

**T.C.
TUNCELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE ANALİZİ VE
UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Oktay YILMAZ**

Anabilim Dalı: Elektrik –Elektronik Mühendisliği

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Ali TUTAY**

HAZİRAN -2014

**T.C.
TUNCELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE ANALİZİ VE
UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Oktay YILMAZ
092103108**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 21.05.2014

Tezin Savunulduğu Tarih: 27.06.2014

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali TUTAY (İ.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK (T.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü)

HAZİRAN-2014

Oktay YILMAZ tarafından hazırlanan ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE ANALİZİ VE UYGULAMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali TUTAY

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Elektrik -Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. Bu tez, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK (T.Ü.)

Üye : Prof. Dr. Ali TUTAY (İ.Ü.)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü.)

Tarih : 27 Haziran 2014

ÖNSÖZ

Güç sistemlerinde sürekli ve emniyetli bir şekilde enerji üretim ve iletiminin sağlanabilmesi için, devre elemanlarının; kesicilerin ve koruyucu rölelerin koordinasyonu son derece önemlidir. Bu elemanların boyutlandırılmasında en önemli mühendislik hesaplarından biri kısa devre arıza analizidir.

Elektrik dağıtım sistemlerinde kısa devre analizi üzerine, yapmış olduğum bu çalışmayı yönlendiren, destek ve ilgisini gördüğüm değerli hocam sayın Prof. Dr. Ali TUTAY hocama, bu çalışmaya gelene kadar yaptıkları katkılardan dolayı sayın Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ hocama ve hiçbir yardımını esirgemeyen Fedaş Tunceli il Proje Tesis yöneticisi sayın H. Şafak GÜNEŞ ve Proje Tesis Mühendisi sayın İ. Behzat CANPOLAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Oktay YILMAZ
TUNCELİ-2014

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
KISALTMALAR.....	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	5
3.1. Kısa Devre.....	5
3.1.1. Kısa devrenin oluşma nedenleri	5
3.1.2. Kısa devre akımı	5
3.1.3. Kısa devre olayında geçen büyüklükler	9
3.1.3.1 Subtransiyent (başlangıç) kısa devre akımı (I'_k)	9
3.1.3.2. Transiyent (geçiş) kısa devre akımı (I'_k).....	10
3.1.3.3. Sürekli kısa devre akımı (I_k)	10
3.1.3.4. Darbe kısa devre akımı (I_p)	12
3.1.3.5. Kısa devre açma akımı (I_b).....	13
3.1.3.6. Kısa devre açma gücü (S_b).....	14
3.1.4. Generatörlere ait büyüklükler	14
3.1.4.1. Generatörün reaktansları	15
3.1.4.2. Generatörlerin zaman sabitleri.....	15
3.2. Tek Hat Diyagramı	17
3.3. Teçhizat Empedansları	20
3.3.2. Havai hatların empedansları	21
3.3.3. Bara empedansları	23
3.3.4. Transformator empedansları.....	25

3.3.4.1.	İki sargılı transformatör empedansları	25
3.3.4.2.	Üç sargılı transformatör empedansları.....	26
3.3.5.	Reaktans (Self) bobinleri –akım sınırlayıcı reaktörlerin empedanslar	27
3.3.6.	Senkron generatör empedansları	27
3.3.7.	Eşdeğer şebeke empedansları	28
3.4.	Eşdeğer Gerilim Kaynağı	30
3.5.	Simetrik Bileşenler	31
3.5.1.	Simetrik bileşenlerde “a” operatörü	33
3.5.2.	Simetrik bileşenlerde gerilimler	35
3.5.3.	Simetrik bileşenlerde akımlar	37
3.6.	Per – Unit Değerler	38
3.6.1.	Bir fazlı şebekelerde per-unit değerlerin hesaplanması	39
3.6.2.	Üç fazlı şebekelerde per-unit değerlerin hesaplanması.....	39
3.7.	Kısa Devre Hesapları.....	41
3.7.1.	Faz-toprak kısa devresi	42
3.7.2.	Faz-faz kısa devresi.....	45
3.7.3.	İki faz-toprak kısa devresi.....	48
3.7.4.	Üç fazlı simetrik kısa devre	51
3.7.5.	Generatörden doğrudan beslenen tesisat parçalarındaki kısa devre hesapları.....	53
3.7.6.	Generatörden bir transformatör üzerinden beslenen tesisat Parçalarındaki kısa devre hesapları.....	55
4.	TS EN 60909 KISADEVRE HESABININ TEORİK UYGULAMASI	58
4.1.	2.1- + dizin empedansların hesabı:	58
4.1.1.	Şebeke fideri	58
4.1.2.	Transformatörler	58
4.1.3.	Generatör:	59
4.1.4.	Asenkron motorlar.....	60
4.1.5.	Hatlar (Kablolar ve hava hatları):	61
4.2.	Sıfır dizin empedansların hesabı:	66
4.2.1.	Transformatörler:.....	66
4.2.2.	Hatlar (Kablolar ve hava hatları):	66

4.3.	F1 ve F2 kısıdevre yerlerindeki faz-toprak kısıdevre akımları için I''_{kl} ve i_{p1} kısıdevre akımlarının hesabı:.....	79
5.	ANSI/IEEE C37.010.1999 VE KISADEVRE HESABININ TEORİK UYGULAMASI.....	83
5.1.	İlk Çevrim Çalışması	83
5.2.	Kontak Ayırma Çalışması	84
5.3.	Zaman Gecikmeli Cihazlar İçin	85
5.4.	Kısa devre Hesabının Teorik Uygulaması	87
5.4.1	2.1- + dizin empedansların hesabı:	87
5.4.2	Şebeke fideri	87
5.4.3.	Transformatörler:	88
5.4.4.	Step-up transformatör T	88
5.4.5.	Generatör:	88
6.	TUNCELİ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ AG-YG ELEKTRİK PROJESİ	90
7.	SONUÇLAR	98
	KAYNAKLAR	100
	ÖZGEÇMİŞ.....	107

ÖZET

Güç sistemlerinde muhtemel hat parametrelerini kullanarak kısa devre hesaplamalarının yapılması; enerji iletim hatlarının iletken kesiti seçimi, devre elemanları ve kesicilerin uygun şekilde boyutlandırılması ve tesiste çalışacak olan personelin can güvenliğinin sağlanması; açısından bakıldığında kısa devre arıza analizi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada kısa devre olayının anlaşılması için, kısa devre hesaplamalarında geçen büyüklükler ile şebeke elemanlarının empedans değerlerinin hesaplama yöntemleri gösterilmiştir. Kısa devre hesaplamaları için; Monte Carlo, Analitik, Simetrik Bileşenler ve Kısa Devre Gücü(MVA) yöntemleri ayrı ayrı incelenmiştir. Tunceli ili Organize Sanayii Bölgesi(OSB) iletim hattı için; gerçek hat parametreleri kullanılmak sureti ile kısa devre gücü(MVA) yöntemi ile yapılan hesaplamalar sonucunda kısa devre koruma elemanlarının seçimi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında; kısa devre hesaplamalarında dinamik ya da standart tabanlı değişik yaklaşımların ispatı verilmekle beraber uygulamaların kendine özgü bölümleri ve sınırları hatırlatılmaktadır. Bunun yanında Türk standardı olarak kabul edilen TS-EN 60909 ve TS IEC-TR 363 üzerinde ayrıntılı hesaplamalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç sistemleri, Kısa devre, Arıza

SUMMARY

Short Circuit Calculation and Application of Electrical Distribution Systems

Short circuit analysis is of great importance in terms of doing short circuit calculations in the power system using the parameters of the possible lines; selection of conductor cross section of power transmission lines; appropriate sizing of circuit components and the breakers and providing the life safety of staff working in facility.

In order to comprehend short circuit case, units in short circuit calculation and methods in calculation of impedance values of wiring elements are shown in this study. Methods of Monte Carlo, Analytical, Symmetrical Coordinates and Short Circuit Power (MVA) are studied separately for the calculation of short circuit cases. For Tunceli Organized Industrial Zone, by way of using actual line parameters, short circuit maintenance elements are chosen as the result of calculations which are computed with Short Circuit Power Method (MVA).

In this thesis, applications specific sections and limits are reminded in the calculation of short circuit giving with the proof of different approaches which are dynamic or standard base. Besides, detailed calculations were made on the TS-EN 60909 and TS IEC-TR 363 accepted as Turkish Standards.

Key Words: Power Systems, Short Circuit, Fault

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1.	Generatöre yakın üç fazlı bir kısa devre arızasında, gerilimin sıfırdan geçtiği iletkenlerden herhangi birine ait arıza akımının değişimi.	6
Şekil 3.2	Endüktif gerilimin sıfırdan geçtiği şebekede meydana gelen kısa devre akımının değişimi.	7
Şekil 3.3.	Kısa devre olayı esnasında gerilimin sıfırdan farklı bir değerde olduğu diğer iki faz iletkenine ait akım ve gerilim değerleri	8
Şekil 3.4.	Generatöre uzak bir noktada meydana gelen kısa devre akımının değişimi.	9
Şekil 3.5.	(a) turbo (b) çıkık kutuplu generatörlerde λ 'nın değeri.....	12
Şekil 3.6.	Tesisat elemanlarının R/X oranına bağlı olarak K'nın değişimi.....	13
Şekil 3.7.	Bir güç sisteminin tek hat diagramı.....	137
Şekil 3.8.	Güç sistemini meydana getiren elemanların çeşitli diyagramlarda kullanılan eşdeğer devreleri ve standart semboller.	19
Şekil 3.9.	Şekil 3.7'de tek hat diyagramı verilen sistemin empedans diyagramı.	19
Şekil 3.10	Şekil 3.9'daki sistemin reaktans diyagramı. Bu diyagramda reaktanslar transformatörün yüksek gerilim tarafına indirgenmiştir.....	20
Şekil 3.11.	İletkenlerin birbirleri ile olan mesafeleri.....	23
Şekil 3.12.	Baraların montaj tertibi	24
Şekil 3.13.	Dikdörtgen kesitli baraların faz km. başına endüktif reaktans değerleri.....	24
Şekil 3.14.	Üç sargılı bir transformatör ve yıldız eşdeğer diyagramı.....	26
Şekil 3.15.	a) Enterkonnekte şebekeden bir transformatör üzerinden beslenen tüketici grubunun tek hat diyagramı. b) C barasında meydana gelebilecek bir kısa devrenin hesaplanması için eşdeğer gerilim kaynağının da gösterildiği eşdeğer devre.	31
Şekil 3.16.	Üç fazlı dengesiz bir sistemin a) pozitif. b) Negatif. c) sıfır bileşen gerilim fazörleri d) bunların toplamından meydana gelen dengesiz gerilim fazörleri.....	33
Şekil 3.17.	“a” operatörünün değişik kuvvetleri için fazör diyagramı.	34

Şekil 3.18.	Faz-toprak arızasının genel gösterimi	42
Şekil 3.19.	Faz-toprak kısa devre arızasında doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri.	43
Şekil 3.20.	Faz-faz kısa devre arızasının genel gösterimi.	45
Şekil 3.21.	Faz-faz kısa devre arızasının doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri.	45
Şekil 3.22.	İki faz-toprak kısa devre arızasının genel gösterimi.	48
Şekil 3.23.	İki faz-toprak kısa devre arızasının doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri.....	49
Şekil 3.24.	Üç fazlı simetrik kısa devre arızasının genel gösterimi.	51
Şekil 3.25.	Üç fazlı simetrik kısa devre arızasının doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri.....	52
Şekil 3.26.	Generatörden doğrudan beslenen tesisat parçalarında kısa devre oluşması.....	54
Şekil 3.27.	Generatörden elektrik sistemine bir transformatör üzerinden bağlı kısa devre hali.....	55
Şekil 4.1.	Tekhat Şeması	65
Şekil 4.2.	Sıfır dizin.....	66
Şekil 5.1.	X/R oranı bilinmeyen asenkron motorlar için beygir gücüne bağlı X/R oranı eğrisi.....	85
Şekil 5.2.	X/R oranı bilinmeyen zorlamalı soğutması olmayan transformatörler için güce bağlı X/R oranı eğrisi.....	86
Şekil 5.3.	X/R oranı bilinmeyen senkron makinalar için güce bağlı X/R oranı eğrisi	86
Şekil 6.1.	Asimetrik kısa devre akımı için R/X oranı	93
Şekil 6.2	Termik kısa devre akımı için m ve n değerleri ile kesicinin açma zamanı.....	93

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Bakır iletkenli kabloları ait dc direnç değerleri.....	21
Tablo 3.2. Bakır ve alüminyum havai hat iletkenlerinin 20 °C' lik çevre sıcaklığında faz ve km başına direnç değerleri (DIN 48 201'e göre)	22
Tablo 3.3. Maksimum ve minimum kısa devre akımlarının hesaplanmasında kullanılan gerilim faktörleri (C).....	30
Tablo 4.1. Öęelerin verileri ve +, – ve sıfır dizin kısadevre empedansları:	63
Çizelge 4.2. Üç faz kısadevre akımları:	81
Çizelge 4.3 İki faz (Toprak temassız) kısadevre akımları:	81
Çizelge 4.4 Faz-toprak kısadevre akımları:	82
Çizelge 5.1. AC ve DC eğrisi ayarlama	85
Çizelge 5.2. Döner makinaların kısa devre empedansları için çarpım faktörleri.....	87
Çizelge 6.1. XLPE Kabloları damar başına Ro/R1 ve Xo/X1 oranları.....	91
Çizelge 6.2. Havai hatlarda Xo/X1 oranı.....	92
Çizelge 6.3. Kablo kesitlerine göre km başına R ve X değerleri.....	92

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
VAR	: Volt Amper Reaktif
kVAR	: Kilovolt Amper Reaktif
VA	: Volt Amper
Hz	: Hertz
HD	: Tekil Harmonik Distorsiyonu
TTD	: Toplam Talep Distorsiyonu
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
GF_{toplam}	: Toplam Güç Faktörü
GF_{dist}	: Distorsiyon Güç Faktörü
Cos ($\phi_1 - \delta_1$)	: Kayma Güç Faktörü
HVDC	: Yüksek Gerilim Enerji İletim Sistemleri
MMK	: Manyeto Motor Kuvvet
DPF	: Faz Kayması Faktörü
PF	: Nonsinüsoidal durumda güç faktörü

SEMBOLLER LİSTESİ

A_p	: Aktif enerji sarfiyatı
A_q	: Reaktif enerji sarfiyatı
$\cos \phi$: Güç faktörü
c_p	: Sayaç sabitesi (dönme sayısı / kWh)
D	: Distorsiyon gücü
GF	: Güç faktörü
i	: Ani akım değeri
i_e	: Efektif akım değeri
i_m	: Maksimum akım değeri
I_n	: Bir kondansatörün n. harmonik için akım değeri
K_m	: Makinenin yapısı ile ilgili sabit
n	: Harmonik sayısı
np	: Aktif sayaç dönme sayısı (d/d)
nq	: Reaktif sayaç dönme sayısı (d/d)
Q	: Reaktif güç
Q_c	: Kondansatör gücü
Q_{cn}	: Kondansatörün harmonikli gücü
Q_s	: Sistemin kondansatör grubunun bağlı bulunduğu noktadaki kısa devre gücü
Q_T	: Nominal olarak, Q reaktif gücündeki bir kondansatöre uygulanan Bir harmonikli gerilim durumunda reaktif güç
P	: Aktif güç
P_K	: Kondansatörün aktif güç kaybı
P_{Fe}	: Demir kayıpları
P_H	: Ek kayıplar
R_1	: İletkenin sinüzoidal akımdaki temel omik direnç değeri

R_H	: İletkenin sinüzoidal akımdaki harmonikli omik direnç değeri
R_n	: n. harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direnci
S	: Görünür güç
U_C	: Kondansatör uçlarındaki sinüzoidal olmayan gerilimin efektif değeri
V	: Ani gerilim değeri
V_e	: Efektif gerilim değeri
V_m	: Maksimum gerilim değeri
w_1	: Temel bileşenin frekansı
w_n	: n. harmoniğin açısal frekansı
X_C	: Temel harmonikteki kapasitif reaktans değeri
X_{Cn}	: n. harmonikteki kapasitif reaktans değeri
β_n	: n. harmonik için tanımlanan gerilim harmoniği oranı ifadesi

1. GİRİŞ

Elektrik tesislerinde akım kaynağı ile tüketicilere kadar olan her çeşit işletme aracında yalıtımın bozularak çıplak iletkenlerin birbirleri ile temas etmesine kısa devre denir. Elektrik enerji sistemlerindeki geçici olay analizlerinin, tesisteki can ve mal güvenliğinin sağlanması, koruma röleleri ve enerji iletim hatlarının iletken kesiti seçiminin uygun şekilde boyutlandırılması, hesap yöntemlerinin ilgi çekiciliği açısından en önemlilerinden biri kısa devre arıza analizidir. Bu analiz bir tesisin proje aşamasından işletmesine kadar çok geniş bir alanda karşımıza çıkmaktadır. Kısa devrenin elektrik tesislerindeki tesirleri çok farklı olabilmektedir. Kısa devrenin darbe şeklinde ani olarak baş göstermesi ile devreden geçen büyük kısa devre akımları, tesis elemanları üzerinde dinamik kuvvetlerin oluşmasına ve bunların mekanik yoldan zorlanmasına yol açmaktadır. Devreden uzun süre geçen, sürekli kısa devre akımları ise tesis elemanlarının ısınmasına ve malzemenin termik bakımdan zorlanmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple hem tesis hem de işletme personeli bundan zarar görebilir. Kısa devre olayının sebep olduğu arızalar sonucunda; işletme kısmen veya tamamen durur ve kademe kademe enerji üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi artık normal olarak devam edemez. Ayrıca arızanın sebep olduğu hasar büyük onarım masraflarını da beraberinde getirir.

Elektrik sisteminde çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelen kısa devreler, dengesizlikler, aşırı gerilimler gibi istenmeyen olayların önceden saptanması, hesaplanması gerek tesisat elemanlarının gerekse bu tesisatla bağlantılı diğer tesisat elemanlarının ve tüketicilerinin seçimi, sistemin emniyetli bir şekilde çalıştırılabilmesi açısından önemlidir.

Bu şekilde hesaplara uygun olarak tesis edilmiş bir elektrik sisteminde meydana gelebilecek bir arızada, dengesizlikte veya aşırı gerilimde tesisat elemanları arızanın olumsuz etkilerine rahatlıkla dayanabilecek ve arıza en kısa sürede sistemden izole edilebilecektir (Küçük. 2005).

Bu araştırmanın amacı: Güç sistemlerindeki kısa devre arıza analizini varsayılan hat parametreleri yerine, Tunceli ili Nazımiye ilçesine enerji taşıyan F-6 (Fider-6) enerji nakil hattından branşman alınarak yapımı planlanan Tunceli ili İnönü Mahallesi Organize Sanayii Bölgesi enerji nakil hattının gerçek hat parametreleriyle, muhtemel kısa devre analizleri yapılacaktır. Bu kısa devre analizi sayesinde OSB (Organize Sanayii Bölgesi) giriş KÖK

(Kesici Ölçü Kabini) binası için, uygun kesici seçimi yapılarak hem tesis hem de işletme personellerinin tehlikeli arıza akımlarından etkilenmeleri önlenerekten verimli enerji sağlanmış olacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Enerji dağıtım sistemlerinin genel yapısı ve çalışma özellikleri dikkate alınarak, elemanların ayrı ayrı kurulan durum denklemlerinin birleştirilmesiyle sistemin tümüne ilişkin durum denklemlerinin kurulabileceği gösterilmiştir. (Özgenel. 1992).

Aygen ve ark. (1995), Monte Carlo yöntemini kullanan bir bilgisayar programı geliştirilerek örnek bir sistem üzerinde kısa devre analizine uygulanmıştır. Belirli bir bara için arıza akımının olasılık dağılımı histogram şeklinde elde edilmiştir. Sonuçta bu dağılımdan görülen, en kötü arıza akımı durumunun gerçekleşme olasılığı % 1 olduğu görülmüştür. Kısa devre akımının gerçekleşme olasılıkları güç sistemleri tasarımında maliyet açısından göz önüne alınması gerektiği ifade edilmektedir.

Kısa devre akımlarına ve topraklama dirençlerine; projelendirme, tesis ve işletme aşamalarında gereken önem verilmez ise sağlıklı bir röle koordinasyonunun kurulamayacağını, bu takdirde korunması istenilen cihazların koruma ve denetimin de sağlıklı olarak yapılamayacağını bu nedenle koruma ve denetim cihazlarına gereksiz yatırım yapmış olacağımız belirtilmektedir (Çamlı. 1995).

Chen ve Chung (1996), Güç akış çalışmaları için, standart per unit metoduna alternatif olarak kompleks kısa devre gücü (MVA) metodu önerilmektedir. Konvansiyonel per unit değerler yerine güç sistem ekipmanlarını MVA metoduyla temsil etmekle baz değerlere ihtiyaç kalmamaktadır. Önerilen metodoloji klasik yöntemden daha sade ve istenmeyerek yapılan (küsürat) hatalarına karşı daha az hassastır. Eğitim ve endüstride önemli potansiyele sahip yöntemin, güç akış çalışmaları için uygulaması sunulmaktadır.

EMTP (Elektromagnetic Transients Program) adı verilen ve tüm dünyada büyük ölçüde kabul görmüş ve FORTRAN yazılım dilinde derlenmiş program yardımıyla üç adet şebeke modeli incelenmiştir. Bunlardan ikisinde elde edilen sonuçlar VDE/IEC standardıyla hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmış ve VDE/IEC ile ANSI standartları tanıtılmıştır. Sonucusu ise, Conrad R.St.Pierre tarafından geliştirilen, temelini büyük ölçüde ANSI standartlarından alan ve bu standartlara çok yakın sonuçlar veren bir bilgisayar programının, bir çok kısa devre analizinde örnek şebeke modeli olarak 20 gözlü bir şebekeye uygulanmasıyla elde edilmiş sonuçların aynı şebekenin EMTP ile modellenmesi ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. EMTP' de veri dosyalarının hazırlanmasının katı kurallara

bağlı olması programın çoğu zaman anlaşılması çok güç olan hatalar vermesi göz önüne alınır, daha kullanıcı dostu programlar kullanılmasının elverişli olabileceği belirtilmektedir (Özdemir. 1997).

