümüzde Modern ASS'ler OG seviyesinde endüstriyel olarak üretilip kullanılmaktadır. YG seviyesindeki uygulamalar ise genellikle proje bazlı olan prototip çalışmalarıdır.

Geleneksel AAS analiz sonuçları incelendiğinde bara ayırma sonucunda arıza akımlarında ciddi bir azalış görülmüştür. Ancak, bu yöntemin sistem arz güvenilirliğini azalttığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Transformatör % uk değerini artırmak ve seri reaktör kullanmak da arıza akımlarını azaltmaktadır. İki yöntemde de sistemin empedansının artmasından dolayı karlılık problemleri ve ek güç kayıpları meydana gelecektir. Her yöntemin arıza akımı sınırlama miktarı ve şebeke üzerindeki negatif etkileri farklıdır.

Gerçekleştirilen tez çalışması sonucunda, seçilen pilot bölgede yapılan geleneksel ASS uygulamalarında, arıza akımı sınırlama açısından en etkili yöntemin bara ayırma yöntemi olduğu tespit edilmiştir. Fakat, bara ayırma yönteminin sistem güvenilirliği üzerindeki negatif etkisi dikkate alındığında, arıza akımını yeterince sınırlayan baralar arası seri reaktör kullanımı daha uygun bir çözüm olarak gözükmektedir.

Arıza akımları sonucunda sistemde meydana gelen hasarlar göz önüne alındığında arıza akımlarını sınırlamak için her bölge için özel analizler yapılması gerekmektedir. Bunun sonucunda hem arıza akımlarını azaltacak hem de sistem güvenilirliğini bozmayacak optimum yöntemler belirlenebilecektir. Modern AAS'ler normal işletme koşullarında sıfır empedans arıza durumunda yüksek empedans göstermektedir. Bu sayede, arıza akımlarını sınırlarken normal işletme durumda sistem üzerinde negatif bir etki oluşturmamaktadırlar.

AAS yöntemlerinin kullanılmaları durumunda sistem empedansı ve topolojisi değişmektedir. Bu değişiklerin sistem üzerindeki etkisinin incelenmesi sistemin güvenirliliği ve kararlılığı açısından önem arz etmektedir. Sonuçta,

- ✓ Geçici hal kararlılığı,
- ✓ Koruma sistemi,
- ✓ Geçici hal cevabı,
- ✓ Güç kalitesi (gerilim düşümü, harmonik vb.),
- ✓ Termal kayıplar,

konularında yapılacak analizlerin tümünün birlikte incelenmesi en doğru sonuçların alınmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKÇA

[1] T.C. Resmi Gazete, Elektrik Şebeke Yönetmeliği, (29786), 30.07.2016, 1-220.

[2] CİGRE, (2012). Application and Feasibility of Fault Current Limiters in Power Systems, Working Group A3.23, ISBN: 978-2-85873-189-3, 497.

[3] Yadav, S., Choudhary, G. K. ve Mandal, R. K., (2014). ”Review on Fault Current Limiters”, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) 3(4): 1595-1603.

[4] Noe, M. ve Steurer, M., (2007). “High Temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concept, Applications and Develepment Status”, IOPSCIENCE Supercond. Sci Technol, 20: 15-29.

[5] Bayram, M., (1987).Şebeke Arızaları ve Kısa Devre Hesaplamaları,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] Demir, İ., (2012).154kV’Luk Van Trafo Merkesinde Kısa Devre Akımlarının Analizi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.

[7] Özdemir, A., (1997).EMTP Yardımıyla Kısa Devre Akımının Dinamik Simülasyonu,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] Noblat, B., Dumas, F. ve Pounlain, C. “Calculation of Short Circuit Currents”,Scheneider Electric, Cahier Technique No:158.

[9] Kaşıkçı, İ., (2002).Elektrik Tesislerinde Kısa Devre Hesaplamaları ve Uygulamaları IEC 60909, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[10] Glover, J. D., Sarma, M. S. ve Overbye T. J., (2002). Power System Analysis and Design, Fourth Edition, Global Engineering: Christopher M. Shortt, USA.

[11] Saadat, H., (1999). Power System Analysis, Second Edition, McGraw-Hill, Boston.

[12] Morandiand, A. ve Imparato, S., (2009). “A DC Operating Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiter For AC Applications”, Superconducting Science and Technology, 22(4): 1401-1407.

[13] Franke, S. A., (2012). Fault Current Control in The Transmission Network, Master of Science Thesis, Delft University of Technology Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Netherlands.