Aygen ve ark. (1997), Olasılığa bağlı arıza analizinde Monte Carlo yöntemi ve analitik yöntem kullanılarak arıza akımının olasılık yoğunluk fonksiyonları elde edilmiştir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçların benzerliği sayısal uygulama sonuçlarında görülmektedir. Analitik yöntemle yapılan işlemler bilgisayar belleği ve zaman açısından üstündür. Bu yöntemin daha karmaşık sistemlere uygulanabilecek şekilde geliştirilmesiyle Monte Carlo yönteminin yerine geçeceği belirtilmektedir.

Metz-Noblant ve ark. (2000), Elektrik tesisatının ve gerekli teçhizatın boyutlandırılmasında, bunun yanı sıra can ve mal güvenliği için gerekli önlemlerin alınmasında, şebekenin her noktası için kısa devre hesaplarının yapılması gerekmektedir. Alçak gerilim radyal şebekeleri ile yüksek gerilim şebekelerinin IEC 60909 standardına göre kısa devre akımlarının hesap yöntemleri gösterilmektedir. Ayrıca kısa devre akımlarının hesaplanmasında bilgisayar programları kullanılsa dahi kısa devre akımı hesabının ileri seviyede kavranmasının amaçlandığı belirtilmektedir.

Elektrik devrelerinin hesabında genellikle önde gelen kural ve teoremlerin başında Ohm, Theven, Kirchoff'tur. Karmaşık devrelerde Kirchoff kanunundan çıkıp da Thevenin denkliğine geçildiğinde, bu karmaşık devre hesapları kısmen kolay bir manzara görünümüne bürünür. Ancak yüksek gerilim söz konusu olduğu zaman bunların yerini alan üniter sistem (per-unit sistem) bu kural ve teoremlerin yetişemediği sorunlara el atar. Per-unit sisteminin tanıtımı ve yüksek gerilim üreten jeneratör ile yüksek gerilim dağıtan transformatörlerle ilgili bazı uygulamaların ortaya koyulduğu belirtilmektedir (Haktanır. 2001).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kısa Devre

Kısa devre; elektrik tesislerinde, faz iletkenleri arasında veya yıldız noktası topraklanmış şebekelerde faz iletkenleri ile toprak arasında izolasyonun herhangi bir şekilde ortadan kalkması ya da yanlış operasyonlar sonucu oluşan akımın çok büyük değerlere ulaştığı bir arıza halidir.

Bu durumda; sistemde, kaynaklar ile kısa devre noktası arasında empedans çok küçük olup, akım yolu üzerindeki bütün tesisat elemanları kısa devrenin termik ve dinamik etkilerine maruz kalırlar. Şayet tesisat elemanları kısa devrenin bu etkilerine, röleler tarafından belirlenen sürede dayanacak şekilde seçilmiş ve tesis edilmişse bir sorun çıkmaz. Ancak bu elemanlar yeterli kapasitede değilse hem kendileri tahrip olur, hem de çevreye zarar vererek can ve mal güvenliğini tehlikeye sokarlar.

3.1.1. Kısa devrenin oluşma nedenleri

Kısa devrenin kaynağı iç veya dış etkiler olabilir. Kısa devreye neden olabilecek başlıca iç etkiler; aşırı yüklenme sonucu izolasyonun aşırı derecede ısınması ve bozulması, aşırı gerilimler sonucu meydana gelen delinmeler ve atlamalar ile izolasyondaki yapım hataları ve yaşlanmalardır.

Başlıca dış etkiler ve nedenler ise; kablo ve izoleli hava hattı iletkenlerinin izolasyonlarının zedelenmesi, hava hatları ile atmosfere açık elektrik tesislerine yıldırım düşmesi, hava hattı izolatörlerinin kırılması, atmosferik şartlardan (kirlenme, rutubet, hava hatlarına konan kuşlar gibi) dolayı oluşabilecek atlamalardır. Hava hatlarında kar, buz ile oluşabilecek atlamalar ile transformatör merkezlerine giren çeşitli hayvanların, topraklanmış kısımlar ile gerilim altındaki kısımlar arasında veya fazlar arasında değmeleridir. Bakım esnasında güvenlik amacı ile kapatılan topraklama ayırıcılarının tesisata tekrar gerilim verilirken unutulmaları veya yapılan yanlış manevralardır (Küçük. 2005).

3.1.2. Kısa devre akımı

Kısa devre akımları, genellikle nominal akımların katları şeklinde meydana gelir. Büyük dinamik ve ısı etkilerinin yanında zaman zaman kabul edilemeyecek ölçüde tehlikeli gerilimleri de beraberinde getirir. Bu olumsuz etkilerin tesis elemanlarını harap etmesi ve

personel hayatını tehlikeye atması güvenlik önlemlerini zorunlu kılmaktadır (Özdemir, 1997).

Bir kısa devre olayında meydana gelen akımın alternatif bileşen değeri;

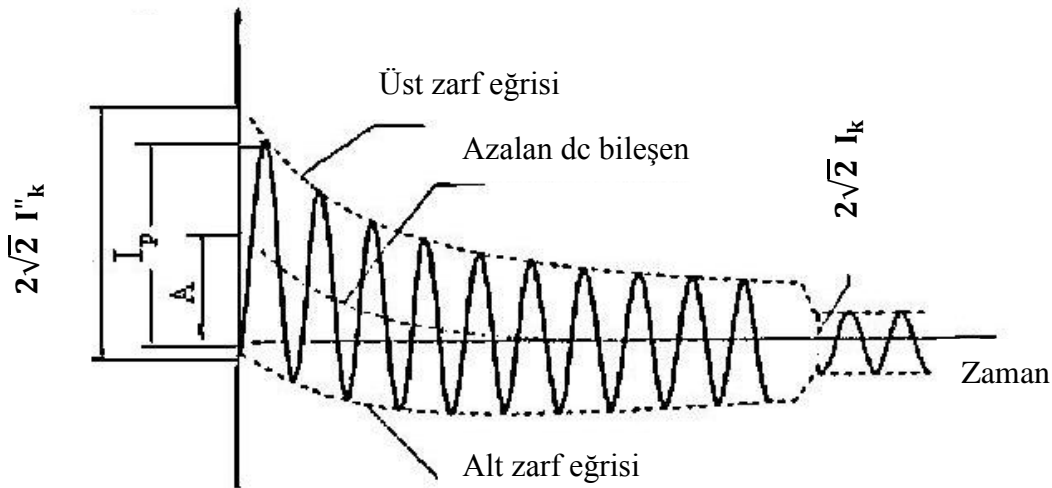
$$E_y = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

olmak üzere

$$I_k = \frac{E_y}{\Sigma(Z_{(1,2,0)})} \quad (3.2)$$

genel ifadesi kullanılarak hesaplanmaktadır.

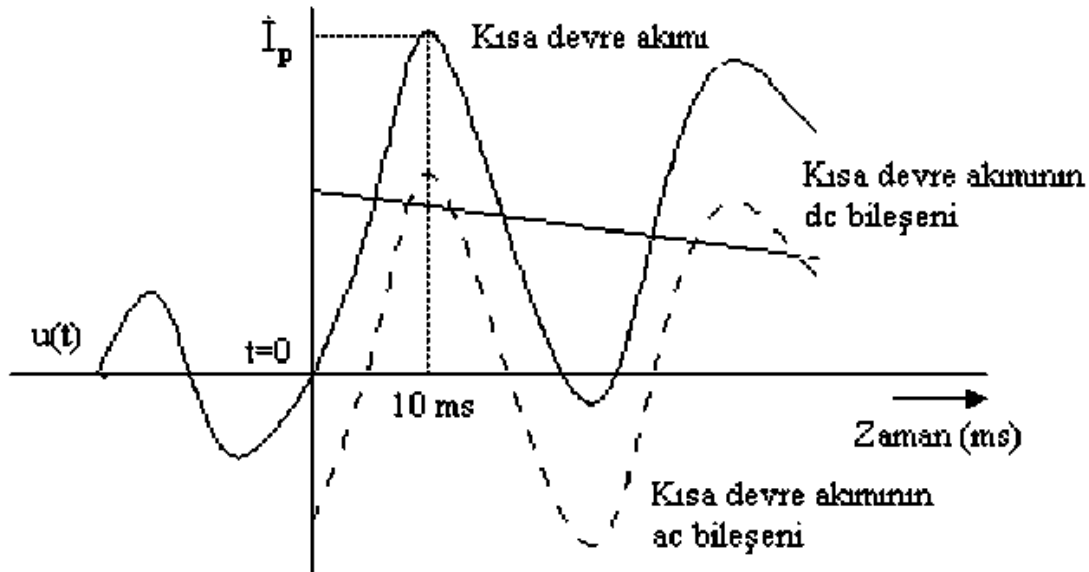
Şebekenin herhangi bir noktasında meydana gelebilecek kısa devre akımının hesabı için, kısa devre yolu üzerindeki tesisat elemanlarının empedansları arasında generatör empedansının özel bir yeri vardır. Kısa devre süresince uyarma alanı, endüvi reaksiyonundan dolayı zayıflar ve generatör klemens gerilimi düşer. Kısa devre olmadan önce, kısa devreyi besleyen makinenin emk.' i sabit kabul edilirse, klemens geriliminin azalmasının, generatör empedansının artmasından ileri geldiği kabul edilmektedir. Generatör empedansının büyümesiyle; kısa devre akımı, kısa devre noktası generatöre ne kadar yakın ise, o kadar hızla düşmektedir. Tam uyarmalı ve klemensleri aniden kısa devre edilmiş üç fazlı bir generatörün, fazlarından herhangi birinin tipik kısa devre akımının değişimi şekil 3.1'de R-fazı için örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Generatöre yakın üç fazlı bir kısa devre arızasında, gerilimin sıfırdan geçtiği iletkenlerden herhangi birine ait arıza akımının değişimi.

Şekil 3.1’den de görüldüğü gibi; akım, önce maksimum bir tepe değere (darbe kısa devre akımı, I_p) yükselmekte ve bu akım önce hızlı, daha sonra az hızlı olarak kararlı bir değer olan sürekli kısa devre akımına (I_k) düşmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, akım kısa bir süre için yatay eksene göre asimetriktir. Kısa devre akımının bu ilk tepe değerini daha iyi anlamak için Şekil 3.2’deki eğrinin $t=0$ anından hemen sonraki değişimine bakmak gerekir.

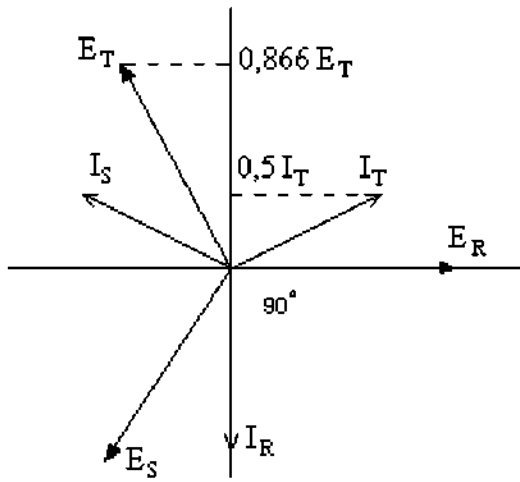
Kısa devre olayı gerilimin tam sıfırdan geçtiği anda meydana gelirse, oluşacak kısa devre akımı, kısa devre yolunun yaklaşık olarak tam endüktif olmasından (sadece generatörün kaçak reaktansının etkisinden) dolayı Şekil 3.2’de görüldüğü gibi yaklaşık 90° bir faz kaymasına maruz kalacaktır. Böylece $t=0$ anında kısa devre akımı maksimum değerine hızla çıkmak isteyecektir. Ancak; generatör direncinin endüktif karakterinden dolayı, kısa devre akımı maksimum değere ulaşamayacaktır. Pratik olarak $t=0$ anında, yine sıfır değeri ile başlayacaktır. Bu durumda, doğru akım bileşeni de gerekli kompanzasyonu yapacaktır. Kısa devre akımının doğru akım bileşeninin başlangıç değeri, alternatif bileşenin $t=0$ anındaki değerinin negatif işaretlisine eşit olup, değeri de birkaç periyot sonra küçülmektedir. Bu son ifadeden de anlaşılacağı gibi; kısa devre akımı alternatif ve doğru akım bileşenlerinden meydana gelmektedir. Alternatif akım bileşeni zaman eksenine göre simetrik iken, doğru akım bileşeni zaman ekseninin bir tarafında meydana gelmektedir.



Şekil 3.2. Endüktif gerilimin sıfırdan geçtiği şebekede meydana gelen kısa devre akımının değişimi.

Kısa devre akımının herhangi bir anındaki değeri, alternatif ve doğru bileşen akımların toplamından meydana gelmektedir. Şekil 3.2’den de görüleceği üzere; kısa devre akımı sıfır değeri ile başlar ve yarım dalga (50 HZ’lik frekansa sahip bir sistemde 10 milisaniye) sonra en yüksek tepe değerine ulaşır ve daha sonra doğru ve alternatif bileşen akımların zaman sabitlerine uygun olarak kararlı ve sürekli değere düşer.

Yukarıda belirtilen şartlarda generatör terminallerinde meydana gelen kısa devre olayı esnasında diğer iki faz iletkeninin gerilimleri Şekil 3.3’ de görüldüğü gibi nominal değerlerinin %86.6 değerine düşmektedir.

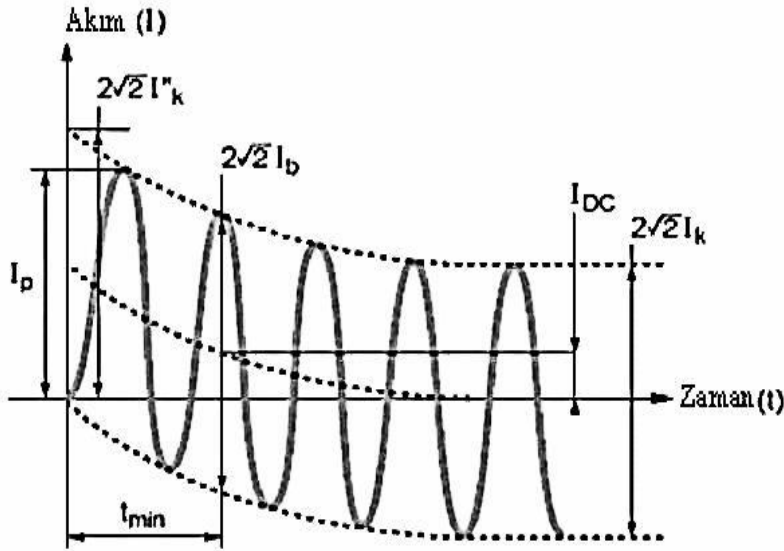


Şekil 3.3 Kısa devre olayı esnasında gerilimin sıfırdan farklı bir değerde olduğu diğer iki faz iletkenine ait akım ve gerilim değerleri

Ortalama olarak 90° geride bulunan her iki faza ait alternatif akım bileşenleri, maksimum değerlerinin %50’ si ile başlar. Kısa devre olayında oluşan her üç fazdaki doğru akım bileşenlerinin toplamı da, tıpkı alternatif akım bileşenlerinin toplamı gibi sıfır olmaktadır. S ve T fazlarındaki doğru akım bileşenlerinin daha küçük olmasından dolayı, kısa devre akımının zaman eksenine göre değişimi daha az simetrik olmaktadır.

Kısa devre alternatif akımının sürekli kısa devre alternatif akımına dönüşmesi, endüvi reaksiyonundan ileri gelmektedir. Bu reaksiyon uyarma alanını zayıflatarak emk.’i azaltmaktadır. Bu şekilde kısa devre akımı, oldukça yavaş bir şekilde kararlı, sürekli kısa devre akımına geçmekte ve bu olay transiyent geçiş olarak adlandırılmaktadır. Buna tekabül eden kısa devre alternatif akımına da transiyent kısa devre akımı denmektedir. Kısa devre olayının başlangıcında oluşan ve çok hızlı olarak azalan kısa devre alternatif akımına ise subtransiyent kısa devre akımı adı verilmektedir.

Kısa devre akımı; generatöre çok uzak olmayan bir noktada meydana gelirse, değişim yaklaşık olarak generatör klemenslerinde meydana gelen kısa devre akımı gibidir. Şayet kısa devre olayı, generatörden uzakta bir noktada meydana gelirse, generatör empedansları şebeke empedanslarına göre etkilerini kaybederler. Bu nedenle, kısa devre akımının değişimi Şekil 3.4'te görüldüğü gibi olur. Şekilden de görüldüğü gibi; kısa devre akımının başlangıç değeri, kararlı kısa devre akım değerinden çok az farklıdır (Küçük. 2005).



Şekil 3.4. Generatöre uzak bir noktada meydana gelen kısa devre akımının değişimi (Anonim. 2005).

3.1.3. Kısa devre olayında geçen büyüklükler

Kısa devre olayının başlangıcında ve devamında hesaplanabilen aşağıdaki akım büyüklükleri, sistemi meydana getiren tesis elemanlarının boyutlandırılmasında ve şebeke tesis elemanlarının korunmasında büyük önem arz etmektedir.

3.1.3.1 Subtransiyent (başlangıç) kısa devre akımı (I'_k)

Subtransiyent kısa devre akımı; Kısa devre akımının alternatif bileşeninin, ilk periyottaki en büyük değeridir. Kısa devre hesaplarında, kısa devre yolu üzerindeki tesisat elemanlarının, kaynaklar dâhil karakteristiklerinden yararlanarak hesaplanan ilk büyüklüktür. Ve diğer büyüklüklerin hesaplanmasında kullanılır. Efektif değer olarak

verilir. Şekil 3.1 ve 3.4'te maksimum değer olarak işaretlenmiş olduğundan; $\sqrt{2}I_k''$ pozitif ve negatif alternansların toplamı anlamında $2\sqrt{2}I_k''$ şeklinde yazılmıştır.

3.1.3.2. Transiyent (geçiş) kısa devre akımı (I_k')

Transiyent kısa devre akımı; Kısa devre olayı esnasında subtransiyent kısa devre akımı ile sürekli kısa devre akımı arasındaki geçiş akımına verilen addır.

3.1.3.3. Sürekli kısa devre akımı (I_k)

Sürekli kısa devre akımı; Geçici olaylardan sonra geriye kalan, sönümsüz kısa devre akımının efektif değeridir. Kısa devre olayı esnasında aynı şebekeden beslenen tüketiciler de, sürekli kısa devre akımının büyüklüğü üzerinde bir etki yaratmaktadır. Şayet kısa devre noktası generatörden uzak ise, bu durumda şebekenin toplam empedansı generatör reaktansından daha büyük olup, generatör klemenslerindeki artık gerilim büyümektedir. Bu yüzden tüketiciler belirli bir miktar akım çekebilirler ve bu akım yüzünden arıza noktasını besleyen kısa devre akımı küçülür.

Kısa devre esnasında şebekeye bağlı tüketiciler $Z_{yük}$ gibi bir empedansla gösterilirse; bu empedans generatör klemensleri ile kısa devre noktası arasında paralel bağlanmış bir empedans olarak alınır. Bu durumda; generatörden üç fazlı bir kısa devre arızası esnasında çekilen toplam akım aşağıdaki ifadede hesaplanır.

$$I_{yük} + I_{k3} = \frac{E_y}{X_d + \frac{Z_{şeb} \cdot Z_{yük}}{Z_{şeb} + Z_{yük}}} \quad (3.3)$$

Kısa devre esnasında şebekeye bağlı tüketicilerin (motor, aydınlatma sistemleri, ısıtıcılar vb.) sayı ve tiplerinin bilinmemesi, generatörlerin farklı aşırı uyarım özelliklerinden dolayı, sürekli kısa devre akımının değeri tam doğrulukla hesaplanamamaktadır.

Sürekli kısa devre akımı genel olarak, başlangıç kısa devre akımına (I_k'') bağlı olarak çizilen eğrilerden yararlanılarak bulunur. Bu maksatla;

$$\lambda = \frac{I_k}{I_n} \quad (3.4)$$

olmak üzere, (I'_{k3} / I_n) oranına bağlı olarak çizilmiş Şekil 3.5' ten yararlanır. Böylece üç fazlı kısa devre arızasında sürekli kısa devre akımı

$$I_{k3} = \lambda I_n \quad (3.5)$$

eşitliğinden yararlanılarak hesaplanır.

Bu değişimlerde, kısa devre esnasında şebekeye bağlı tüketicilerin etkisi ihmal edilmiştir.

Şayet kısa devreyi besleyen generatörlerin aşırı uyarım özellikleri var ise, şekillerdeki λ max değerlerinin;

Turbo generatörler için 1.3 kat,

Çıkık kutuplu generatörler için ise 1.6 kat alınması gereklidir.

İki fazlı bir kısa devre olayında, sürekli kısa devre akımının hesaplanması maksadı ile (I''_{k2} / I_n) oranı için, Şekil 3.5'te apsis eksen değerleri $\sqrt{3}$ ile, faz-toprak kısa devre arızasında (I''_{k1} / I_n) oranı için ise, aynı apsis değerleri 3 ile çarpılmalıdır.