[14] Leung, E., (2000). “Superconducting Fault Current Limiters”, IEEE Power Engineering Review, 20(8): 15-18.

[15] Verma, M., (2009). A Comprehensive Overview Behavioral Model and Simulation of a Foult Current Limiter, Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

[16] Berry, J. ve Murdoch, N., (2015). “Standartised Connections and the Economic Benefist of Fault Current Limiters on Distribution Networks”, 23td International Conference on Electricity Distribution, 15-18 June 2015, Lyon.

[17] Nasiri, A. ve Barahmandpour, H., (2006). “Fault Current Limitation of Ramin Poer Plant”, 21st International Power System Conference (PSC), 2006 Tehran, pp 1640-1646.

[18] IEC 60076-6, (2007). Power Transformers- Part 18: Measurement of Frequency Response, IEC, Edition 1, Switzerland.

[19] Hilkar, Hava Nüveli Nötr Topraklama Reaktörleri, http://www.hilkar.com/tr/notrtopraklamareaktorleri.html, 09 Mayıs 2016.

[20] Alstom, Air-Core Neutral Grounding Reaktor, www.grid.alstom.com/contactcentre, 15 Haziran 2016.

[21] Hartung, K. H., (2002). “I_s–Limiter, The Solution for High Shor-Circuit Current Applications”, ABB Calor Emag.

[22] ABB, (2014). I_s–Limiter The World Fastest Limiting and Switching Device, Germany.

[23] Hartung, K. H. ve Grafe, V., (2011). “Calculation of the Tripping Value for Applications of I_s-Limiters”, ABB AG Calor Emag Medium Voltage Products, July2011.

[24] Wu, X., Mutale, J., Jenkins, N. ve Strbac, G., (2003).”An İnvestigation of Network Spliting for Fault Level Reduction”, Tyndall Centre for Climate Change Research Project, Working Paper 25.

[25] Elimsan, Orta Gerilim Sigortalar Kataloğu, www.elimsan.com/urunler/sigortalar, 20 Mayıs 2016.

[26] Kaya, A., (2013). Elektrik Tesisleri, 1. Baskı, TEİAŞ, Ankara.

[27] Seyedi, H. ve Tabei, B., (2012). “Approptiate Placement of Fault Current Limting Reactors in Diiffrent HV Substation Arrangement”, Scientific Research, 3: 252-262.

[28] Wanmin, F. ve Yanli, Z., (2006). “A Novel IGBT-based Half Controlled Brigde Type Fault Current Limiter”, Power Electronics and Moton Control, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International, 14-16 August 2006, Shanghai.

[29] Warzoha, R. ve Fleischer, A. S., (2001). “Thermal Management of High Density Power Elecctronics Modules Using Deielectric Mineral Oil With Applications in the Electric Ulility Field for Smart Grid Protection”, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 3(4): 8-10.

[30] Tang, G. ve Iravani, M. R., (2005). "Application of a Fault Current Limiter to Minimize Distributed Generation Impact on Coordinated Relay Protection", Presented at the International Conference on Power Systems Transients, 19-23 June 2005, Canada.

[31] Gupta, V., Trivedi, U. C. ve Buch, N. J., (2010). "Solid State Electronic Fault Current Limiter to Limit the Fault Current in Power System", NPEC, 4: 1-7.

[32] Karady. G. G., (1992). "Principles of Fault Current Limitation by a Resonant LC Circuit", IEEE Proceedings C – Generation, Transmission and Distribution, 139(1): 1-6.

[33] Chen, S., (2013). A Non-Superconducting Fault Current Limiter (NSFCL), Degree of Doctor of Philosophy, Northeastern University The Departmant of Electrical and Computer Engineering, Boston, Massachusetts.

[34] Elavarasi, R. ve Saravanan, P., (2014). "Impact of Distributed Generation on Distribution Systems and Its Protection", Indian Journal of Science and Technology, 7(7): 85-90.

[35] Çakal, G., (2012). Dağıtılmış Üretime Sahip Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Arıza Akımı Sınırlayıcıların ve Yerleşim Yerlerinin Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[36] Fereidouni, A. R., Vahidi, B. T., Mehr, H. ve Doiran, M. G., (2011). "Enhancement of Power System Transient Stability and Power Quality Using a Novel Solid-State Fault Current Limiter", Journal of Electrical Engineering & Technology, 6(4): 474-483.

[37] Lawal, O. K., Umar, I., Abubakar, B. ve Mahmood, M. K., (2014). "Perfomance Analysis of Surge Current Protection Using Superconductors", European Scientific Journal, 10(19): 183-192.

[38] Mehairjan, V. S., Popov, M., Geschiere, A. ve Kling, W. L., (2011). "Transient Analysis of a 150 kV Fault Current Limiting High Temperature Superconducting Cable", International Conference on Power Systems Transients, 14-17 June 2011, Netherlands.

[39] Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q. ve Chu, C. W., (1987). "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure", 58: 908-910.

[40] Mohana, U. M. ve Suganthi, S. T., (2012). "Performance Analysis of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Single Phase and Three Phase Systems", International Journal of Communications and Engineering, 1(1): 56-61.

[41] Seminalsonly, Surge Current Protection Using Superconductor, www.seminalsonly.com, 11 Nisan 2016.

[42] Hong, H., Su, B., Niu, G. J., Cui, J. B., Tian, B., Li, Q., Wang, L. Z., Wang, Z. H., Zhang, K. ve Xin, Y., (2014). "Design Fabrication and Operation of the Cryogenic System for a 220 kV/300 MVA Saturated

Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Transactions on applied Superconductivity, 24(5): 89-95.

[43] EPRI, (2009). Superconducting Fault Current Limiter Technology, Yayın No: 1017793, California.

[44] Firouzi, M., Aslani, S., Gharehpetian, G. B. ve Jalilvand, A., (2012). "Effect of Superconducting Fault Currrent Limiters on Successful Interruption of Circuit Breakers", European Association fort he Development of Renewable Energies, Enviroment and Power Quality International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 28-30 March 2012, Spain.

[45] Janowski, T., Stryczewska, H. D., Kozak, S., Surdacki, P., Kucewicz, B. K., Wojtasiewicz, G., Kozak, J. ve Malinowski, H., (2013). "Bi-2223 and Bi 2212 Tubes for Small Fault Current Limiters", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14(2): 851-854.

[46] Wu, X., Mutale, J., Jenkins, N. ve Strbac, G., (2003). "An İnvestigation of Network Spliting for Fault Level Reduction", Tyndall Centre for Climate Change Research Project, Working Paper 25.

[47] Shi, J., Zou, J. ve He, J., (2000). "Triggered Vacuum Switch-Based Fault Current Limiter", IEEE Power Engineering Rewiev, 20: 51-53.

[48] Janowski, T., Kozak, S., Malinowski, H., Wojtasiewixz, G., Kucewicz, B. K. ve Kozak, J., (2002). "Properties Comparison of Superconducting Fault Current Limiters with Closed and Open Core", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 13(2): 2072-2075.

[49] Deo, P. R. ve Shah, T. P., (2011). "Ambient Temperature Fault Current Limiter For Electric Ship Power System", IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 10-13 April 2011, Alexandria.

[50] Alstom, Air-Core Reactor, www.tde.alstom.com, 5 Nisan 2016.

[51] Beddoes, A. J., (2001). "Likely Changes to Network Design as a Result of Significant Embedded Generation", Harwell Laboratory, Energy Technolgy, 4: 1-26.

[52] Trench, Reactors, www.trenchgroup.com, 5 Nisan 2016.

[53] Amon, J., Fernandez, P. C., Rose, E. H., Dajuz, A. ve Cartanheira, A., (2005). "Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation", International Conference on Power SystemsTransients , 19-23 June 2005, Canada.

[54] Geng, Z. X., Lin, X., Xu, J. Y. ve Tian, C., (2008). "Effects of Series Reactor on Short-circuit Current and Transient Recovery Voltage", International Conference on HighVoltage Engineering and Application, Chongqing, 9-12 November 2008, Canada.

[55] Chen, S., (2009). Network reduction in power system analyses, Master Project thesis, Department of Electrical Engineering in Technical Universityof Denmark, Denmark.

[56] TEİAŞ, (2014). Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı İşletme ve Kordinasyon Müdürlüğü, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların

ve Generatörlerin Elektriki Karaktersitikleri, Yayın No: SA_2014/1, Ankara.

[57] TEİAŞ, (2015). Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı İşletme ve Kordinasyon Müdürlüğü, 2015 Puant (Yaz) Yük Şartlarında Yük Akışı, Üç Faz Ve Faz Toprak Kısa Devre Etüdü, Yayın No: SE-2016/1, Ankara.