Bu tanımlara uygun olarak iki fazlı kısa devre arızasında sürekli kısa devre akımı

$$I_{k2} = \sqrt{3}\lambda I_n \quad (3.6)$$

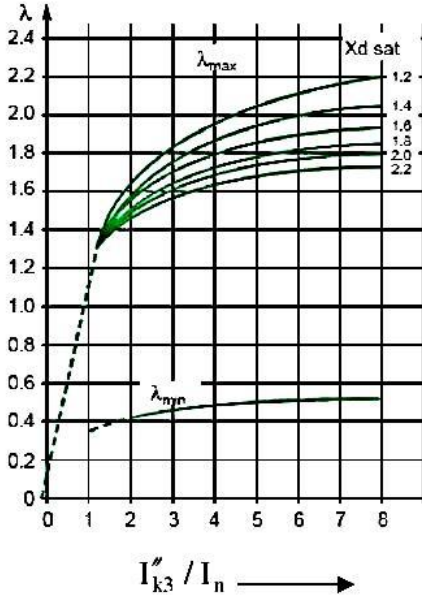
ifadesinden, faz-toprak kısa devre arızasında sürekli kısa devre akımı ise

$$I_{k1} = 3\lambda I_n \quad (3.7)$$

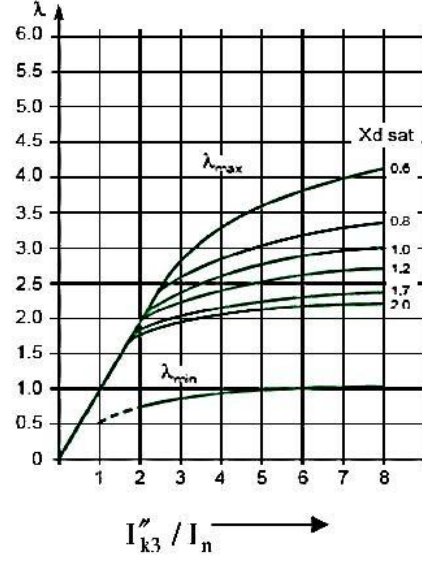
eşitliğinden hesaplanmaktadır.

Çeşitli kısa devre durumları için yukarıda (3.5), (3.6), ve (3.7) no'lu eşitliklerde verilmiş olan ifadelerden de görüleceği gibi; üç fazlı kısa devre durumunda sürekli kısa devre akımı, iki fazlı kısa devre durumundaki sürekli kısa devre akımından daha küçük ve iki fazlı kısa devre durumundaki sürekli kısa devre akımı ise faz-toprak kısa devre durumundaki sürekli kısa devre akımından daha küçük olmaktadır.

Yani; $I_{k3} < I_{k2} < I_{k1}$ durumu oluşmaktadır.



(a) Turbo Generatörler

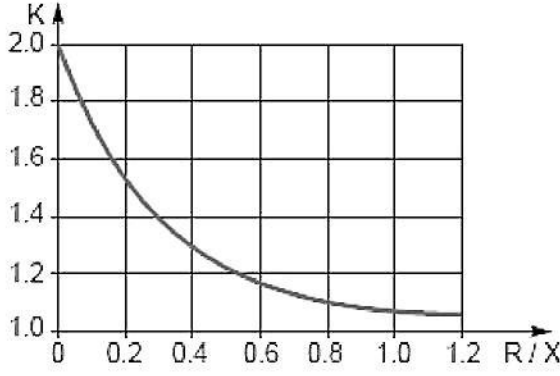


(b) Çıkık Kutuplu Generatörler

Şekil 3.5. (a) turbo (b) çıkık kutuplu generatörlerde λ 'nın değeri (Noblat ve ark. 2000).

3.1.3.4. Darbe kısa devre akımı (I_p)

Darbe kısa devre akımı; Kısa devre olayı başladıktan sonraki ilk periyottaki en büyük değerdir. Bu değer; efektif değer olarak değil, maksimum değer olarak alınır. Değeri, kısa devre anındaki gerilimin durumuna ve şebekenin empedans yapısına bağlı olarak değişir. Bu değer; tesisatın çeşitli kısımlarının dinamik, güç anahtarlarının ise devreyi açma zorlanmasında önemli rol oynar. Bu değer; kısa devre olayının meydana gelişinden 10 ms sonraki akımın en büyük değeridir. Bu değer; gerilim sıfır değerinde olduğu anda kısa devrenin meydana geldiği ve kısa devre akımının gerilimden yaklaşık olarak 90° (şebekenin tam endüktife yakın olması hali) geri olduğu durumda hesaplanan ya da ölçülen bir değerdir. Şebeke empedansının omik direnç değerinin büyük olması durumunda kısa devre akımı, gerilimden 90° den daha az geri fazdadır. Bu nedenle; kısa devre akımının ilk tepe değeri, kısa devre oluş anından 10 ms sonra değil de biraz daha önce meydana gelir. Yine bu durumda; gerilimin, kısa devre olayının meydana geldiği anda, sıfırdan geçtiği kabul edilmektedir. Darbe kısa devre akımının ($I_p = V2 \cdot I''_k$) kısa devre yolu üzerindeki tesisat elemanlarının empedanslarına (R/X) bağlı olarak değişimi Şekil 3.6' da ki gibidir. K terimi “darbe kısa devre akım katsayısıdır”.



Şekil 3.6. Tesisat elemanlarının R/X oranına bağlı olarak K'nın değişimi (Anonim.1998).

Alternatif akım bileşeninin sönmediği generatörden uzak bir noktada meydana gelen kısa devreler için Şekil 3.6'da R/X oranına bağlı olarak

$$K = \frac{I_p}{\sqrt{2}I_k''} \quad (3.8)$$

değişimini göstermektedir.

Darbe kısa devre akım katsayısının değeri tesisat elemanlarının karakteristiklerine bağlı olarak

$$K \approx 1.02 + 0.98e^{-3R/X} \quad (3.9)$$

Şeklinde bulunur. Alçak gerilim şebekelerinde ise K=1.8 olarak alınmaktadır.

3.1.3.5. Kısa devre açma akımı (I_b)

Kısa devre açma akımı; kısa devrenin kesilmesi anında kesicinin kontaklarının ayrılması esnasında kesiciden geçen kısa devre alternatif akımının efektif değeri olup, güç anahtarlarının devreyi açma zorlanmasını tayin eden esas büyüklüktür. Kısa devre akımının sona ermesini, güç anahtarlarının minimum açma gecikmesi tayin etmektedir. Bu da, güç anahtarlarının kendi zamanlarına ve açma için çalışan röle ve diğer cihazların minimum gecikmesine bağlıdır. Koruma cihazlarının ve güç anahtarlarının tipine göre bu zaman 0.08 ile 0.25 saniye arasında değişir.

Kısa devre akımının doğru akım bileşeni, bu gecikme zamanı içinde tamamen sönmemiş ise, asimetrik kısa devre akımına ait kısa devre açma akımının efektif değeri

$$I_{b(as)} = \sqrt{\left[\left((I_k'' - I_k') e^{-t/T_d''} + (I_k'' - I_k') e^{-t/T_d'} + I_k \right)^2 + 2 \left(I_k'' e^{-t/T_d} \right)^2 \right]} \quad (3.10)$$

ifadesinden bulunur.

Kısa devre akımının simetrik devre açma akımı ise

$$I_b = (I_k'' - I_k') e^{-t/T_d''} + (I_k'' - I_k') e^{-t/T_d'} + I_k \quad (3.11)$$

ifadesinden hesaplanır.

(3.10 ve 3.11) no'lu bağıntılarda geçen subtransiyent (başlangıç) zaman sabiti (T_d'') ile transiyent (geçiş) zaman sabiti generatörlerin zaman sabiti olup, generatöre ait büyüklükler bölümünde açıklanmıştır.

3.1.3.6. Kısa devre açma gücü (S_b)

Elektrik sisteminin herhangi bir noktasında meydana gelen kısa devrenin dinamik zorlamasını inceleyebilmek için darbe kısa devre akımı I_p alınmakla beraber, açma akımının (I_b) veya bu akımla bağıntılı olan açma gücünün (S_b) de bilinmesi daha uygun olmaktadır.

Doğru akım bileşeninin zaman sabitesinin küçük olması ve minimum açma gecikmesinin ($t \geq 0.1$ saniye) olması durumunda asimetrik devre açma ile simetrik devre açma akımları arasındaki fark çok küçük olacaktır. Dolayısıyla kısa devre açma gücünün tayininde simetrik açma akımı kullanılmaktadır. Kısa devre akımının doğru akım bileşeninin etkisi küçük ise, ihmal edilmektedir. Güç anahtarlarının minimum açma gecikmesi 0,08 saniye ile 0,25 saniye arasında olduğundan, bu ihmalin bir sakıncası yoktur.

Üç fazlı sistemlerde üç fazlı simetrik güç;

$$S_b = \sqrt{3} U I_b \quad (3.12)$$

ifadesinden hesaplanır.

3.1.4. Generatörlere ait büyüklükler

Şebekenin herhangi bir noktasında meydana gelen kısa devre akımının hesaplanmasında, kısa devre yolu üzerinde bulunan elemanların; gerilim, reaktans ve zaman sabitleri gibi büyüklüklerinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu devre elemanları içinde generatör; kısa devrenin oluşmasında, devamında ve sönümünde çeşitli şekillerde önemli rol

oynar. Generatörün kısa devre olayında etken olan büyüklükleri ve hesaplamaları aşağıdaki gibidir.

3.1.4.1. Generatörün reaktansları

Kısa devre olayında, kısa devre yerini besleyen generatör reaktanslarının önemli yeri vardır. Subtransiyent, transiyent ve sürekli kısa devre akımlarına karşılık gelen ve her biri ayrı olan üç farklı reaktans vardır.

Bu reaktanslar;

X_d'' subtransiyent reaktansı, generatörün stator ve rotor sargılarının kaçak reaktansını ihtiva etmektedir. Subtransiyent reaktansa darbe kaçak reaktansı veya başlangıç reaktansı adları da verilmektedir. Subtransiyent reaktansın bağıl değeri, turbo generatörlerde %12, amortisman sargılı çıkık kutuplu generatörlerde ise %18 civarındadır.

X_d' transiyent (geçici) reaktansı, generatörün stator ve uyarım sargılarının kaçak reaktanslarını içermektedir. Değer olarak subtransiyent reaktanstan genellikle daha büyüktür. Transiyent reaktansın bağıl değeri turbo generatörlerde %18, amortisman sargılı çıkık kutuplu generatörlerde ise %27 civarındadır.

X_d senkron reaktansı, endüvi sargısının toplam reaktansı olup endüvi reaksiyonundan ileri gelir.

Reaktans ifadelerindeki “d” harfi; reaktansların, rotorun sargı ekseninin statorun sargı eksenine ile üst üste çakıştığı konumdaki duruma ait olduğunu göstermektedir.

3.1.4.2. Generatörlerin zaman sabitleri

Bir kısa devre olayı esnasında; kısa devre noktası ile generatör arasındaki reaktanslar ve generatör reaktansları, kısa devre akımının başlangıç ve son değerlerini tayin eder. Generatör reaktansları kısa devre olayı esnasında değişmekte olup, değerleri generatörün zaman sabitleri tarafından belirlenir.

Generatörün zaman sabitleri;

Subtransiyent zaman sabiti (T_d''); bu zaman sabitesi, rotor akım devresinin sönme özelliklerine bağlıdır. Bu zaman sabiti generatör ve şebeke reaktansları cinsinden

$$T_d'' = \frac{X_d'' + X_{\text{şeb}}}{X_d' + X_{\text{şeb}}} \cdot T_{d0}'' \quad (3.13)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır.

Transiyent zaman sabiti (T_d'); bu zaman sabiti, uyarma devresinin amorti edici özelliklerine ve kısa devrenin tipine bağlıdır. Kısa devrenin üç fazlı, iki fazlı veya faz toprak oluşuna göre değerler değişmektedir.

Üç fazlı kısa devre durumunda T_d' zaman sabiti, generatör ve şebeke reaktansları kullanılarak

$$T_{d(3)}' = \frac{X_d' + X_{\text{şeb}}}{X_d + X_{\text{şeb}}} \cdot T_{d0}' \quad (3.14)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır.

İki fazlı kısa devre durumunda T_d' zaman sabiti doğru bileşen empedansın yanında ters bileşen empedansında etkisi göz önünde bulundurularak

$$T_{d(2)}' \cong \frac{X_d' + X_2 + 2Z_{\text{şeb}}}{X_d + X_2 + 2Z_{\text{şeb}}} \cdot T_{d0}' \quad (3.15)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır.

Faz-toprak kısa devre durumunda T_d' zaman sabiti doğru ve ters bileşen empedansları ilave olarak sıfır bileşen empedans değeri de göz önünde bulundurularak

$$T_{d(1)}' \cong \frac{X_d' + X_2 + 2Z_{\text{şeb}} + X_0}{X_d + X_2 + 2Z_{\text{şeb}} + X_0} \cdot T_{d0}' \quad (3.16)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır.

Doğru akım bileşeni zaman sabiti (T_g) : Bu zaman sabiti stator doğru akım devresinin özelliklerinden yararlanılarak tayin edilmektedir. Yani stator sargısının ve dış kısa devre yolunun endüktif direncinin omik dirence oranı tarafından belirlenmektedir. Değişik arıza durumlarında pratik olarak doğru akım bileşeni zaman sabiti

$$T_g \approx \frac{X_d'' + X_{\text{şeb}}}{\omega(R_a + R_{\text{şeb}})} \quad (3.17)$$

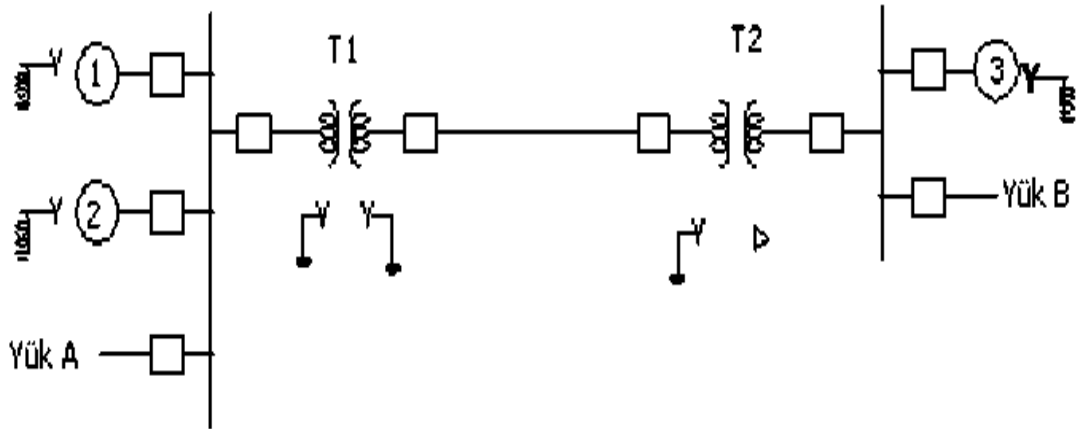
ifadesinden hesaplanmaktadır (Küçük. 2005).

3.2. Tek Hat Diyagramı

Üç fazlı bir güç sistemi normal halde hesaplamalarda kolaylık olması açısından 1 faz ve 1 nötr' den ibaret olarak düşünülür. Sistem genellikle dengeli olduğundan ve bu halde nötr iletkeninden bir akım geçmeyeceğinden, bir devre diyagramı çizileceği zaman nötr hattı ihmal edilir. Bunun yanında sisteme dâhil olan cihazların eşdeğer devreleri yerine, bunlar için düşünülmüş standart semboller kullanılarak diyagram sadece 1 faz ihtiva eden bir hat olarak ifade edilir ki, buna “sistemin tek hat diyagramı” denir.

Tek hat diyagramında amaç; sistem hakkında önem arz eden bilgilerin açık bir şekilde gösterilmesidir. Analizi yapılan probleme göre, tek hat diyagramındaki bilgiler değişmektedir. Bir güç sisteminin yük etüdünde kesici ve ayırıcıların tek hat diyagramında gösterilmesine gerek yoktur. Ancak, sistemin bir arıza durumunda geçici rejim altındaki kararlılığının incelenmesi durumunda; sistemdeki kesici, ayırıcı ve rölelerin belirli bir hız ile sistemin arızalı kısmını devreden çıkarmaları istendiğinden, bu elemanlar tek hat diyagramlarında gösterilmelidir (Çakır. 1986).

Şekil 3.7’de örnek bir güç sisteminin tek hat diyagramı gösterilmektedir. Bu diyagramda; generatör, motor, yükseltici ve indirici transformatörlerin yıldız noktalarının reaktans ya da rezistans üzerinden topraklandığı görülmektedir.



Şekil 3.7. Bir güç sisteminin tek hat diyagramı.

3.2.1. Empedans ve reaktans diyagramları

Bir enerji sisteminde yük etüdü veya kısa devre etüdü yapılabilmesi için, tek hat diyagramından sistemin empedans diyagramına geçilmesi gerekir. Empedans diyagramına

geçebilmek için, sistemi meydana getiren elemanların her birinin eşdeğer devrelerinin bilinmesi gerekir. Bunlar Şekil 3.8'deki gibi kısaca özetlenebilir. Şekil 3.8'den görüldüğü gibi,

a) Empedans diyagramında generatörler, endüklenen elektromotor kuvveti (emk)' ne seri bağlı birer empedans ile

b) Taşıma hatları yeterli doğrulukta T ve II devrelerinden biri ile

c) Transformatörler kendi eşdeğer devreleri ile gösterilir.

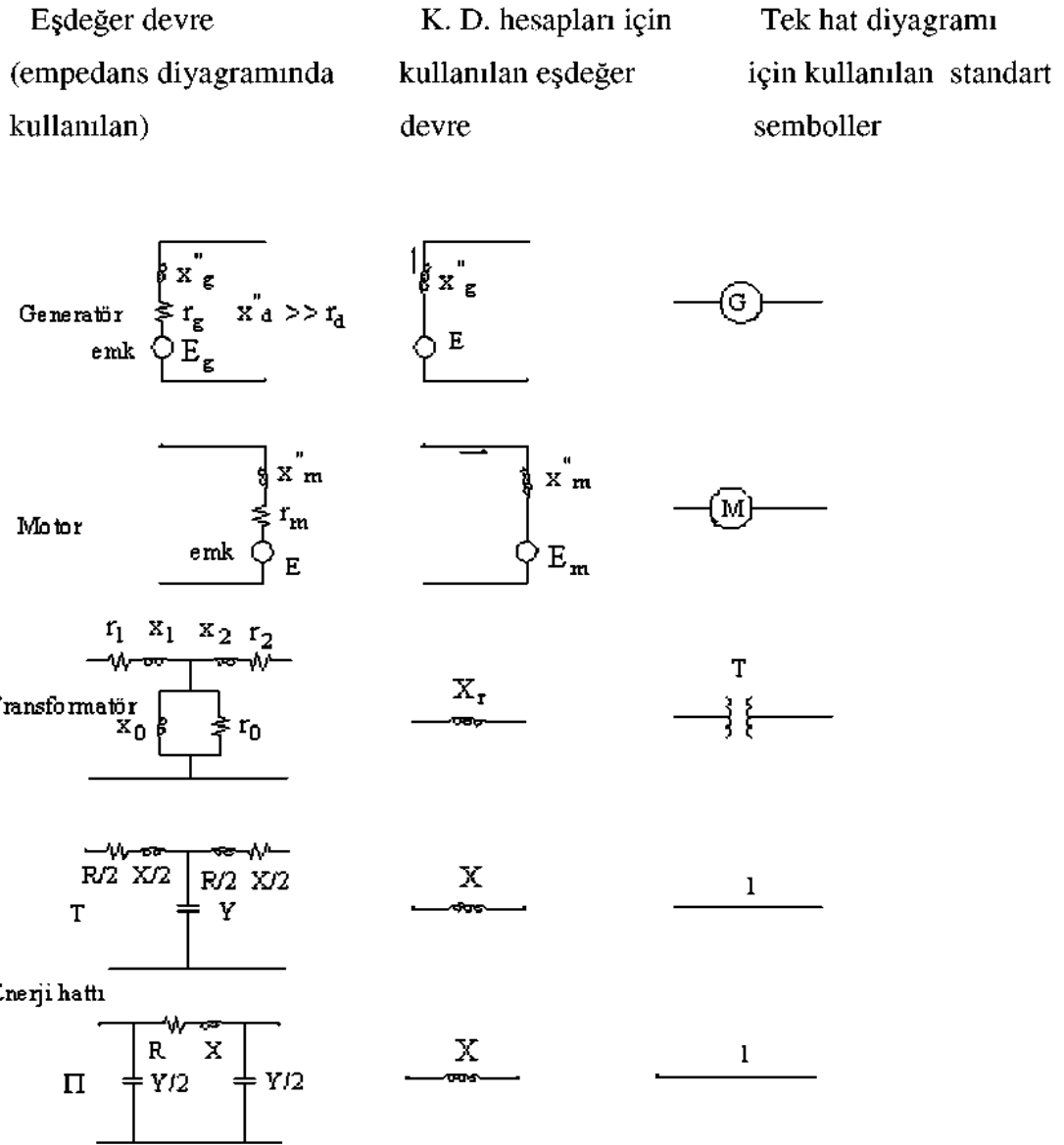
Yük etüdü yapılacak ise, endüktif yükler seri bağlı birer direnç ve reaktansla ifade edilir.

Empedans diyagramında, tek hat diyagramlarında görülen generatörlerin nötrleri ile toprak arasındaki akım sınırlandırıcı empedanslar gösterilmez. Çünkü dengeli halde generatör nötrleri sistem nötrleri ile aynı potansiyelde olacağından, bunların üzerinden bir toprak akımı geçmez.