[58] Han, S., Mao, X. ve Chang, Y., (2010). "A Study on Modeling of High-Voltage Short Cirvuit Current Limiter in Electromechanical Transient Simulation", İnternational Conference on Power System Technology, 24-28 October 2010, China.

[59] Han, S., Mao, X. ve Chang, Y., (2010). "On Modeling of High-Voltage Short Circuit Current Limiter in East China Power Grid", Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July 2010. China.

EK-A

THEVENİN KAYNAK EMPEDANS HESABI

Güç sistemlerinde, EMT analizleri tüm şebeke modeli üzerinde değil, şebekenin belli bir kısmını içeren indirgenmiş şebeke modelleri üzerinde yapılmaktadır. Burada kritik nokta indirgeniş modelin, yapılacak çalışmanın nitelikleri göz önüne alındığında, tüm şebeke modeline kıyaslanabilir ve hatası kabul edilebilir olmasıdır. Benzetim çalışmaları bölümde literatürde kullanılan şebeke ingirdeme yöntemleri anlatılmıştır. Ancak bu tez kapsamında geçici durum analizindeki generatör salınmları ihmal edilerek, thevenin eşdeğer empedansı bulunarak modelleme yapılmıştır.

Bu bölümde örnek bir trafo merkezi dataları ile thevenin kaynak empedansının nasıl hesaplandığı ve elde edilen sonuçların doğruluğunun teyidi yapılacaktır. A Transformatör Merkezi (TM) ait 3 faz ve 1 faz kısa devre akım değerleri açıları ile birlikte Çizelge A.1'de verilmiştir.

Çizelge A.1 A TM kısa devre akım ve açı değerleri

TM	Gerilim (kV)	Üç faz arızası		Faz toprak arızası	
		Akım (kA)	Açı (derece)	Akım (kA)	Açı (derece)
A	380	15.15	-83.03	9.35	-76.18

Kısa devre hesaplamalarında simetrili bileşenler yönteminden de hatırlanacağı gibi 3 kısa devre akım hesabında sadece pozitif sıra empedansı kullanılmaktadır. 1 faz-toprak arızalarında ise pozitif sıra empedansı, negatif sıra empedansı ve sıfır sıra empedansı birbirine seri olarak bağlanmaktadır. 3 faz kısa devre akım ve açısı kullanılarak TM ait pozitif sıra empedansı hesaplanacaktır. Genel olarak pozitif sıra empedansı ile negatif sıra empedansı birbirine çok yakın değerler olduğu için tüm hesaplamalarda bu iki değer eşit kabul edilmiştir. 1 faz-toprak arıza akım ve açısı kullanılarak pozitif sıra

empedansı, negatif sıra empedansı ve sıfır sıra empedansının toplamı elde edilmektedir. Daha önce 3 faz kısa devre hesabından pozitif sıra empedansı hesaplanmıştı ve negatif sıra empedansınında pozitif sıra empedansına eşit olduğu kabul edilmişti. Bu kabul doğrultusunda 1 faz-toprak arıza akım ve açısı kullanılarak sıfır sıra empedansı hesaplanır.

V = 380 10^3 akim3F = 15.15 10^3 aci3F = -83.03 akim1F = 9.35 10^3 aci1F = -76.18

Thevenin kaynak empedans hesaplamaları MathCad ortamında yapılmıştır.

- ✓ Pozitif sıra empedansının hesaplanması

$$Z3F = \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{akim3F(\cos\left(aci3F * \frac{\pi}{180}\right) + i * \sin\left(aci3F * \frac{\pi}{180}\right))}$$

$Z3F = 2.258 + 14.304i$ (pozitif sıra empedansı = negatif sıra empedansı)

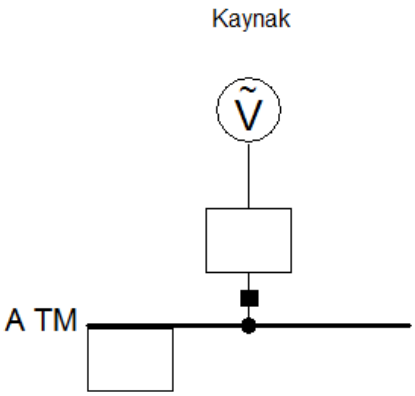
- ✓ Sıfır sıra empedansının hesaplanması

$$Z1F = \frac{\frac{V}{\sqrt{3}} * 3}{akim1F(\cos\left(aci1F * \frac{\pi}{180}\right) + i * \sin\left(aci1F * \frac{\pi}{180}\right))}$$

$Z1F = 16.815 + 68.356i$ (pozitif sıra empedansı, negatif sıra empedansı ve sıfır sıra empedansı toplamı)

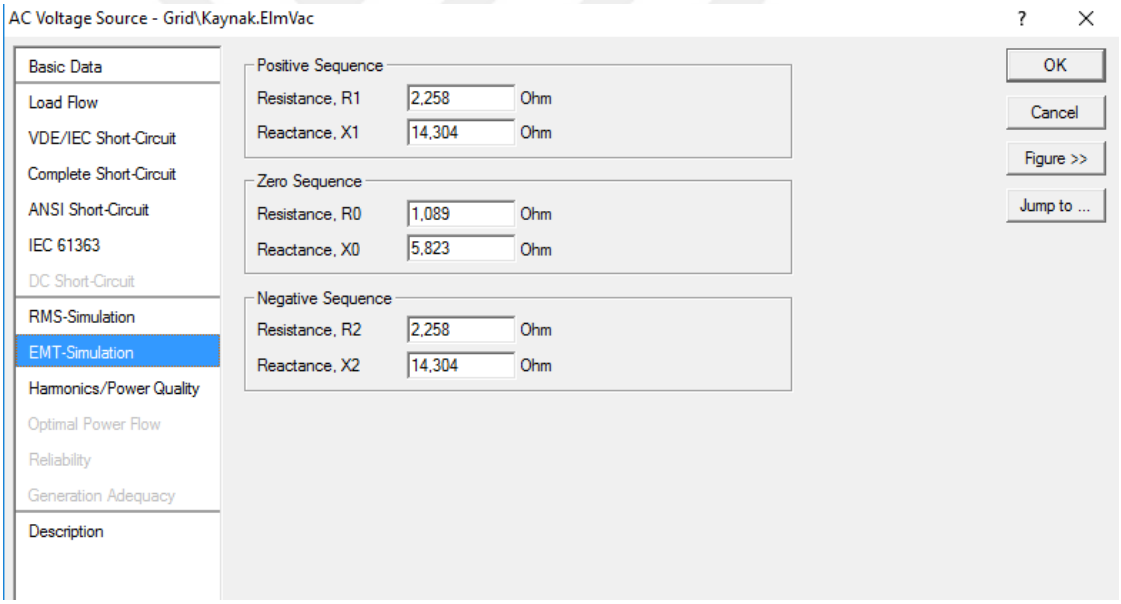
$Z_0 = Z1F - 2 * Z3F = 12.299 + 39.747i$ (sıfır sıra empedansı)

A TM'ne ait thevenin kaynak empedansları hesaplandıktan sonra elde edilen değerler Digsient PowerFactory programında kullanır. A TM bir adet gerilim kaynağı ve buna seri olarak bağlanmış thevenin empedansından oluşur. Şekil A.1'de A TM'ye ait eşdeğer thevenin devresi verilmiştir.



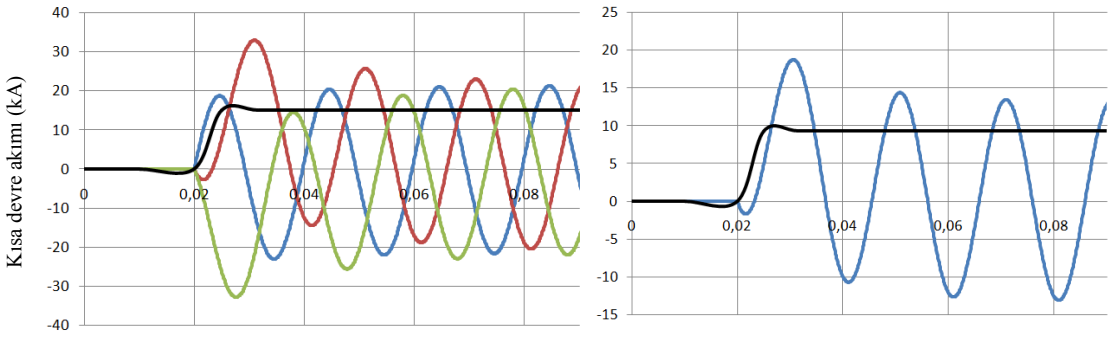
Şekil A.1 A TM'ye ait eşdeğer thevenin devresi

Yukarıda hesaplanan thevenin kaynak empedansları gerilim kaynağı içindeki ilgili bölüme Şekil A.2'deki gibi yazılmaktadır.