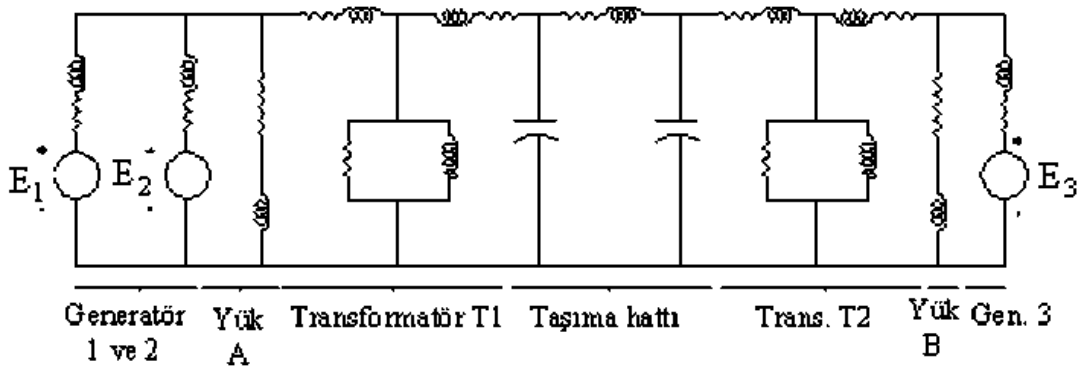
Ayrıca, empedans diyagramındaki aynı bir gerilime, yani transformatörlerin sekonder veya primer gerilimine göre ifade edilir. Yukarıdaki açıklamalar ışığında Şekil 3.8'deki eşdeğer devreler Şekil 3.7' deki yerlerine konursa, kolayca Şekil 3.9'daki empedans diyagramları elde edilir.

Arıza etüdü yapılırken, dirençler genellikle ihmal edilebilir. Yüksek gerilim hatlarında omik direnç, reaktansın 0.1 katına kadar inebilir. Bu durumda, yüksek gerilim hatlarında direnç ve reaktans vektörel olarak toplanacağından; empedans, reaktanstan pek farklı bulunmaz. $Z=X$ olarak kabul edilebilir. Alçak gerilim hatlarında ise; reaktans, omik direncin 0.1 katı olabilmektedir. Burada da reaktans ihmal edilerek $Z=R$ kabul edilebilir.

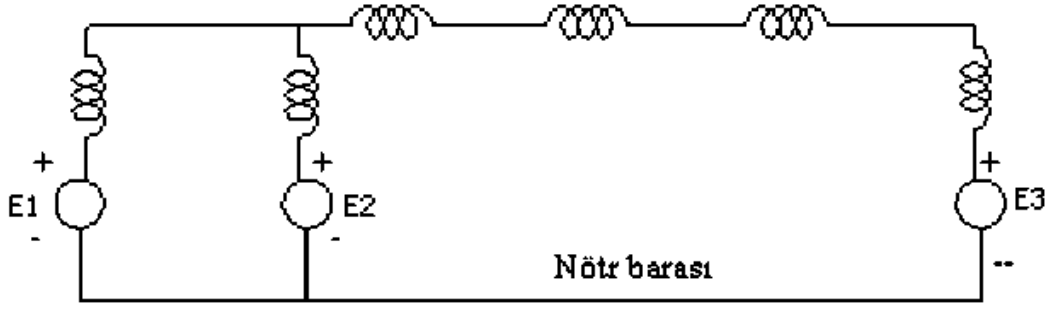
Arıza hesapları için; bütün statik yükleri, dirençleri, transformatörlerin mıknatıslanma akımları ve taşıma hatlarının kapasitif akımlarını (Kısa devre akımı yanında çok küçük kaldıkları için) ihmal edersek, Şekil 3.9'daki sistemin empedans diyagramı Şekil 3.10'daki gibi reaktans diyagramına çevrilmiş olur.



Şekil 3.8. Güç sistemini meydana getiren elemanların çeşitli diyagramlarda kullanılan eşdeğer devreleri ve standart semboller (Çakır, 1986).



Şekil 3.9. Şekil 3.7'de tek hat diyagramı verilen sistemin empedans diyagramı.



Şekil 3.10 Şekil 3.9'daki sistemin reaktans diyagramı. Bu diyagramda reaktanslar transformatörün yüksek gerilim tarafına indirgenmiştir.

3.3. Teçhizat Empedansları

Kısa devre hesabı yaparken, şebeke elemanlarının empedanslarının doğru olarak tespit edilmiş olması gerekmektedir. Kısa devre akımı hesabında, empedans metodu ve IEC 60909'a göre simetrik bileşenler metodu bulunmaktadır. (Bu yöntem ayrı bir konu başlığı altında incelenmiştir). Simetrik bileşenler metodu; asimetrik üç fazlı bir vektör sistemini; ayrı ayrı üç simetrik vektör sistemi olarak meydana gelmesi prensibinden hareketle elde edilmiştir.

Burada, simetrik bileşenler metodu ile ortaya çıkan formüller kullanılacaktır.

Empedans değeri (Z), üç bileşenden oluşur. Birinci bileşen (Z_1) kısa devre yolundaki doğru empedans (Pozitif bileşen), ikincisi (Z_2) ters empedans (Negatif bileşen) ve üçüncüsü (Z_0) sıfır empedans bileşeni (Sıfır bileşen) dir. Empedansın mutlak değeri yani büyüklüğü

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 \text{ olarak gösterilebilir.}$$

3.3.1. Kablo empedansları

Kablolarda; pozitif ve negatif empedanslar, yani pozitif ve negatif omik direnç ve reaktans değerleri birbirine eşittir.

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 - \underline{Z}_2 \quad (3.18)$$

$$R = R_1 = R_2 \quad (3.19)$$

$$X = X_1 = X_2 \quad (3.20)$$

Kabloların direnç ve reaktans (çoğu kez endüktans, mH/km) değerleri üretici firma kataloglarında faz ve kilometre başına ohm olarak verilmektedir. IEC 60909'a göre şayet; ac

direnç elde edilemiyor ya da hesaplanamıyorsa, bunun yerine dc direnci hesaplarda kullanılabilir. Yaklaşık hesaplar için reaktans değerleri, ortalama olarak 0,1 ohm/faz. km alınabilir.

20 °C' lik çevre sıcaklığında bakır iletkenli kabloları ait dc direnç değerleri faz ve km başına Tablo 3.1' de verilmiştir

Tablo 3.1. Bakır iletkenli kabloları ait dc direnç değerleri.

Kesit (mm ²)	2.5	4	6	10	16	25	35
dc direnci (ohm/km)	7.41	4.61	3.08	1.83	1.15	0.727	0.524
Kesit (mm ²)	50	70	95	120	150	185	240
dc direnci (ohm/km)	0.387	0.268	0.193	0.153	0.124	0.0991	0.0754

R_{20} ; 20 °C' de kablonun bir metresinin ohm cinsinden dc direnci, q ; (mm² olarak) kablo iletken kesiti olmak üzere, Bakır kablo için;

$$R_{20} = \frac{1}{56.q} \quad (3.21)$$

Alüminyum kablo için;

$$R_{20} = \frac{1}{36.q} \quad (3.22)$$

ifadesinden de hesaplanabilir.

Çevre sıcaklığının 20 °C' den farklı θ °C olması halinde iletkenlerin direnç değerleri;

$$R_{\theta} = [1 + \alpha(\theta - 20^{\circ})] R_{20} \quad (3.23)$$

ifadesinden bulunur.

İfadede geçen α sabiti bakır iletkenler için 0,00393 1/°C, alüminyum iletkenler için ise 0.00403 1/ °C alınır.

3.3.2. Havai hatların empedansları

Havai hatlarda da pozitif ve negatif empedanslar yani pozitif ve negatif omik direnç ve reaktans değerleri birbirine eşittir. (Bkz. 3.18) ifadesi.

Kablolarda olduğu gibi, havai hat iletkenlerinin de faz ve kilometre başına ohm olarak direnç değerleri üretici firma kataloglarından kolayca bulunur. Tablo 3.2’de bakır ve alüminyum iletkenlerin, direnç değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Bakır ve alüminyum havai hat iletkenlerinin 20 °C’ lik çevre sıcaklığında faz ve km başına direnç değerleri (DIN 48 201’e göre)

İletkenin kesiti (mm ²)	İletkenin çapı (mm ²)	Bakır (ohm/km)	Alüminyum (ohm/km)
10	4.10	1.806	-
16	5.10	1.139	1.802
25	6.30	0.746	1.181
35	7.50	0.527	0.834
50	9.00	0.366	0.579
70	10.50	0.276	0.437
95	12.50	0.195	0.309
120	14.00	0.155	0.246
150	15.80	0.124	0.196
185	17.50	0.100	0.159
240	20.30	0.075	0.119
300	22.50	0.061	0.097

Havai hat iletkenlerinin reaktansları, iletken tertibine (askı-gergi) ve iletken kesitine bağlı değişkenlerdir. Dolayısıyla iletken kesiti, iletkenler arası mesafe ve iletkenlerin diziliş biçimi, hat reaktansını belirler. Reaktans, gerilimden bağımsızdır. Ancak gerilimin artması, iletkenler arası açıklığı etkilediğinden aynı iletken için farklı gerilim kademelerindeki reaktanslar değişir. Şekil 3.11’de mesnet ve askı tertip iletkenlerinin birbirleriyle olan mesafeleri gösterilmiştir.

r; iletkenin yarıçapı (m) cinsinden,

d₁,d₂,d₃; iletkenler arası mesafe (m) cinsinden d_{eş} üç fazlı bir sistem için;

$$d_{eş} = \sqrt{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3} \quad (3.24)$$

ifadesinden hesaplanan iletkenler arasındaki ortalama mesafe olmak üzere, üç fazlı alternatif akım sistemlerinde faz km. başına endüktans değeri;

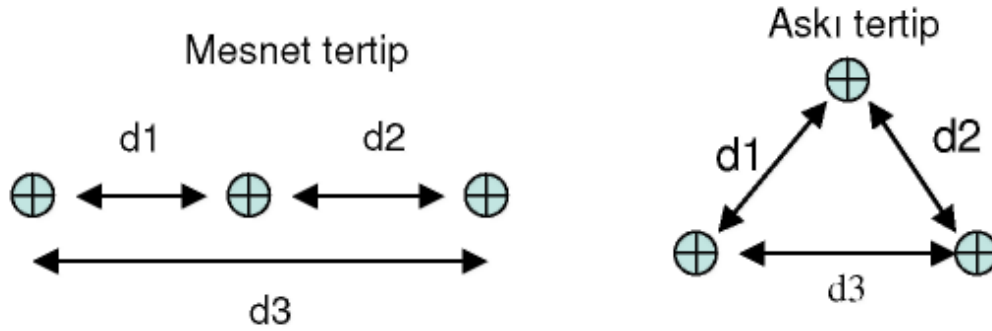
$$(L_{\omega 0}) = 2.10^{-7} \left[0,25 + \ln \left(\frac{d_{eş}}{r} \right) \right] \text{ [H/ m]} \quad (3.25)$$

ifadesinden bulunur.

Endüktansın bu değerinden yararlanarak faz km. başına endüktif reaktans değeri

$$X = \omega L_{\omega 0} \text{ [ohm/km.faz]} \quad (3.26)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 3.11. İletkenlerin birbirleri ile olan mesafeleri

Alçak ve orta gerilim şebekelerinde iletkenler arasındaki mesafeler standart gerilimler için belirlenmiş olup, havai hat iletkenlerinin km başına endüktif reaktans değerleri; pek fazla değişmemektedir. Bundan dolayı hesaplarda faz başına endüktif reaktans değerleri ortalama olarak;

30 KV' un üzerindeki hatlarda $X=0.4$ ohm/km.faz

30 KV' a kadar olan hatlarda $X=0.35$ ohm/km.faz alınabilir.

3.3.3. Bara empedansları

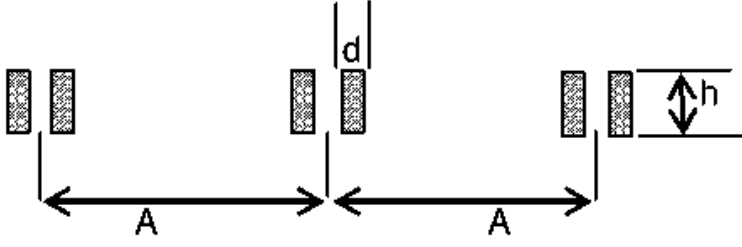
Dağıtım tesislerinde baraların endüktif reaktansları, baraların tesis şekline göre şekil 3.12'deki gibidir. Baraların dirençleri ise çok küçük olduğundan hesaplarda ihmal edilir.

Baraların endüktif reaktansı imalatçı kataloglarından alınabileceği gibi aşağıdaki formüllerle de hesaplanabilir.

$$L = 2 \left[\ln \left(\frac{\Pi 2A + H}{\Pi d + H} \right) + 0,03 \right] .10^{-1} \text{ [H/ m]} \quad (3.27)$$

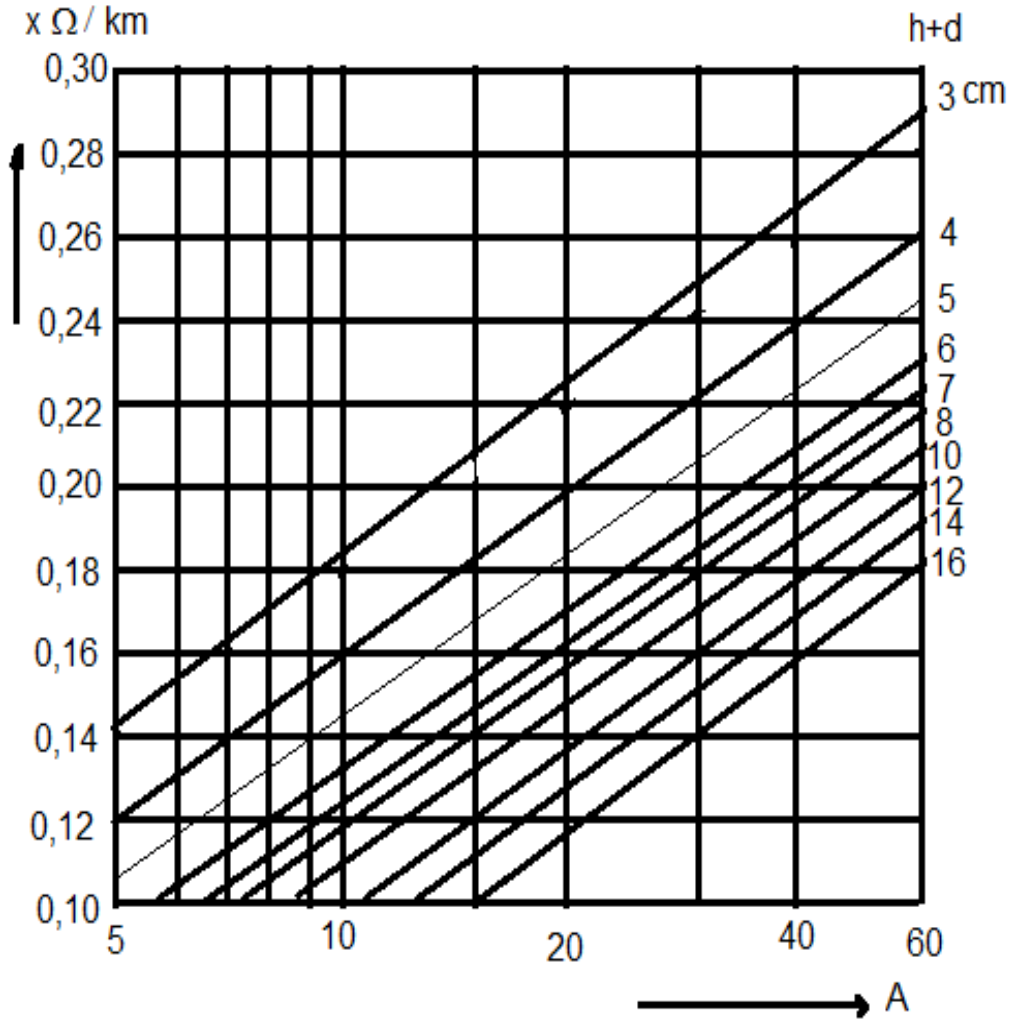
$$X = 2\Pi f L \text{ [ohm/ m]} \quad (3.28)$$

ifadesi elde edilir.



Şekil 3.12. Baraların montaj tertibi

Dikdörtgen kesitli baraların faz km. başına endüktif reaktans değerleri ($f=50$ Hz) Şekil 3.13' teki gibidir.



Şekil 3.13. Dikdörtgen kesitli baraların faz km. başına endüktif reaktans değerleri.

3.3.4. Transformatör empedansları

3.3.4.1. İki sargılı transformatör empedansları

Kısa devre hesaplarında transformatör empedanslarının çok önemli bir yeri vardır ve ihmal edilmez büyüklükte sonuçlar oluştururlar. İki sargılı transformatörlerin empedansı (Z_{TR}), omik direnci (R_{TR}) ve endüktif reaktansı (X_{TR}), söz konusu transformatörün karakteristik değerlerinden yararlanarak

$$Z_{TR} = \frac{U_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{TR}} \text{ [ohm / faz]} \quad (3.29)$$

$$R_{TR} = \frac{U_R \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{TR}} = \frac{P_{kcu}}{3 \cdot I_n^2} \text{ [ohm / faz]} \quad (3.30)$$

$$X_{TR} = \frac{U_X \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{TR}} \text{ [ohm / faz]} \quad (3.31)$$

ifadelerinden hesaplanır.

Yüzde olarak kısa devre bağlı kaçak gerilimi

$$U_X = \sqrt{U_k^2 - U_R^2} \quad (3.32)$$

eşitliğinden bulunabilir.

Şayet U_R değeri verilmemişse, P_{kcu} transformatörün anma akımındaki bakır kayıpları olmak üzere, bu değer;

$$U_R = 100 \frac{P_{kcu}}{U_n} \quad (3.33)$$

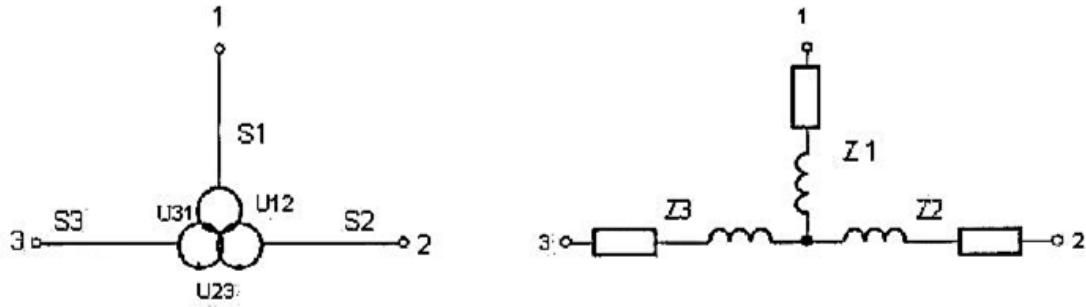
ifadesi kullanılarak hesaplanır.

$U_k > \%5$ ise, U_R ihmal edilerek $U_k = U_X$ alınabilir. Genel olarak büyük güçlü transformatörlerde omik direnç (R_{TR}) ihmal edilmektedir. Transformatörlerin karakteristik değerleri üretici firmaların kataloglarından veya doğrudan transformatörün etiketinden alınabilir (Küçük, 2005).

3.3.4.2. Üç sargılı transformatör empedansları

Elektrik tesislerinde, genelde elektrik üretim merkezlerinde üç sargılı transformatörlerle karşılaşmak mümkündür. Üçüncü sargı iç ihtiyacı karşılamak için kullanılır. Şekil 3.14’ te üç sargılı bir transformatör ve yıldız eşdeğer diyagramı gösterilmiştir.

Üç sargılı transformatörlerin empedans değerlerinin hesabı, iki sargılı transformatörlerdeki gibi basit değildir. Şekil 3.14’te yıldız eşdeğer diyagramı verilen üç sargılı transformatörün geçiş empedansları, pozitif ve negatif bileşen devreler için transformatörün karakteristik değerleri kullanılarak;



Şekil 3.14. Üç sargılı bir transformatör ve yıldız eşdeğer diyagramı.

$$Z_{12} = \frac{u_{k12} U_n^2}{100.S_{12}} \text{ [ohm / faz]} \quad (3.34)$$

$$Z_{13} = \frac{u_{k13} U_n^2}{100.S_{13}} \text{ [ohm / faz]} \quad (3.35)$$

$$Z_{23} = \frac{u_{k23} U_n^2}{100.S_{23}} \text{ [ohm / faz]} \quad (3.36)$$

eşitliklerinden hesaplanır.

Yıldız eşdeğer devredeki empedanslar ise, geçiş empedanslarından yararlanılarak;

$$Z_1 = \frac{1}{2} [Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}] \quad (3.37)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} [Z_{23} + Z_{12} + Z_{13}] \quad (3.38)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} [Z_{13} + Z_{23} + Z_{12}] \quad (3.39)$$

ifadelerinden bulunur.

(3.37), (3.38) ve (3.39) no'lu ifadelerdeki empedanslar negatif işaretli elemanlar dolayısıyla negatif çıkabilir, İşaret önemsizdir.

Üç sargılı transformatörün direnç değerleri çok küçük olduğundan ihmal edilebilir (Küçük, 2005).

3.3.5. Reaktans (Self) bobinleri –akım sınırlayıcı reaktörlerin empedansları

Reaktans (self), orta ve uzun hatlarda, hattın yüklenebilirliğini arttırmak ve hat gerilimlerini nominal değere yakın tutmak için kullanılır. Şönt reaktörler (endüktanslar) yüksek gerilim hattı boyunca seçilen noktalarda her bir faz ile toprak arasına bağlanırlar. Endüktanslar reaktif gücü emerler ve hafif yük koşullarında meydana gelebilecek aşırı gerilimleri azaltıcı etki yaparlar. Bunlar aynı zamanda açma-kapama olaylarında ve yıldırım düşmesi sonucu hatlarda meydana gelen geçici aşırı gerilim genliklerini de azaltırlar. Ancak şönt reaktör; tam yükte devreden çıkarılamaz ise, hattın yüklenebilirliğini de azaltır (Arifoğlu, 2002).

Reaktans bobinlerin, endüktif reaktans değeri;

$$X_B = \frac{U_B U_n^2}{100.S_B} = \frac{U_B U_n}{100.\sqrt{3}.I_B} \text{ [ohm / faz]} \quad (3.40)$$

ifadesinden yararlanarak hesaplanır.

Reaktans bobinin direnç değerleri, şayet $R_B/X_B \approx 0.03$ veya daha küçük ise hesaplarda ihmal edilir (Küçük, 2005).

3.3.6. Senkron generatör empedansları

Kısa devre hesaplarında çok yoğun şekilde kullanılan Subtransiyent (başlangıç) reaktansı, üretici firmalar tarafından genelde anma empedansının ($Z_n=V_n/I_n$) yüzdesi olarak verilir ve bu tanım

$$x'' = 100 X_d'' = 100 \cdot 3 \cdot I_n X_d'' \quad (3.41)$$

şeklinde ifade edilir.

(3.41) no'lu eşitlikten yararlanarak generatörün kısa devre hesaplarında kullanılan reaktansı

$$X_d'' = \frac{x_d'' U_n^2}{100 \cdot S_G} \text{ [ohm/faz]} \quad (3.42)$$

ifadesinden bulunur.

Senkron generatörün omik direnç değerleri ise;

$$U_G > 1 \text{ kV ve } S_G \geq 100 \text{ MVA için } R_G = 0,05 X_d''$$

$$U_G > 1 \text{ kV ve } S_G < 100 \text{ MVA için } R_G = 0,07 X_d''$$

$$U_G < 1 \text{ kV için } R_G = 0,15 X_d''$$

olarak alınabilir (Anonim, 2006)

Endüvi sargısının omik direnci (R_G), $R_G / X_d'' \gg 0,03$ ve daha küçük ise hesaplarda ihmal edilir.

Generatörlerin (3.41) no'lu eşitlikte verilen reaktansında meydana gelen gerilim düşümünün, nominal geriliminin yüzdesi olarak ifade edilen değeri (u_d), yüzde olarak ifade edilen bağıl başlangıç reaktansına (x_d'') eşittir.

Aynı Subtransiyent reaktansa sahip, farklı güçteki paralel generatörler şayet kısa bir bağlantıya sahip iseler, bütün generatörlerin toplam gücüne eşit tek bir generatör gücü ile temsil edilebilirler (Küçük, 2005).

3.3.7. Eşdeğer şebeke empedansları

Genelde çok çeşitli güç ve gerilimdeki elektrik tüketicileri, bu taleplerini çok sayıda üretim ünitesinin beslediği ulusal elektrik şebekesinden karşılarlar. Buna karşın çeşitli nedenlerden dolayı, ulusal elektrik şebekesi ile hiçbir elektriksel bağlantının olmadığı lokal ya da yöresel olarak kurulan santrallerden taleplerini karşılayan tüketici grupları (bu bir sanayi tesisi, köy veya bir grup işletme vb. olabilir) da bulunmaktadır. İkinci grup tüketicilerin yararlandığı elektrik şebekesinin boyutlarının küçük olması dolayısıyla, üretim merkezindeki ve bu merkez ile tüketiciler arasındaki bütün tesis elemanlarının karakteristikleri bilinir. Dolayısıyla tesisin herhangi bir noktasında oluşacak kısa devre hesabını yapmak ve buna göre gerekli tedbirleri almak kolaydır.

Ulusal elektrik şebekesindeki, çok sayıda üretim üniteleri, transformatörler ve bağlantı hatlarından oluşan tesis elemanlarının karakteristik değerlerini bilmek ve böylesi karışık bir şebekenin herhangi bir noktasındaki kısa devre hesabını yapmak bir tüketici için çok zor, hatta imkânsızdır. Şebekenin bu tür hesaplarını şebekeyi işleten kuruluş ancak çok

özel programlar ve metotlar kullanarak belirli periyotlarda yapar ve bunları bültenlerinde yayımlarlar.

Ulusal elektrik şebekesine bağlı veya bağlanacak bir tüketici kendi şebekesinde bir kısa devre hesabı yapacaksa, yukarıda belirtilen kurumun yaptığı çalışmalardan yararlanır. Bültenlerde tüketicilerin ulusal elektrik şebekesine bağlandığı noktadaki başlangıç kısa devre alternatif akım gücü veya akımı verilir. Bu değerden yararlanarak, bağlantı noktasından önceki şebekenin eşdeğer şebeke reaktansı bulunur ve bu noktadan sonraki hatların, transformatörlerin vb. tesis elemanlarının reaktansları ilave edilmek suretiyle istenen noktadaki kısa devre akımları ve güçleri hesaplanabilir.

Sonuç olarak; ulusal elektrik şebekesinin herhangi bir noktasındaki başlangıç kısa devre gücü bilirse, bu noktadan önceki şebekenin eşdeğer reaktansı bulunur (Küçük, 2005).

Başlangıç kısa devre gücü $S''_k = 3 \cdot U_n I''_k$ olduğu bilindiğine göre, bu eşitlikten I''_k

$$I''_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (3.43)$$

ifadesinde yerine konur ve ifade reaktans değeri için düzenlenirse

$$X_{\text{şeb}} = \frac{U_n^2}{S''_k} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_k} \quad (3.44)$$

elde edilir.

35 kV un üzerindeki havai hat şebekeleri için

$$Z_{\text{şeb}} = X_{\text{şeb}} \quad (3.45)$$

alınabilir.

35 kV a kadar olan şebekelerde, şayet yeterli bilgi yoksa;

$$X_{\text{şeb}} = 0.995 \cdot Z_{\text{şeb}} \quad (3.46)$$

$$R_{\text{şeb}} = 0.1 \cdot X_{\text{şeb}} \quad (3.47)$$

alınarak hesaplar yapılabilir.

Genelde şebekenin eşdeğer sıfır bileşen kısa devre empedansı (reaktansı), arada sıfır bileşen devreler için izole transformatörler bulunduğu hesaplarda dikkate alınmaz.

3.4. Eşdeğer Gerilim Kaynağı

Kısa devre hesaplarında, kısa devrenin olduğu noktadaki gerilimin o andaki değerinin farklı olması ve tam olarak ortaya konulamaması nedeniyle sistemin yapısına uygun bir eşdeğer gerilim kaynağının belirlenmesi gerekir. Bu eşdeğer kaynak; kısa devre anındaki generatörlerin uyarmasını, statik yüklerin etkisini ve transformatörlerin kademe pozisyonlarını hesaba katar.

Kısa devre anında sistemde sadece eşdeğer gerilim kaynağı aktif olup, bütün fiderler senkron ve asenkron makineler iç empedansları ile temsil edilirler. Kısa devre hesaplarında sadece kısa devre noktasında bir kaynak olduğu kabul edilerek, diğer bütün kaynaklar kısa devre edilir ve bu eşdeğer gerilim kaynağının arızayı beslediği düşünülür.

Eşdeğer gerilim kaynağının değeri;

$$V_f = \frac{C.U_n}{\sqrt{3}} \quad (3.49)$$

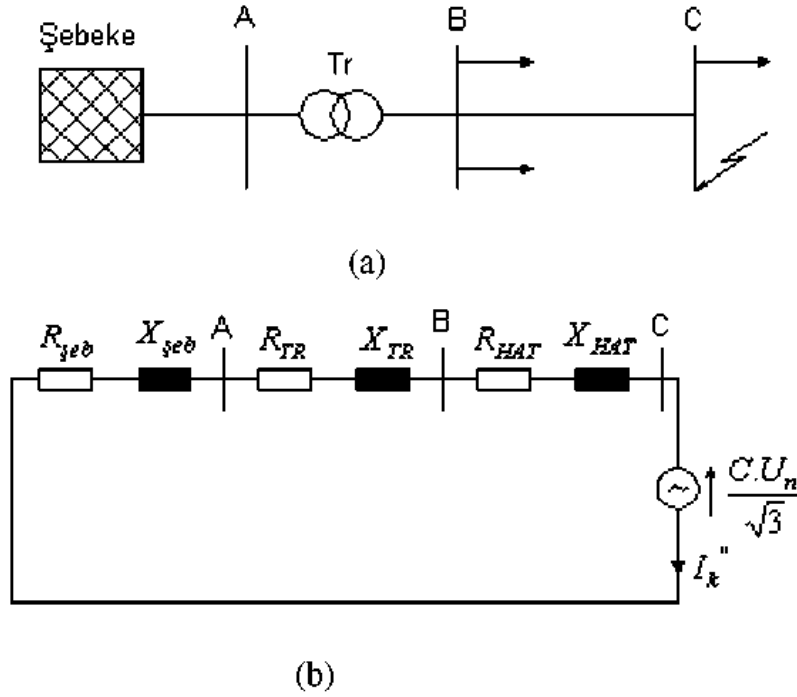
olup, U_n sistemin nominal işletme gerilimini (fazlar arası), C ise gerilim faktörünü göstermektedir. Gerilim faktörünün değeri şayet ulusal bir standart yoksa Çizelge 3.3' ten maksimum ve minimum kısa devre akımlarının hesaplanması için ayrı ayrı bir değer seçilir.

Tablo 3.3. Maksimum ve minimum kısa devre akımlarının hesaplanmasında kullanılan gerilim faktörleri (C).

Nominal gerilim	C max	C min
Alçak gerilim 100 V ÷ 1000 V (IEC Puplicatıon 38,Tablo I) a- 230 V / 400 V b- Diğer gerilimler	1.00 1.05	0.95 1.00
Orta gerilim > 1 kV ÷ 35 kV (IEC Puplicatıon Tablo II)	1.10	1.00
Yüksek gerilim > 35 kV ÷ 230 kV (IEC Puplicatıon Tablo IV)	1.10	1.00

Şekil 3.15/a' da tek hat diyagramı verilen bir sistemin C barasında meydana gelebilecek bir arızada başlangıç kısa devre akımının hesaplanması için şekil 3.15/b' de

pozitif bileşen devre diyagramı ve arıza noktasında var olduğu düşünülen eşdeğer gerilim kaynağı gösterilmiştir. Şekil 3.15/b' den görüldüğü gibi arıza noktasındaki eşdeğer gerilim kaynağı bütün kaynaklar kısa devre edilmiş, fiderler, hatlar, transformatör gibi statik devre elemanları pozitif bileşen empedansları ile gösterilmiştir (Küçük, 2005)



Şekil 3.15. a) Enterkonnekte şebekeden bir transformatör üzerinden beslenen tüketici grubunun tek hat diyagramı. b) C barasında meydana gelebilecek bir kısa devrenin hesaplanması için eşdeğer gerilim kaynağının da gösterildiği eşdeğer devre.

3.5. Simetrik Bileşenler

Üç fazlı alternatif akım sistemleri sadece teoride dengelidir. Pratikte çok özel durumlar dışında dengeli bir sisteme rastlamak pek mümkün değildir.

Üç fazlı simetrik kısa devre dışında ki arıza hallerinde akım ve gerilim değerlerinin hesaplanması, klasik hesap metotları ile zordur ve çok zaman alır. Sistemin biraz büyük olması halinde hesapların içinden çıkılmaz olur.

Fortescue' nun simetrik bileşenler metodu, çok fazlı sistemlerin basitleştirilerek incelenmesi amacı ile geliştirilmiş ve özellikle üç fazlı sistemlere uygulanması ile yaygınlık kazanmıştır (Arifoğlu, 2002).

Bu metoda göre dengesiz üç fazlı sistemin her bir fazörü, üç fazlı bir sistem için üç farklı ve kendi aralarında dengeli pozitif, negatif ve sıfır bileşen fazörlerin vektörel toplamıdır.

1- Pozitif Doğru Bileşen Sistemi; Üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir. Bu fazörler arasındaki faz farkı 120° dir. Fazörlerin faz sırası, orijinal fazörlerin faz sırasındadır.

2- Negatif (Ters) Bileşen Sistemi; Üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir. Fazörler arasındaki faz farkı 120° dir. Fazörlerin faz sırası orijinal fazörlere tam ters faz sırasındadır.

3- Sıfır Bileşen Sistemi; Üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir. Fazörler arasındaki faz farkı 0° dir (Grainger ve Stevenson, 1994).

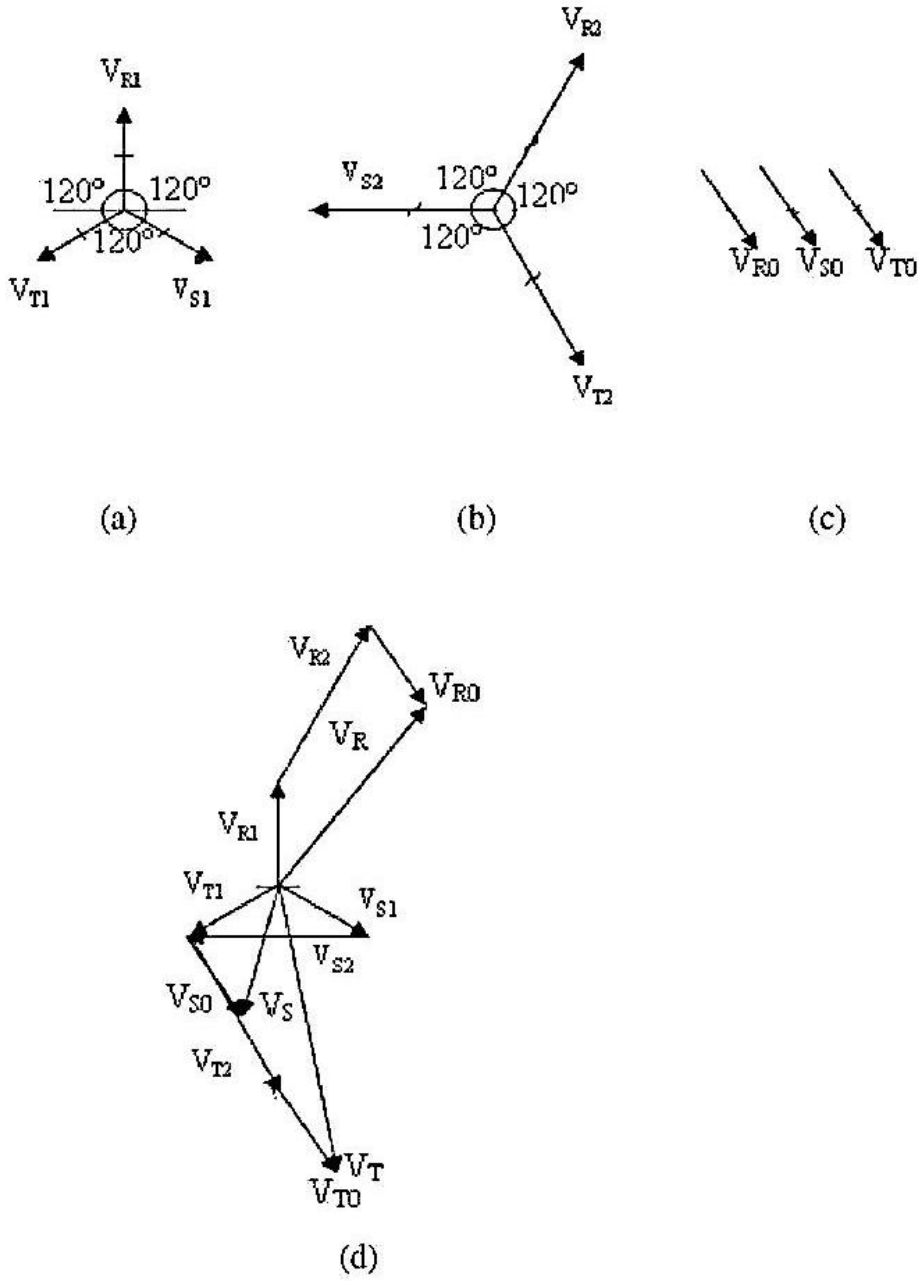
Bu çalışmada, doğru, ters ve sıfır bileşen sistemleri birçok kaynakta gösterildiği gibi, sırasıyla 1, 2 ve 0 indisleri ile gösterilecektir.

Üç fazlı dengesiz bir sistemdeki V_R , V_S ve V_T gerilim fazörleri simetrik bileşen fazörlerin vektörel toplamı olarak

$$\begin{aligned}\underline{V}_R &= \underline{V}_{R1} + \underline{V}_{R2} + \underline{V}_{R0} \\ \underline{V}_S &= \underline{V}_{S1} + \underline{V}_{S2} + \underline{V}_{S0} \\ \underline{V}_T &= \underline{V}_{T1} + \underline{V}_{T2} + \underline{V}_{T0}\end{aligned}\tag{3.49}$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil 3.16'da üç fazlı bir elektrik sisteminde, üç dengesiz fazörün dengeli üç grup fazörden meydana gelen faz gerilimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Üç fazlı dengesiz bir sistemin a) pozitif. b) Negatif. c) sıfır bileşen gerilim fazörleri d) bunların toplamından meydana gelen dengesiz gerilim fazörleri.

3.5.1. Simetrik bileşenlerde “a” operatörü

Bir güç sisteminde; gerilimler ve akımların simetrik bileşenlerindeki fazörlerin arasındaki 120° faz farkını kolayca işaretleyebilmek için, kısa bir gösterilişin bulunması uygun olacaktır. İki kompleks sayının çarpımının, bu sayıların mutlak değerleri çarpımı ve açılarının toplamı sonucunu verdiğinden; bir kompleks sayı fazör olarak gösterilmek istenirse, bu kompleks sayı $1 \angle \theta$ kompleks sayısı ile çarpılır. Sonuç olarak elde edilen

kompleks sayı, orijinal fazöre eşit fakat θ açısı kadar saat ibresinin tersi yönünde döndürülmüş bir fazörü gösterecektir. O halde $1\angle\theta$ kompleks sayısı bir operatördür ve fazörü saat ibresinin tersi yönünde θ açısı kadar döndürür.

Bir fazörü saat ibresinin tersi yönünde 120° döndüren operatör ise “a” harfi ile bilinir. O halde, bir fazörü saat ibresinin tersi yönünde 120° döndürülmek istenirse o fazörün a operatörü ile çarpılması yeterli olur.

Bu operatör birim büyüklükte kompleks bir büyüklük olup,

$$a = 1\angle 120^\circ \quad (3.50)$$

şeklinde gösterilir. a operatörü polar formda yukarıdaki gösterimden faydalanılarak

$$a = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ \quad (3.51)$$

şeklinde de yazılabilir.

a operatörünün katları

$$a \cdot a = a^2 = 1\angle 240^\circ \quad (3.52)$$

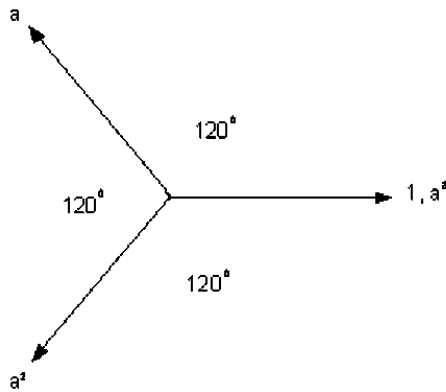
$$a^2 \cdot a = a^3 = 1\angle -120^\circ = 1\angle 120^\circ = 1 \quad (3.53)$$

olup,

$$1 + a + a^2 = 0 + j0 \quad (3.54)$$

bulunur.

Şekil 3.17’de a operatörünün değişik kuvvetler için fazör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.17. “a” operatörünün değişik kuvvetleri için fazör diyagramı.

3.5.2. Simetrik bileşenlerde gerilimler

Fazları sırası ile R, S ve T olan üç fazlı bir sistemin gerilim fazörlerinin pozitif, negatif ve sıfır bileşenleri R fazı referans alınarak gösterilişi

R-FAZI S-FAZI T-FAZI

$$\underline{V}_{R0} \quad \underline{V}_{S0} = \underline{V}_{R0} \quad \underline{V}_{T0} = \underline{V}_{R0} \quad (3.55)$$

$$\underline{V}_{R1} \quad \underline{V}_{S1} = a^2 \underline{V}_{R1} \quad \underline{V}_{T1} = a \underline{V}_{R1} \quad (3.56)$$

$$\underline{V}_{R2} \quad \underline{V}_{S2} = a \underline{V}_{R2} \quad \underline{V}_{T2} = a^2 \underline{V}_{R2} \quad (3.57)$$

faz gerilimleri, simetrik bileşenlerin toplamı olarak;

$$\underline{V}_R = \underline{V}_{R0} + \underline{V}_{R1} + \underline{V}_{R2} \quad (3.58)$$

$$\underline{V}_S = \underline{V}_{R0} + a^2 \underline{V}_{R1} + a \underline{V}_{R2} \quad (3.59)$$

$$\underline{V}_T = \underline{V}_{R0} + a \underline{V}_{R1} + a^2 \underline{V}_{R2} \quad (3.60)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu ifadeler kullanılarak R fazının simetrik bileşen gerilimleri, şebeke gerilimleri cinsinden;

$$\underline{V}_{R0} = 1/3 (\underline{V}_R + \underline{V}_S + \underline{V}_T) \quad (3.61)$$

$$\underline{V}_{R1} = 1/3 (\underline{V}_R + a \underline{V}_S + a^2 \underline{V}_T) \quad (3.62)$$

$$\underline{V}_{R2} = 1/3 (\underline{V}_R + a^2 \underline{V}_S + a \underline{V}_T) \quad (3.63)$$

şeklinde yazılabilir.

\underline{V}_{R0} eşitliğinden de rahatlıkla görüldüğü gibi, sistem dengeli olursa şebeke gerilimlerinin vektörel toplamı sıfırdır ve bu yüzden sistemde sıfır bileşen mevcut değildir. Yukarıdaki eşitlikler matris formunda şu şekilde gösterilir.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_S \\ \underline{V}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{R0} \\ \underline{V}_{R1} \\ \underline{V}_{R2} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{R0} \\ \underline{V}_{S1} \\ \underline{V}_{T2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_S \\ \underline{V}_T \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Diğer fazların bileşen gerilim değerlerini bulmak için (3.55), (3.56) ve (3.57) no'lu eşitliklerden yararlanır.