Şekil A.2 Thevenin kaynak empedansları

Digsilent PowerFactory analiz programında modellenen A TM de gerçekleştirilen 3 faz ve 1 faz-toprak kısa devre arızlarının sonuçları Şekil A.3'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil A.3 A TM'de meydana gelen kısa devre arıza sonuçları (a) 3 faz kısa devre arızası (b) 1 faz-toprak kısa devre arızası

Analiz sonuçları incelendiğinde modelleme işleminin doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

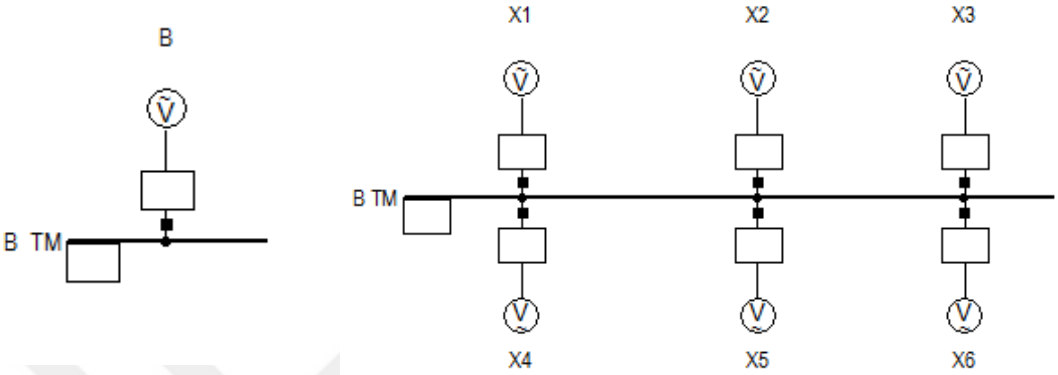
Yukarıda verilen örnekte bir trafo merkezinin toplam 3 faz ve 1 faz-toprak kısa devre akım ve açı değerlerinden yola çıkarak thevenin empedans değerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Ancak yapılacak analizlere göre TM bir kaynak ve empedans yerine, arıza durumunda ilgili TM'yi besleyen TM'lerinde modellenmesi gerekebilir. Bu durumda ilgili TM de kısa devre olması durumunda diğer TM'lerin ilgili baraya olan katkılarının belirlenmesi gerekmektedir.

Çizelge A.2'de B TM'ne ait toplam 3 faz ve faz-toprak kısa devre akımları ile birlikte B TM arıza olması durumunda diğer TM'lerinin kısa devre katkıları verilmiştir.

Çizelge A.2 B TM'yi besleyen TM'lere ait kısa devre akım katkıları

TM Adı	Gerilim (kV)	Üç faz arızası		Faz toprak arızası	
		Akım (kA)	Açı (derece)	Akım (kA)	Açı (derece)
B	380	14.09	-83.56	10.58	-78.92
X1	380	2.08	-80.50	1.74	-76.41
X2	380	2.42	-83.60	1.57	-79.00
X3	380	1.96	-81.50	1.62	-77.70
X4	380	2.39	-87.00	1.7	-82.80
X5	380	2.23	-85.00	1.75	-79.60
X6	380	1.80	-78.60	1.28	-72.30

Çizelge A.2'de kısa devre parametreleri kullanılarak B TM iki faklı şekilde modellenebilir. Birinci yöntem A TM'de yapıldığı gibi toplam kısa devre akım değeri kullanılarak bir adet gerilim kaynağı ve thevenin empedansı şeklinde modellenir. İkinci yöntemde ise B TM'yi besleyen TM'ler (X1, X2, …. X6) ayrı ayrı olarak modellenerek toplamda aynı kısa devre sonuçlarını verecektir.



(a) (b)

Şekil A.4 B TM eşdeğer devre modelleri

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nihat AKAY

Doğum Tarihi / Yeri : 28.12.1988 / Mersin

Yabancı Dil : İngilizce

E-posta : akay.nihat@hotmail.com

ÖGRENİM DURUMU

Derece	Alan	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Salim Yılmaz Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2016	TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü	Araştırmacı

YAYINLARI

Bildiri

1. Akay, N., Arıkan, O., Karacasu, Ö., (2016). “Güç Sistemlerinde Arıza Akım Sınırlama Yöntemlerinin İncelenmesi”, Elektrik, Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konfereansı, 01-03 Aralık 2016, Bursa.