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$[\underline{V}_{RST}] = \begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_S \\ \underline{V}_T \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

$$[\underline{V}_{012}] = \begin{bmatrix} \underline{V}_{R0} \\ \underline{V}_{R1} \\ \underline{V}_{R2} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

olmak üzere yukarıdaki eşitlikler daha kısa formda

$$[\underline{V}_{RST}] = [A]^{-1} [\underline{V}_{012}] \quad (3.70)$$

$$[\underline{V}_{012}] = [A] [\underline{V}_{RST}] \quad (3.71)$$

olarak yazılabilir.

3.5.3. Simetrik bileşenlerde akımlar

Gerilimler için yazılan eşitliklere benzer eşitlikler akımlar için, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{R0} \\ \underline{I}_{S1} \\ \underline{I}_{R2} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{R0} \\ \underline{I}_{R1} \\ \underline{I}_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Akımlar için yukarıda matris formunda yazılan eşitlikler daha kısa formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[\underline{I}_{RST}] = [A][\underline{I}_{012}] \quad (3.74)$$

$$\underline{I}_{012} = [A]^{-1} [\underline{I}_{RST}] \quad (3.75)$$

Üç fazlı bir sistemde akımların vektörel toplamı, sistem dengeli ise sıfırdır. Şayet bir dengesizlik söz konusu ve sistemde nötr iletkeni var ise, nötr iletkeninden bir akım akar ve değeri

$$\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = \underline{I}_N \quad (3.76)$$

ifadesinden bulunur.

Yukarıda akımlar için yazılan matris eşitliklerinden yararlanarak

$$\underline{I}_{R0} = 1/3(\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T) \quad (3.77)$$

$$3\underline{I}_{R0} = \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = \underline{I}_N \quad (3.78)$$

$$\underline{I}_N = 3\underline{I}_{R0} \quad (3.79)$$

elde edilir.

Bu son ifadeden de görüldüğü gibi nötr iletkeni olmayan, örneğin üçgen (Δ) bağlı sistemlerde sıfır (homopolar) bileşen akımı akmaz.

3.6. Per – Unit Değerler

Devre hesapları gerçek değerlerle yapılabildiği gibi, bunları temsil eden Per-Unit değerlerle de yapılabilirler. Hesaplamaların herhangi bir kademesinde arzu edilirse gerçek değerlere dönmek her zaman için mümkündür (Çakır, 1986).

Gerçek bir elektriksel değer, referans (Baz) olarak seçilen bir değere oranı elektrik mühendisliğinde “per-unit (pu)” ifadesi olarak kabul görmüş olup, bunun 100 katı ise % olarak adlandırılmıştır.

$$\text{Per-unit} = \frac{\text{Gerçek Değer}}{\text{Baz olarak alınan değer}} \quad (3.80)$$

$$\% \text{Değer} = 100 \cdot (\text{per-unit}) \quad (3.81)$$

Elektrik sistemlerinin per-unit cinsinden hesaplanması, yapılan işi oldukça basitleştirir. Metodun bazı üstünlükleri kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Şebeke analizleri, eşdeğer devrede verilen empedansların normal sistemdeki gerilim çeşitliliğine bakılmaksızın birbirine ilave edilebilmesi nedeniyle oldukça basitleşir.
- $\sqrt{3}$ faktörü üç fazlı sistem hesaplarında hiç bir şekilde kullanılmamaktadır.
- Elektriksel cihazların işletme karakteristiklerindeki farklılıklar pu olarak ifade edilen sabitlerin karşılaştırılması ile belirlenebilir.
- Elektrik cihazlarının nominal değerleri ne kadar farklı olsa da pu değerleri birbirine çok yakın olup, hesaplarda rahatlıkla kullanılacak değerler bulunabilir.
- Benzer elektrikli cihazların parametreleri oldukça dar bir bölgeye düştüğünden makine sabitleri ortalama olarak bulunabilir.
- Farklı sistemlerdeki gerilim düşümü, güç kaybı gibi değerleri karşılaştırmak çok kolaydır.

Elektrik sistemindeki elemanların (Generatör, Transformatör, Motor vb.) empedans değerleri yaygın olarak % şeklinde verilirken, hesaplar genelde per-unit değerler ile yapılır.

Akım, gerilim, güç ve empedans büyüklüklerinin birbirleri ile ilişkisi nedeniyle herhangi ikisinin (yaygın olarak gerilim ve güç) baz olarak alınması halinde, geriye kalan diğer ikisi kolaylıkla hesaplanabilir. Baz değer olarak seçilen büyüklükler kullanılarak, diğer baz değerler 1 fazlı ve 3 fazlı şebekeler için ayrı ayrı hesaplanabilir.

3.6.1. Bir fazlı şebekelerde per-unit değerlerin hesaplanması

Bir fazlı şebekelerin herhangi bir noktasındaki güç, özellikle yaygın olarak kullanılan bir güç ile herhangi bir gerilim baz alınarak diğer iki büyüklük, akım ve empedans hesaplanabilir.

$$I_{Baz} = \frac{(S_{1\phi})_{Baz}}{V_{Baz}} [A] \quad (3.82)$$

$$Z_{Baz} = \frac{V_{Baz}}{I_{Baz}} [ohm] \quad (3.83)$$

olup, akımın yukarıda bilinen değeri son ifadede yerine konularak

$$Z_{Baz} = \frac{(V_{Baz})^2}{(S_{1\phi})_{Baz}} [ohm] \quad (3.84)$$

olarak bulunur.

Diğer taraftan hesaplarda gerektiğinde

$$(S_{1\phi})_{Baz} = (P_{1\phi})_{Baz} = (Q_{1\phi})_{Baz} \quad (3.85)$$

olarak alınabilir.

Bu tanıma benzer olarak empedans, direnç ve reaktans baz değerleri de birbirine eşit alınabilir.

$$Z_{Baz} = R_{Baz} = X_{Baz} \quad (3.86)$$

İster 1 fazlı isterse 3 fazlı şebekeler, olsun transformatörlerin primer ve sekonder taraftaki empedansların per-unit değerleri istisnasız birbirine eşittir.

3.6.2. Üç fazlı şebekelerde per-unit değerlerin hesaplanması

Üç fazlı şebekeler hesaplarda genelde kolaylık olsun diye, faz iletkeni ile nötr iletkeninden meydana gelmiş gibi tek devreler halinde gösterilir. Bu durumda üç fazlı verilen (güç ve gerilim) tek fazlı olarak hesaplanması gerekmektedir. Bilindiği gibi üç fazlı sistemde güç, tek fazlı sistemdeki gücün üç katı, fazlar arası gerilim ise faz-nötr geriliminin $\sqrt{3}$ katıdır. Gerçek değerlerdeki bu oran, per-unit olarak bulunan/hesaplanan değerlerde

yoktur. Yani 3 fazlı gücün, üç fazlı sistemde seçilen bir baz gücüne oranı 1 fazlı sistemdeki bir gücün bu sistemde baz gücü oranına eşittir.

$$(Per - Unit)_{1\phi} = (Per - Unit)_{3\phi} \quad (3.87)$$

Benzer şekilde 3 fazlı sistemde fazlar arası gerilimin bu sistemde seçilen fazlar arası bir baz gerilimine oranı, 1 fazlı sistemde faz-nötr geriliminin bu sistemde seçilen bir fazlı (faz-nötr) baz gerilimi oranına eşittir.

Bir fazlı alternatif akım şebekelerinde olduğu gibi, 3 fazlı alternatif akım şebekelerinde de seçilen (baz güç ve baz gerilim) değerler kullanılarak baz akım ve baz empedans değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_{Baz} = \frac{(S_{3\phi})_{Baz}}{\sqrt{3}U_{Baz}} [pu] \quad (3.88)$$

$$Z_{Baz} = \frac{U_{Baz}}{I_{Baz}} [ohm] \quad (3.89)$$

olup, akımın yukarıda bilinen değeri son ifadede yerine konularak

$$Z_{Baz} = \frac{(U_{Baz})^2}{(S_{3\phi})_{Baz}} [ohm] \quad (3.90)$$

olarak bulunur.

Diğer taraftan hesaplarda 1 fazlı şebekelerde olduğu gibi gerektiğinde

$$(S_{3\phi})_{Baz} = (P_{3\phi})_{Baz} = (Q_{3\phi})_{Baz} \quad (3.91)$$

olarak alınabilir.

Elektrik sisteminde kullanılan Generatör, Transformatör, Motor vb. elektrik teçhizatının per-unit değerleri genelde kendi nominal değerleri kullanılarak hesaplanır. Ve etiketine yazılır ya da ilgili dokümanlarla birlikte verilir. Şayet bu elemanlardan oluşan bir şebekede çeşitli amaçlar için bir hesap (gerilim düşümü, akım dağılımı, yük akışı, kısa devre) yapılacak ve sistemde seçilen baz değerler de bu elemanların baz değerlerinden farklı olacak ise, mevcut per-unit değerlerin yeni baz değerlerine göre hesaplanması gerekir. Yani şebekenin bütün elemanlarının per-unit değerlerinin aynı baz değerlerine göre olması gerekir (Küçük, 2005).

3.7. Kısa Devre Hesapları

Elektrik sistemindeki bütün tesisat elemanlarının seçilmesi ve meydana gelecek arızanın en kısa sürede sistemden izole edilebilmesi için, kısa devre hesaplarının sağlıklı bir şekilde yapılması gerekir. Bu amaçla hesaplar yapılırken;

- Kısa devre olayı esnasında, kısa devreye dâhil devrede bir değişiklik olmadığı yani üç fazlı kısa devre ise üç fazlı, faz-toprak kısa devresi ise faz-toprak kısa devresi olarak devam ettiği gibi,
- Transformatörlerin ana kademelerinde olduğu,
- Ark dirençlerinin hesaba dâhil edilmediği,
- Kısa devrenin olduğu noktada (Bkz. Bölüm 3.4) eşdeğer bir gerilim kaynağının olduğu,
- Tesisat elemanlarının doğru, ters ve sıfır bileşen empedanslarının belirlenebildiği,
- Eşdeğer empedans diyagramının gerekiyorsa dönüşümlerden yararlanarak hesaplar için basitleştirilebildiği, kabulleri yapılır.

Daha sonra ihtiyaca göre, tesisatın çeşitli noktaları için kısa devre akım hesapları ayrı ayrı yapılır.

Elektrik sistemindeki arızaların çok önemli bir kısmı dengesiz olup, çok az bir kısmı dengelidir (simetrik). Arızaların pratikte oluşma sıklığı, tesisatın yapısına, çevreye ve bölgeye göre değişse de sıralama genelde aynıdır.

Bir araştırmaya göre bu sıklık;

- | | |
|-------------------------------------|-----|
| • Üç fazlı simetrik kısa devre için | %5 |
| • Çift faz-toprak kısa devresi için | %10 |
| • Faz-faz kısa devresi için | %15 |
| • Faz-toprak kısa devresi için | %70 |

olarak belirlenmiştir.

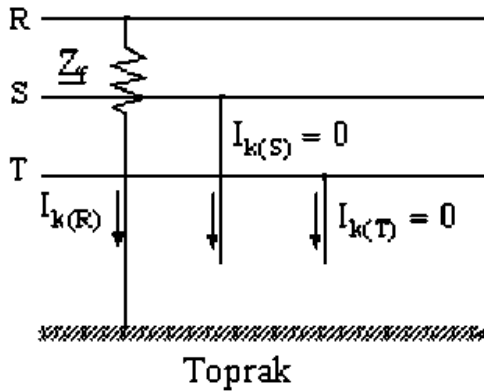
Üç fazlı simetrik kısa devre oluşumu nadirdir. Genelde operasyon hataları sonucunda oluşur (gerilim altındaki hatların yanlışlıkla topraklanması gibi). Arızaların önemli bir kısmı, başlangıçta farklı olsa da üç fazlı kısa devreye dönüşebilir. Üç fazlı simetrik (dengeli) kısa devre tesisat elemanlarının pozitif bileşen empedansları kullanılarak kolayca

bulunabildiği halde, diğer arızaların hesaplanabilmesi için arızanın tipine göre doğru, ters ve sıfır bileşen empedansların belirlenmesi, bileşen devrelerin çizilmesi gerekir.

3.7.1. Faz-toprak kısa devresi

Faz-toprak kısa devresinde faz iletkenlerinden herhangi birinin izolasyonunun bozulması veya yanlış manevralar sonucu toprağa, nötr iletkenine veya toprakla irtibatlı metalik gövdeye değmesi sonucu oluşan bir arızadır.

Şekil 3.18’de faz-toprak kısa devre arızasının genel görünüşü verilmekte olup, toprak arıza empedansı Z_f ile gösterilmektedir. Genelde arıza empedansının büyüklüğü hem net olarak ortaya konulamadığından hem de kısa devrenin büyüklüğü üzerinde çok fazla etkili olmadığından hesaplarda ihmal edilir. Arıza empedansı ark empedansı olarak da yorumlanabilir.



Şekil 3.18. Faz-toprak arızasının genel gösterimi

Şekil 3.19’da faz-toprak kısa devre arızası esnasında tesisatın Pozitif (doğru), Negatif (ters) ve Sıfır bileşen devreleri gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi doğru, ters ve sıfır bileşen akımları birbirine eşit olup,

$$I_{R0} = I_{R1} = I_{R2} = \frac{V_f \angle 0^\circ}{Z_{(0)} + Z_{(1)} + Z_{(2)} + 3Z_{(f)}} \quad (3.92)$$

şeklinde yazılır.

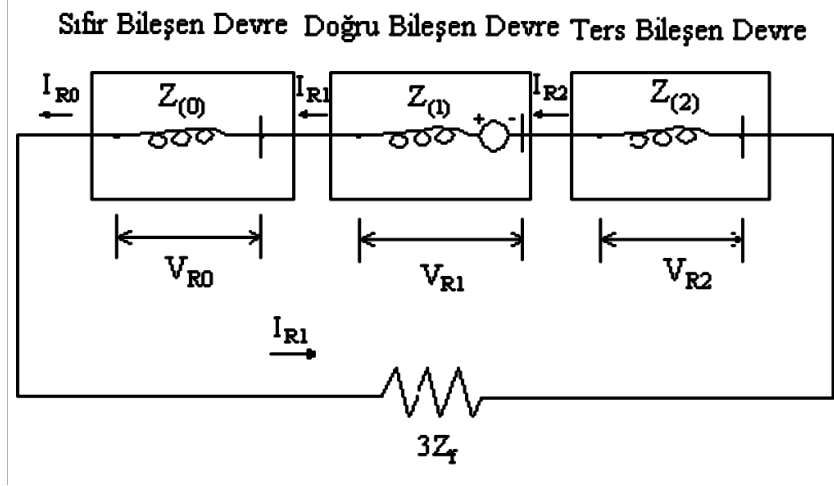
Bileşen akımlarından yararlanarak faz-toprak kısa devre arızasında faz akımları (Bkz. 3.72) matrisinden sırasıyla; R fazı için

$$I_{k1(R)} = I_{R0} + I_{R1} + I_{R2} \quad (3.93)$$

veya (3.92) eşitliğini de göz önünde bulundurarak

$$\underline{I}_{k(R)} = 3\underline{I}_{R0} = 3\underline{I}_{R1} = 3\underline{I}_{R2} \quad (3.94)$$

yazılabilir.



Şekil 3.19. Faz-toprak kısa devre arızasında doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri.

Diğer faz akımları ise benzer şekilde (Bkz. 3.72)'de verilen matristen yararlanılarak

$$\underline{I}_{k(S)} = \underline{I}_{R0} + a^2 \underline{I}_{R1} + a \underline{I}_{R2} \quad (3.95)$$

$$\underline{I}_{k(T)} = \underline{I}_{R0} + a \underline{I}_{R1} + a^2 \underline{I}_{R2} \quad (3.96)$$

yazılabilir.

$1 + a + a^2 = 0$ olduğu bilindiğinden S ve T fazlarının faz-toprak kısa devresindeki değerleri

$$\underline{I}_{k(S)} = 0 \quad (3.97)$$

$$\underline{I}_{k(T)} = 0 \quad (3.98)$$

olarak bulunur.

Kısa devre bileşen akımları kısa devre noktasında R fazının bileşen gerilimleri, V_F arıza noktasında arıza öncesi gerilim olmak üzere

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{R0} \\ \underline{V}_{R1} \\ \underline{V}_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{V}_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{R0} \\ \underline{I}_{R1} \\ \underline{I}_{R2} \end{bmatrix} \quad (3.99)$$

matrisinden yararlanarak

$$\underline{V}_{R0} = -\underline{Z}_{(0)}\underline{I}_{R0} \quad (3.100)$$

$$\underline{V}_{R1} = \underline{V}_F - \underline{Z}_{(1)}\underline{I}_{R1} \quad (3.101)$$

$$\underline{V}_{R2} = -\underline{Z}_{(2)}\underline{I}_{R2} \quad (3.102)$$

olarak bulunur.

Böylece arıza noktasında R fazının toprağa karşı gerilimi

$$\underline{V}_R = \underline{V}_F - \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{I}_{R1} \quad (3.103)$$

şeklinde elde edilir.

Faz-toprak kısa devresinde diğer fazların gerilimleri simetrik bileşenlerden yararlanılarak

$$\underline{V}_S = \underline{V}_{R0} + a^2\underline{Z}_{R1} + a\underline{V}_{R2} \quad (3.104)$$

$$\underline{V}_T = \underline{V}_{R0} + a\underline{Z}_{R1} + a^2\underline{V}_{R2} \quad (3.105)$$

şeklinde bulunur.

Şayet arıza empedansı $Z_F = 0$ olursa

$$\underline{I}_{k1(R)} = \frac{\underline{V}_F \angle 0^\circ}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (3.106)$$

bulunur. Bu durumda

$$\underline{V}_R = 0 \quad (3.107)$$

olur.

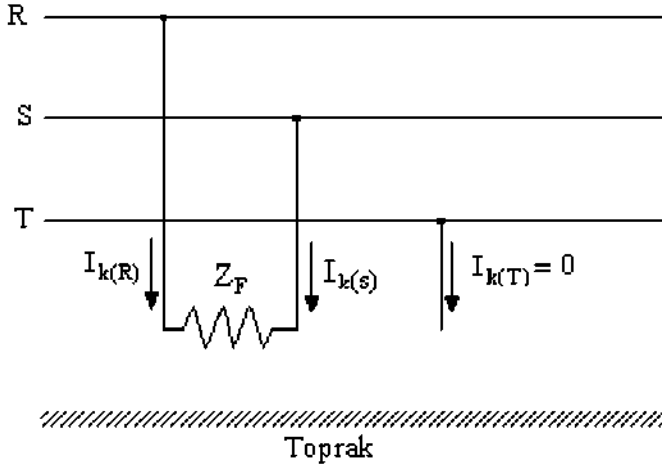
Faz-toprak kısa devre arızasında arızalı iletkenin toprağa akan kısa devre akımı genel olarak

$$\underline{I}_{k1} = \frac{\underline{V}_F \angle 0^\circ}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}}$$

şeklinde gösterilir.

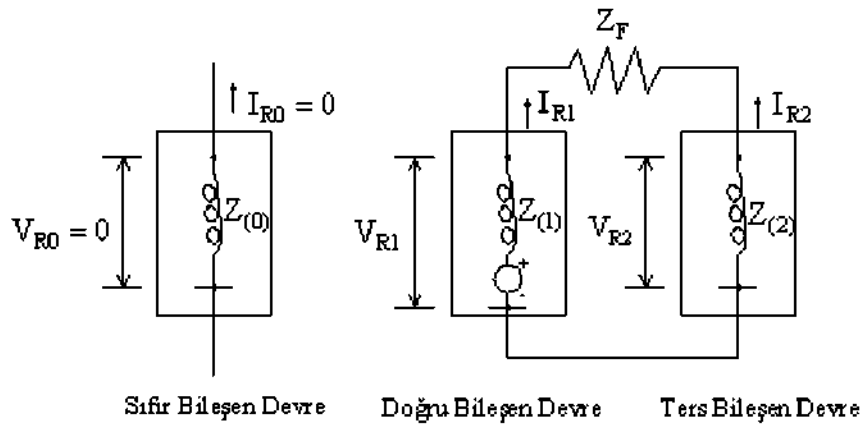
3.7.2. Faz-faz kısa devresi

Faz-faz kısa devresi genelde iki iletken arasındaki izolasyonun bozulması, çok nadir olarak da yanlış bağlantılar veya manevralar sonucu oluşan bir arıza şeklidir. Şekil 3.20’de faz-faz kısa devre arızasının genel görünüşü verilmiş olup, iletkenler arasındaki arıza empedansı yine Z_F ile gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Faz-faz kısa devre arızasının genel gösterimi.

Şekil 3.21’de faz- faz kısa devre arızası esnasında tesisatın; doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri gösterilmektedir. Şekil 3.21’de görüldüğü gibi arızaya dahil olmayan R fazının akımı (normal hat akımı, kısa devre akımı yanında çok küçük olduğundan) sıfır iken, kısa devre olan R ve S fazlarının kısa devre akımları yönleri ters olmakla beraber mutlak değer olarak birbirlerine eşittir.



Şekil 3.21. Faz-faz kısa devre arızasının doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri.

Yani

$$\underline{I}_{K2(T)} = 0 \quad (3.109)$$

$$\underline{I}_{K2(R)} = -\underline{I}_{K2(S)} \quad (3.110)$$

Bu durumda, kısa devre olan faz iletkenleri arasında arıza empedansından dolayı oluşan gerilim

$$\underline{V}_{RS} = \underline{V}_R - \underline{V}_S = \underline{Z}_F \underline{I}_{K2(S)} \quad (3.111)$$

dir.

Şekil 3.21'den yararlanarak bileşen akımları

$$\underline{I}_{R0} = 0 \quad (3.112)$$

$$\underline{I}_{R1} = -\underline{I}_{R2} = \frac{\underline{V}_F \angle 0^\circ}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_F} \quad (3.113)$$

olarak yazılır.

Bileşen akımlardan yararlanarak faz-faz kısa devre arızasında fazların kısa devre akımları (Bkz. 3.72) matrisinden yararlanılarak sırasıyla;

$$\underline{I}_{K2(T)} = 0 \quad (3.114)$$

$$\underline{I}_{K2(R)} = \underline{I}_{K2(S)} = \sqrt{3} \underline{I}_{R1} \angle 90^\circ \quad (3.115)$$

olarak bulunur.

Kısa devre bileşen akımları (3.112) ve (3.113) no'lu eşitliklerden belirlenebildiğinden, kısa devre noktasında R fazının bileşen gerilimleri, V_F arıza noktasında arıza öncesi gerilim olma

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{R0} \\ \underline{V}_{R1} \\ \underline{V}_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{V}_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{R0} \\ \underline{I}_{R1} \\ \underline{I}_{R2} \end{bmatrix} \quad (3.116)$$

matrisinden

$$\underline{V}_{R0} = 0 \quad (3.117)$$

$$\underline{V}_{R1} = \underline{V}_F - \underline{V}_1 \underline{I}_{R1} \quad (3.118)$$

$$\underline{V}_{R2} = \underline{Z}_2 \underline{I}_{R2} = \underline{Z}_2 \underline{I}_{R1} \quad (3.119)$$

şeklinde bulunur.

Faz gerilimleri ise, daha önce bulunan simetrik bileşenlerden yararlanılarak

$$\underline{V}_R = \underline{Z}_F + \underline{I}_{R1} \underline{Z}_2 - \underline{Z}_1 \quad (3.120)$$

$$\underline{V}_S = a^2 + \underline{I}_{R1} a \underline{Z}_2 - a^2 \underline{Z}_1 \quad (3.121)$$

$$\underline{V}_T = a + \underline{I}_{R1} a^2 \underline{Z}_2 - a \underline{Z}_1 \quad (3.122)$$

şeklinde yazılır.

Faz-faz kısa devre arızasında, R ve S fazları arasındaki gerilim

$$U_{RS} = V_R - V_S \quad (3.123)$$

eşitliğinden, daha önce bulunan değerlerin yerine konmasıyla

$$U_{RS} = \sqrt{3} V_{R1} \angle 300^\circ + V_{R2} \angle -300^\circ \quad (3.124)$$

olarak elde edilir.

Fazlar arası diğer gerilimler benzer şekilde

$$\underline{U}_{ST} = \sqrt{3} \underline{V}_{R1} \angle -90^\circ + \underline{V}_{R2} \angle -150^\circ \quad (3.125)$$

olarak bulunur.

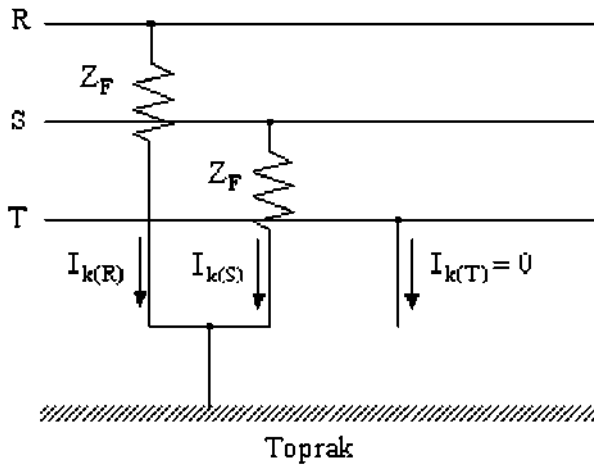
Faz-faz kısa devre arızasında; kısa devre olan iletkenler arasında akan kısa devre akımları mutlak değer olarak birbirine eşit olup, arıza empedansı $Z_F = 0$ alınmasıyla

$$\underline{I}_{k2} = \frac{\underline{V}_F \angle 0^\circ}{\underline{I}_1 + \underline{Z}_2} \quad (3.126)$$

şeklinde gösterilir.

3.7.3. İki faz-toprak kısa devresi

İki faz-toprak kısa devre arızası, sık karşılaşılmamakla birlikte iki iletkenin direkt toprakla ya da toprakla irtibatlı nötr veya koruma iletkeni ile temas etmesi, çok nadir olarak ta yanlış bağlantılar veya manevralar sonucu oluşan bir arıza şeklidir. Şekil 3.22’de iki faz-toprak kısa devre arızasının genel görünüşü verilmekte olup, iletkenler ile toprak arasındaki arıza empedansı yine Z_F ile gösterilmektedir.



Şekil 3.22. İki faz-toprak kısa devre arızasının genel gösterimi.

İki faz-toprak kısa devre arızası şekil 3.22’de gösterildiği gibi R ve S fazları ile toprak arasında meydana gelmişse

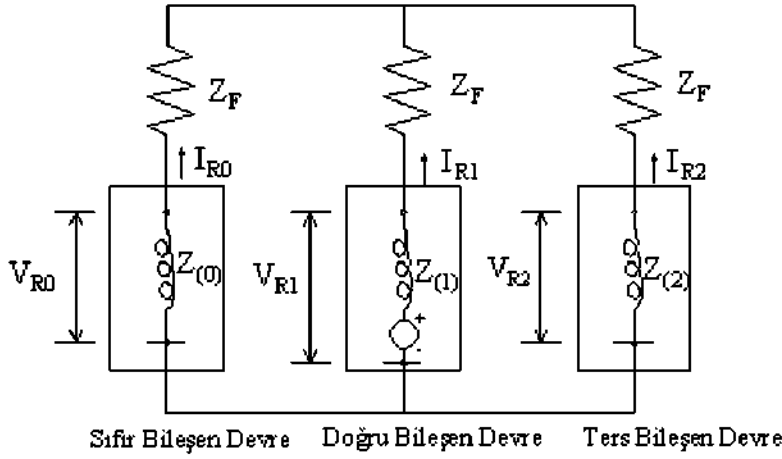
$$\underline{I}_{k2t(T)} = 0 \quad (3.127)$$

$$\underline{V}_R = \underline{Z}_f \underline{I}_{k2t(R)} \quad (3.128)$$

$$\underline{V}_S = \underline{Z}_f \underline{I}_{k2t(S)} \quad (3.129)$$

olur.

İki faz-toprak kısa devre arızasının bileşen devrelerini gösteren şekil 3.23’ten R fazının doğru, ters ve sıfır bileşen akımları sırasıyla



Şekil 3.23. İki faz-toprak kısa devre arızasının doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri.

$$I_{R1} = \frac{V_f < 0^\circ}{I_0 + Z_f + \frac{Z_2 + Z_f}{Z_0 + Z_2 + 2Z_f} \cdot \frac{Z_0 + Z_f}{Z_0 + Z_f}} \quad (3.130)$$

$$I_{R2} = - \left[\frac{Z_0 + Z_f}{Z_0 + Z_f + Z_2 + Z_f} \right] \cdot I_{R1} \quad (3.131)$$

$$I_{R0} = - \left[\frac{Z_2 + Z_f}{Z_2 + Z_f + Z_0 + Z_f} \right] \cdot I_{R1} \quad (3.132)$$

bulunur.

Diğer taraftan;

$$I_{k2t(R)} = I_{(R0)} + I_{(R1)} + I_{(R2)} = 0 \quad (3.133)$$

olduğundan

$$I_{R0} = - I_{R1} + I_{R2} \quad (3.134)$$

yazılabilir.

İki faz-toprak arızasında, faz akımları (T faz akımının $I_{k2t(T)} = 0$ olduğu daha önce yazılmıştı) simetrik bileşenlerden yararlanılarak aşağıdaki eşitliklerden kolayca hesaplanır.

$$I_{k2t R} = -I_{R0} + a^2 I_{R1} + a I_{R2} \quad (3.135)$$

$$\underline{I}_{k2tS} = -\underline{I}_{R0} + a\underline{I}_{R1} + a^2\underline{I}_{R2} \quad (3.136)$$

nötr iletkeninden akan toplam arıza akımı;

$$\underline{I}_n = -\underline{I}_{k2tR} + \underline{I}_{k2tS} = 3\underline{I}_{R0} \quad (3.137)$$

bulunur.

Yukarıda tesisat elemanlarının karakteristiklerinden yararlanarak bulunan simetrik bileşen akımları kullanılarak iki faz-toprak kısa devre arızası için gerilimlerin simetrik bileşenleri

$$\underline{V}_{R0} = -\underline{Z}_0 \underline{I}_{R0} \quad (3.138)$$

$$\underline{V}_{R1} = \underline{V}_f - \underline{Z}_1 \underline{I}_{R1} \quad (3.139)$$

$$\underline{V}_{R2} = -\underline{Z}_2 \underline{I}_{R2} \quad (3.140)$$

eşitliklerinden hesaplanabilir.

İki faz-toprak kısa devre arızasında R, S ve T fazlarının toprağa karşı gerilimleri ise

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_S \\ \underline{V}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{R0} \\ \underline{V}_{R1} \\ \underline{V}_{R2} \end{bmatrix} \quad (3.141)$$

matrisinden bulunur.

Arıza empedansının $Z_F = 0$ olması halinde (3.128) ve (3.129) no'lu eşitliklerden yararlanılarak kolayca

$$\underline{V}_R = 0 \quad (3.142)$$

$$\underline{V}_S = 0 \quad (3.143)$$

yazılabilir. Bu durumda;

$$\underline{V}_{R0} = \underline{V}_{R1} = \underline{V}_{R2} = \underline{V}_f - \underline{Z}_1 \underline{I}_{R1} \quad (3.144)$$

olur.

Arızasız hattın (bu çalışmada T fazının) toprağa karşı gerilimi ise;

$$\underline{V}_T = \underline{V}_{T0} = \underline{V}_{T1} = \underline{V}_{T2} \quad (3.145)$$

$$\underline{V}_T = 3\underline{V}_{T1} \quad (3.146)$$

bulunur.

İki faz-toprak kısa devre arızasında kısa devre akımı, arıza empedansı $Z_F = 0$ alınarak, genel olarak;

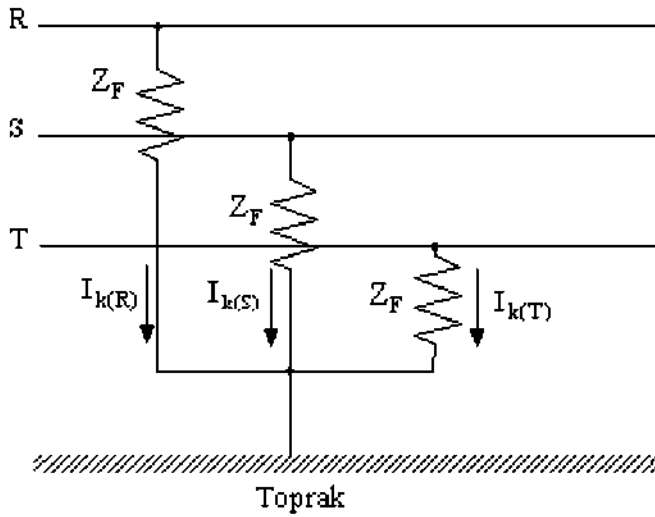
$$\underline{I}_{k2t} = \frac{\underline{V}_f \angle 0^\circ}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2}} \quad (3.147)$$

şeklinde ifade edilir.

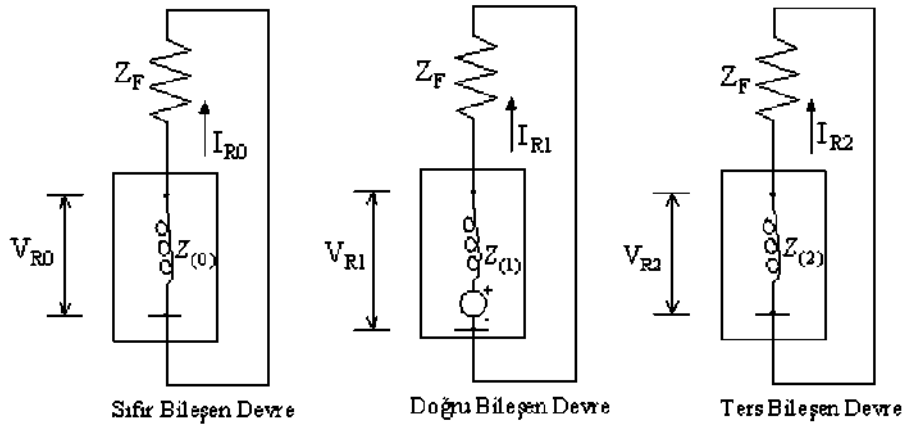
3.7.4. Üç fazlı simetrik kısa devre

Üç fazlı kısa devre arızası; simetrik bir arıza olup, kısa devre akımları her üç fazda genlik olarak farklı olmasına karşın modül olarak birbirine eşittir (dengeli). Şekil 3.24'te F gibi bir noktada üç fazlı simetrik kısa devre arızasının genel görünümü verilmekte olup, Z_F kısa devre empedansını göstermektedir. Üç fazlı kısa devre arızasında yıldız noktasının toprağa bağlı olması veya olmaması ya da bir direnç veya reaktansa bağlı olması kısa devre akımının büyüklüğü üzerinde bir etki yapmaz.

Şekil 3.25' te ise üç fazlı simetrik kısa devre arızası esnasında tesisatın doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi sadece pozitif bileşen devre aktif olup, bir gerilim kaynağına sahiptir. (V_f , arıza öncesi gerilim).



Şekil 3.24. Üç fazlı simetrik kısa devre arızasının genel gösterimi.



Şekil 3.25. Üç fazlı simetrik kısa devre arızasının doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri

Tesisat elemanlarının karakteristik değerlerine bağlı olarak, üç fazlı simetrik kısa devre arızasında R fazının doğru, ters ve sıfır bileşen akımları şekil 3.25'ten yararlanılarak

$$\underline{I}_{R1} = \frac{V_f \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.148)$$

$$\underline{I}_{R2} = 0 \quad (3.149)$$

$$\underline{I}_{R0} = 0 \quad (3.150)$$

şeklinde elde edilir.

Şayet arıza empedansı $Z_F = 0$ olursa

$$\underline{I}_{R1} = \frac{V_f \angle 0^\circ}{Z_1} \quad (3.151)$$

olur.

Üç fazlı simetrik kısa devre olayı dolayısıyla oluşan faz akımları (Bkz. 3.72) matrisinden yararlanılarak sırasıyla;

$$\underline{I}_{k3(R)} = \underline{I}_{R1} = \frac{V_f \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.152)$$

$$\underline{I}_{k3(S)} = a^2 \underline{I}_{R1} = \frac{V_f \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.153)$$

$$\underline{I}_{k3(T)} = a \underline{I}_{R1} = \frac{V_f \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.154)$$

olarak bulunur.

Bu son üç eşitlikten de görüldüğü gibi, her üç fazın kısa devre akımları mutlak değer olarak birbirine eşit olup, aralarında 120^0 faz farkı vardır.

Yine şekil 3.25'ten görüldüğü gibi bileşen devreler kendi empedansları üzerinden kısa devre edildiğinde

$$\underline{V}_{R0} = 0 \quad (3.155)$$

$$\underline{V}_{R1} = \underline{Z}_f \underline{I}_{R1} \quad (3.156)$$

$$\underline{V}_{R2} = 0 \quad (3.157)$$

olur.

Yine simetrik bileşenlerden ve yukarıdaki sonuçlardan yararlanılarak üç fazlı kısa devre arızası esnasında faz gerilimleri

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_S \\ \underline{V}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{V}_{R1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.158)$$

eşitliğinden

$$\underline{V}_R = \underline{V}_{R1} = \underline{Z}_f \underline{I}_{R1} \quad (3.159)$$

$$\underline{V}_S = a^2 \underline{V}_{R1} = \underline{Z}_f \underline{I}_{R1} \angle 240^0 \quad (3.160)$$

$$\underline{V}_T = a \underline{V}_{R1} = \underline{Z}_f \underline{I}_{R1} \angle 120^0 \quad (3.161)$$

bulunur.

Bu arıza tipinde her üç faz iletkeninden geçen kısa devre akımları mutlak değer olarak birbirine eşit olup genel olarak

$$\underline{I}_{k3} = \frac{\underline{V}_f \angle 0^0}{\underline{Z}_{(1)}} \quad (3.162)$$

şeklinde gösterilir (Küçük, 2005).

3.7.5. Generatörden doğrudan beslenen tesisat parçalarındaki kısa devre hesapları

Şekil 3.26’da olduğu gibi generatörden doğrudan beslenen tesisat parçalarında üç fazlı bir kısa devre oluşması halinde, hesaplarda kullanılacak generatörün pozitif bileşen empedansı, generatörün karakteristiklerinden yararlanarak hesaplanan empedansın ($\underline{Z}_G = R_a + jX_s$), K_G gibi bir düzeltme faktörü ile çarpılmasıyla bulunur (Anonim, 1998)

Yukarıdaki tanıma göre, generatörün düzeltilmiş empedans değeri

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G \quad (3.163)$$

olur.

Düzeltilme faktör

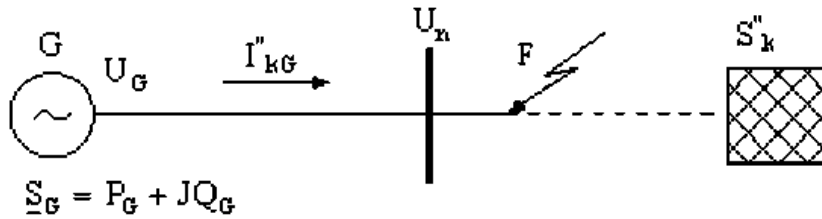
$$K_G = \frac{U_n}{U_G} \cdot \frac{C_{\max}}{(1 + X_d'' \cdot \sin\phi_G)} \quad (3.164)$$

dir.

Buna göre; generatörün çıkışlarında oluşacak üç fazlı kısa devre akımı

$$I''_{kG} = \frac{C \cdot U_G}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{GK}} \quad (3.165)$$

olur.



Şekil 3.26. Generatörden doğrudan beslenen tesisat parçalarında kısa devre oluşması

Senkron generatörün ters bileşen devrelerindeki ters bileşen empedans değeri, benzer şekilde generatörün karakteristiklerinden yararlanılarak hesaplanan empedans değerinin düzeltme faktörü (K_G) ile çarpılmasıyla

$$\underline{Z}_{(2)G} = \underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G \quad (3.166)$$

şeklinde bulunur.

Çıkık kutuplu senkron generatörlerde ters bileşen reaktans değeri ise

$$X_{(2)G} = 1/2(X''_d + X''_q) \quad (3.167)$$

ifadesinden hesaplanır.

Sıfır bileşen empedans değeri ise; yine generatörün karakteristiklerinden yararlanılarak hesaplanan sıfır bileşen empedans değerinin düzeltme faktörüyle çarpılmasıyla

$$\underline{Z}_{(0)G} = K_G (R_{(0)a} + jX_{(0)G}) \quad (3.168)$$

şeklinde yazılır.

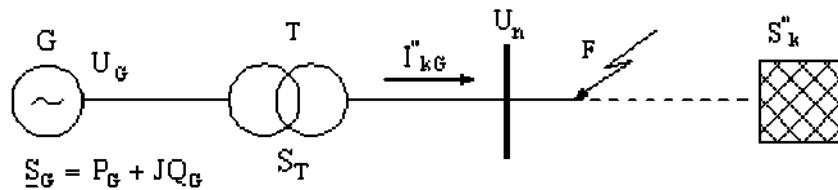
Üç fazlı simetrik kısa devre hesaplarında olduğu gibi, fazlar arası kısa devre ile faz-nötr kısa devre hesaplarındaki empedans değerleri de; generatörün karakteristiklerinden yararlanılarak hesaplanan empedansın (3.164) no'lu eşitlikte verilen düzeltme faktörü ile çarpılmasıyla bulunur.

3.7.6. Generatörden bir transformatör üzerinden beslenen tesisat parçalarındaki kısa devre hesapları

Şekil 3.27'de olduğu gibi generatör, elektrik sistemine bir transformatör üzerinden bağlıysa ve kısa devre; generatör ile transformatör arasında meydana gelmiş ise, kısa devre hesaplarında kullanılacak generatörün empedans değeri (Z_{Gk}), generatörün karakteristiklerinden yararlanılarak bulunan empedans değerinin bu defa

$$K_G = \frac{C_{\max}}{1 + X''_d \sin \varphi_G} \quad (3.169)$$

ile verilen düzeltme faktörü ile çarpılması gerekir.



Şekil 3.27. Generatörden elektrik sistemine bir transformatör üzerinden bağlı kısa devre hali.

Transformatörün burada olduğu gibi, primer sargı tarafı (generatör tarafı) için hesaplanacak düzeltilmiş empedans değeri ise

$$\underline{Z}_{Tk} = K_T Z_T \quad (3.170)$$

olup,

$$K_T = C_{\max} \quad (3.171)$$

Generatör ile transformatör arasında sistemin nominal gerilimi belirlenemediğinden, meydana gelecek kısa devre hesapları için eşdeğer gerilim kaynağı olarak

$$\frac{C \cdot U_G}{\sqrt{3}} \quad (3.172)$$

alınmalıdır.

Dengesiz kısa devre hesaplarında kullanılacak ters ve sıfır bileşen empedans değerlerinin de, benzer şekilde düzeltilmiş değerleri kullanılmalıdır.

Şayet kısa devre (Bkz. Şekil 3.27)'de olduğu gibi transformatörün sekonder (yüksek gerilim) tarafındaki tesisat parçalarında meydana gelirse, generatör ve transformatörün yukarıda hesaplanan düzeltilmiş empedans değerlerinin $\dot{u}_G = U_{n(YG)} / U_G$ olmak üzere, transformatörün sekonder tarafına

$$\dot{u}_G^2 Z_{GK} + \dot{u}_G^2 \underline{Z}_{Tk} \quad (3.173)$$

şeklinde dönüştürülmesi gerekir.

Bu dönüşüm; \dot{U} transformatörün dönüşüm oranı ($\dot{u} = U_{YG} / U_{AG}$), $Z_{T(YG)}$ ise transformatörün sekonder tarafı için hesaplanan empedans olmak üzere

$$\dot{u}_G^2 Z_{Gk} + \dot{u}_G^2 \underline{Z}_{Tk} \quad (3.174)$$

şeklinde de kısaca yazılabilir.

İfade de geçen K_{GT} generatör ve transformatör grubunun toplam empedansının düzeltme faktörü olup, değeri

$$K_{GT} = \frac{U_{n\ YG}^2 U_{AG}^2 U_{AG}^2}{U_G^2 U_{YG}^2} \frac{C_{max}}{1 + X_d'' + X_T \sin\varphi_G} \quad (3.175)$$

eşitliğinden bulunur.

Eşitlikte;

$U_{n(YG)}$ = Kısa devrenin olduğu noktadaki sistemin nominal gerilimi [v]

X_T = Transformatörün U^2 / S_T 'ye oranlanmış reaktansı [$X_T / (U^2 / S_T)$]

Transformatörün sekonder tarafında oluşacak dengesiz kısa devre hesaplarında kullanılacak ters ve sıfır bileşen empedans değerlerinin de benzer şekilde düzeltilmiş değerleri kullanılmalıdır (Küçük, 2005).

4. TS EN 60909 KISADEVRE HESABININ TEORİK UYGULAMASI

Yapılan teorik hesap YILDIZ ENTEGRE fabrikasına ait olup, bu fabrikanın enerji ihtiyacını temin ettiği hat, tek hat şemasında gösterilmiştir. Yıldız Entegre enerjisini Köseköy TM'den almaktadır.

Köseköy TM nin 34,5 kV barasını besleyen 154 kV barasında kısadevre gücü $S''_k=S_k=4834$ MVA verilmiştir.

Yıldız entegre kojenarasyon sistemi 7.5 MVA, 2.1 MVA, 2.6 MVA'lık 3 adet asenkron motor. Bu motorları besleyen 10Kv barasına bağlı 6.3 MVA'lık generatör ve yine 10 Kv barasına bağlı zayıf akım besleme trafosundan oluşmaktadır sistemi oluşturan makinalar için daha ayrıntılı bilgi aşağıdaki şekilde verilmiştir.

4.1. 2.1- + dizin empedansların hesabı:

UED = Ulusal elektrik şebekesi:

4.1.1. Şebeke fideri

$$Z_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \cdot 154^2}{4834} \cdot \frac{1}{(154/34,5)^2} = 0,2708\Omega$$

$$X_{Qt} = 0,995Z_{Qt} = 0,995 \cdot 0,2708 = 0,2694\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,1X_{Qt} = 0,2 \cdot 0,2694 = 0,0269\Omega$$

$$\underline{Z}_{Qt} = (0,0269 + j0,2694)\Omega$$

4.1.2. Transformatörler

İndirici transformatör QT:

$S_{rQT}=100$ MVA, $U_{rQTLV}=34,5$ kV, $u_{krQT}=\%11,75$ ve $u_{RrQT}=\%0,7$ için:

$$Z_{QTLV} = \frac{u_{krQT}}{\%100} \cdot \frac{U_{krQT}^2}{S_{rQT}} = \frac{\%11,75}{\%100} \cdot \frac{34,5^2}{100} = 1,3985\Omega$$

$$R_{QTLV} = \frac{u_{RrQT}}{\%100} \cdot \frac{U_{krQT}^2}{S_{rQT}} = \frac{\%0,7}{\%100} \cdot \frac{34,5^2}{100} = 0,0833\Omega$$

$$Z_{QTLV} = \sqrt{Z_{QTLV}^2 - R_{QTLV}^2} = \sqrt{1,3985^2 - 0,0833^2} = 1,396\Omega$$

Step-up transformatör T:

$$S_{rT}=20 \text{ MVA}, U_{rTLV}=10 \text{ kV}, u_{krT}=\% \quad P_{krT}=109,792 \text{ kW için:}$$

$$Z_{TLV} = \frac{u_{krQT}}{\% 100} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rQT}} = \frac{\% 9,88}{\% 100} \cdot \frac{10^2}{20} = 0,4940 \Omega$$

$$R_{TLV} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{P_{krT} U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = \frac{109,792 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2}{20^2} = 0,02745 \Omega$$

$$X_{TLV} = \sqrt{Z_{TVL}^2 - R_{TVL}^2} = \sqrt{0,4940^2 - 0,02745^2} = 0,4932 \Omega$$

$$\underline{Z}_{TLV} = (0,02745 + j0,4932) \Omega$$

$$\underline{Z}_{THV} = \underline{Z}_{THV} t^2 = (0,02745 + j0,4932) \cdot \left(\frac{34,5}{10}\right)^2 = (0,3267 + j5,8703) \Omega$$

Transformatör T1-2:

$$S_{rT1-2}=2,5 \text{ MVA}, \quad U_{rT1-2LV}=0,4 \text{ kV}, \quad u_{krT1-2}=\% 6 \text{ ve } P_{krT1-2}=21,8 \text{ kW için:}$$

$$Z_{T1-2LV} = \frac{u_{krT1-2}}{\% 100} \cdot \frac{U_{rT1-2LV}^2}{S_{rT1-2}} = \frac{\% 6}{\% 100} \cdot \frac{0,4^2}{2,5} = 0,00384 \Omega$$

$$R_{T1-2LV} = \frac{P_{krT1-2}}{3I_{rT1-2}^2} = \frac{P_{krT1-2} U_{rT1-2LV}^2}{S_{rT1-2}^2} = \frac{21,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4^2}{2,5^2} = 0,0000558 \Omega$$

$$X_{T1-2LV} = \sqrt{Z_{T1-2LV}^2 - R_{T1-2LV}^2} = \sqrt{0,00384^2 - 0,0000558^2} = 0,0038 \Omega$$

$$\underline{Z}_{T1-2LV} = (0,0006 + j0,0038) \Omega$$

4.1.3 Generatör:

$$R_G=0,07X''_d \text{ için}$$

$$\underline{Z}_G = R_G + jX''_d = 0,07X''_d + jX''_d = X''_d(0,07 + j) = \frac{x''_d}{\% 100} \cdot U_{rG}^2 \cdot (0,07 + j)$$

$$\underline{Z}_G = \frac{\% 16,6}{\% 100} \cdot \frac{10^2}{7,73} (0,07 + j) = (0,1503 + j2,1475) \Omega$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x''_d \sin \varphi_{rG}} = \frac{10}{10} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,166 \cdot 0,60} = 1$$

$$\underline{Z}_{GK} = K_G (R_G + jX''_d) = 1(0,1503 + j2,1475) = (0,1503 + j2,1475) \Omega$$

4.1.4. Asenkron motorlar

Asenkron motorlar MT1, MT2 ve MT3:

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR1} / I_{rM1}} \cdot \frac{U_{rM1}^2}{S_{rM1}} = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{10^2}{8,777} = 2,0715\Omega$$

Burada:

$$S_{rM1} = \frac{P_{rM1}}{\cos\varphi_r \eta_{r1}} = \frac{7500}{0,88 \cdot 0,971} = 8,777kVA$$

$$R_{M1} / X_{M1} = 0,10, \text{ bundan } X_{M1} = 0,995Z_{M1}$$

$$X_{M1} = 0,995 \cdot 2,0715 = 2,0611\Omega$$

$$R_{M1} = 0,10 \cdot 2,0611 = 0,2061\Omega$$

$$\underline{Z}_{M1} = (0,2061 + j2,0611)\Omega$$

$$\underline{Z}_{M2} = \frac{1}{I_{LR2} / I_{rM2}} \cdot \frac{U_{rM2}^2}{S_{rM2}} = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{10^2}{2,438} = 7,4577\Omega$$

Buradan

$$S_{rM2} = \frac{P_{rM2}}{\cos\varphi_r \eta_{r1}} = \frac{2100}{0,89 \cdot 0,968} = 2,438kVA$$

$$R_{M2} / X_{M2} = 0,10, \text{ bundan } X_{M2} = 0,995Z_{M2}$$

$$X_{M2} = 0,995 \cdot 7,4577 = 7,4204\Omega$$

$$R_{M2} = 0,10 \cdot 7,4204 = 0,7420\Omega$$

$$\underline{Z}_{M2} = (0,7420 + j7,4204)\Omega$$

$$\underline{Z}_{M3} = \frac{1}{I_{LR3} / I_{rM3}} \cdot \frac{U_{rM3}^2}{S_{rM3}} = \frac{1}{6,5} \cdot \frac{10^2}{1,924} = 7,9962\Omega$$

Buradan

$$S_{rM3} = \frac{P_{rM3}}{\cos\varphi_{r3}\eta_{r3}} = \frac{1600}{0,86 \cdot 0,967} = 1,924 \text{ kVA}$$

$$R_{M3} / X_{M3} = 0,15, \text{ bundan } X_{M3} = 0,989 Z_{M3}$$

$$X_{M3} = 0,989 \cdot 7,9962 = 7,9082 \Omega$$

$$R_{M3} = 0,15 \cdot 7,9082 = 1,1862 \Omega$$

$$\underline{Z}_{M3} = (1,1862 + j7,9082) \Omega$$

4.1.5 Hatlar (Kablolar ve hava hatları):

Hat empedansları: $\underline{Z}_{L1} = Z' L /$

Kablo L1:

$$\underline{Z}_{L1} = (R'_{L1} + jX'_{L1}) / 2 = (0,153 + j0,206) \cdot \frac{0,250}{2} = (0,0191 + j0,0258) \Omega$$

Hava hattı L2:

$$\underline{Z}_{L2} = (0,1194 + j0,355) \cdot 4,2 = (0,5015 + j1,4910) \Omega$$

Kablo L3:

$$\underline{Z}_{L3} = (0,153 + j0,206) \cdot \frac{0,120}{2} = (0,0092 + j0,0124) \Omega$$

Kablo L4:

$$\underline{Z}_{L4} = (0,0754 + j0,156) \cdot \frac{0,020}{4} = (0,0038 + j0,0008) \Omega$$

Kablo L5:

$$\underline{Z}_{L5} = (0,0754 + j0,156) \cdot \frac{0,040}{2} = (0,0015 + j0,0003) \Omega$$

Kablo L6:

$$\underline{Z}_{L6} = (0,153 + j0,169) \cdot 0,065 = (0,0099 + j0,0110) \Omega$$

Kablo L7:

$$\underline{Z}_{L7} = (0,0754 + j0,156) \cdot \frac{0,175}{2} = (0,0066 + j0,0137) \Omega$$

Kablo L8:

$$\underline{Z}_{L8} = (0,0754 + j0,156) \cdot 0,180 = (0,0136 + j0,0281) \Omega$$

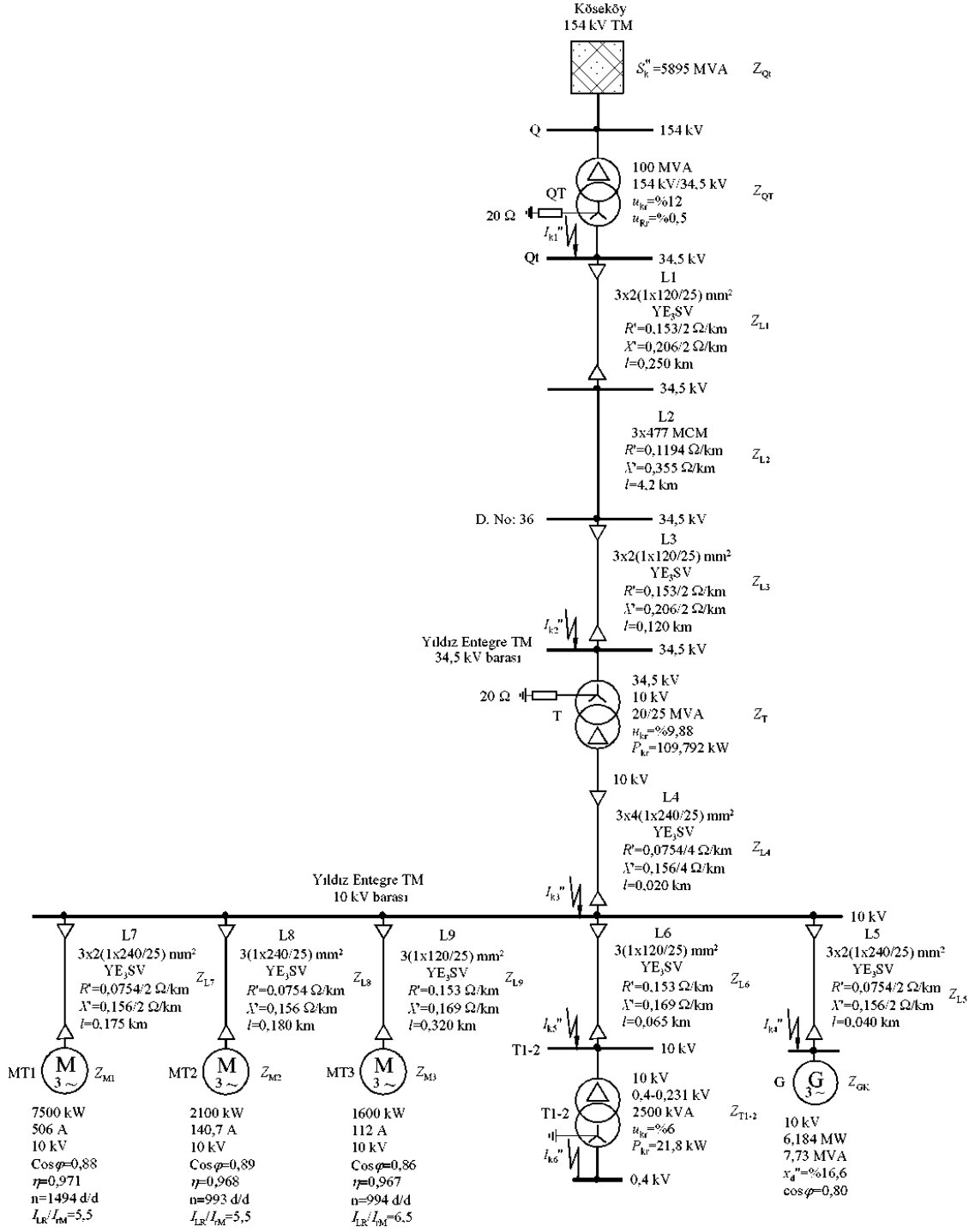
Kablo L9:

$$\underline{Z}_{L9} = (0,153 + j0,169) \cdot 0,320 = (0,0490 + j0,0541) \Omega$$

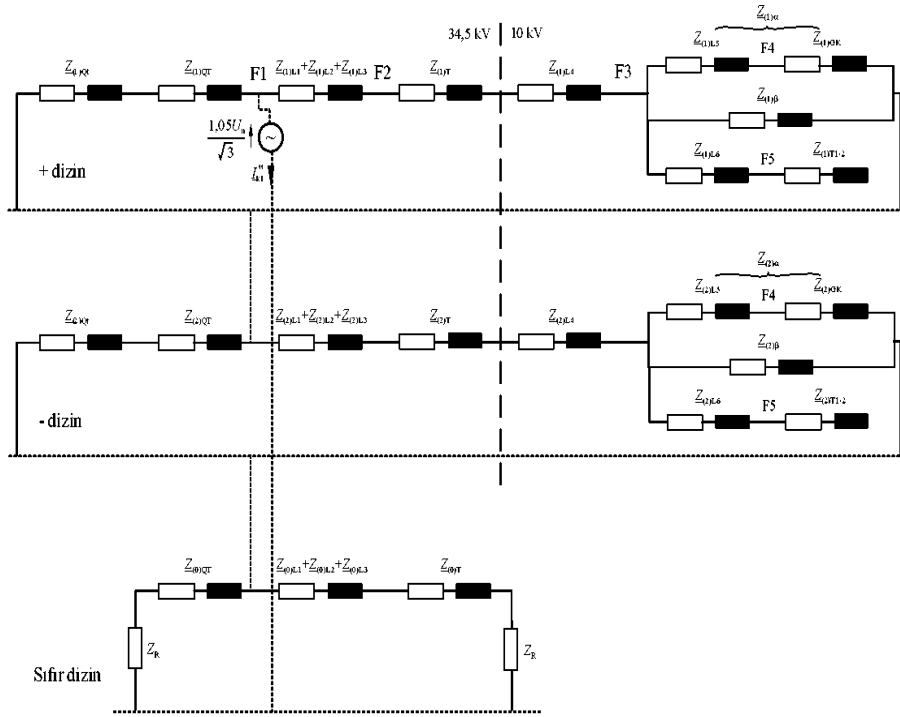
Tablo 4. 1 Ögelerin verileri ve +, – ve sıfır dizin kısadevre empedansları:

Öğeler	Ögelerin verileri	$Z_{(1)}$ ve $Z_{(0)}$, in bağıntılar	$Z_{(1)}=Z_{(2)}$ [Ω]	$Z_{(0)}$ [Ω]
UED Q	$U_{rQ}=154$ kV, $c_Q=1,1$ $S_{kQ}''=4834$ MVA $R_Q=0,1X_Q$ için $X_Q=0,995Z_Q$	(5b)	$Z_{Q1}''=$ $0,0269+j0,2694$	
Transformatörler QT	$S_{QT}=100$ MVA, $U_{rQTHV}=154$ kV $U_{rQTLV}=34,5$ kV $u_{krQT}=\%11,75$, $u_{RrQT}=\%0,7$	(6), (7) ve (8)	$Z_{QTLV}''=$ $0,0833+j1,396$	$Z_{(0)QTLV}''=$ $0,0833+j1,1168$
T	$S_{TT}=20$ MVA, $U_{rTHV}=34,5$ kV $U_{rTLV}=10$ kV $u_{krT}=\%9,88$, $P_{krT}=109,792$ kW YNd5		$Z_{TLV}''=$ $0,02745+j0,4932$	$Z_{(0)TLV}''=$ 8
T1-2	$S_{rT1-2}=2,5$ MVA, $U_{rT1-2HV}=10$ kV $U_{rT1-2LV}=0,4$ kV $u_{krT1-2}=\%6$, $P_{krT1-2}=21,8$ kW Dyn11		$Z_{rT1-2LV}''=$ $0,0006+j0,0038$	$Z_{(0)rT1-2LV}''=$ $0,0006+j0,00304$
Generatör G	$S_{rG}=6,184$ MW, $U_{rG}=10$ kV $x_d''=\%16,6$, $\cos\phi=0,80$		$Z_{GK}''=$ $0,1503+j2,1475$	
Motorlar MT1	$S_{rG1}=7500$ kW, $U_{rG1}=10$ kV, $\cos\phi 0,85$, $\eta=0,95$, $I_{LR}/I_{rM}=6$		$Z_{M1}''=$ $0,2061+j2,0611$	
MT2	$S_{rG2}=2100$ kW, $U_{rG2}=10$ kV, $\cos\phi 0,85$, $\eta=0,95$, $I_{LR}/I_{rM}=6$		$Z_{M2}''=$ $0,742+j7,4204$	
MT3	$S_{rG3}=1600$ kW, $U_{rG3}=10$ kV, $\cos\phi 0,85$, $\eta=0,95$, $I_{LR}/I_{rM}=6$		$Z_{M3}''=$ $1,1862+j7,9082$	
Kablo L1	$3 \times 2(1 \times 120/25)$ mm ² YE ₃ SV $l=0,25$ km	$\frac{R_{(0)L}}{R_L}$, $\frac{X_{(0)L}}{X_L}$	$Z_{L1}''=$ $0,0191+j0,0258$	$Z_{(0)L1}''=$ $0,0191+j0,0774$
Hava hattı L2	3×477 MCM, $l=4,2$ km	veri ve oranları kitaptan alınmıştır.	$Z_{L2}''=$ $0,5015+j1,491$	$Z_{(0)L2}''=$ $0,5015+j5,964$

L3	3x2(1x120/25) mm ² YE ₃ SV		Z _{L3} =	Z _{(0)L3} =
Kablo	l=0,12 km		0,0092+j0,0124	0,0092+j0,0372
L4	3x4(1x240/25) mm ² YE ₃ SV		Z _{L4} =	
Kablo	l=0,02 km		0,0038+j0,0008	
L5	3x2(1x240/25) mm ² YE ₃ SV		Z _{L5} =	
Kablo	l=0,04 km		0,0015+j0,0003	
L6	3(1x120/25) mm ² YE ₃ SV		Z _{L6} =	
Kablo	l=0,065 km		0,0099+j0,011	
L7	3x2(1x240/25) mm ² YE ₃ SV		Z _{L7} =	
Kablo	l=0,175 km		0,0066+j0,0137	
L8	3(1x240/25) mm ² YE ₃ SV		Z _{L8} =	
Kablo	l=0,180 km		0,0136+j0,0281	
L9	3(1x120/25) mm ² YE ₃ SV		Z _{L9} =	
	l=0,320 km		0,0490+j0,0541	



Şekil 4.1. Tekhat Şeması



Şekil 4.2 Sıfır dizin

4.2. Sıfır dizin empedansların hesabı:

4.2.1. Transformatörler:

Bağlantı kümesi Dy olan QT ve T1-2 transformatörü için $R_{(0)T}=R_T$, $X_{(0)T}=0,8X_T$

Transformatör QT: $\underline{Z}_{(0)QTLV}=(0,0833+j1,1168) \Omega$

Transformatör T1-2:

$\underline{Z}_{(0)T1-2LV}=(0,0006+j0,00304) \Omega$

Bağlantı kümesi Yd olan T transformatörü için $R_{(0)T}=R_T$, $X_{(0)T}=0,9X_T$

$\underline{Z}_{(0)TLV}=(0,02745+j0,44388) \Omega$

$$\underline{Z}_{(0)THV}=\underline{Z}_{(0)TLV}t^2=(0,02745+j0,44388)\frac{(34,5)^2}{10}=(0,3267+j5,2833)\Omega$$

4.2.2. Hatlar (Kablolar ve hava hatları):

- Kablo L2. $R_{(0)L}=R_L$, $X_{(0)L}=3X_L$: $\underline{Z}_{(0)L1}=(R_{L1}+j3X_{L1})=(0,0191+j0,0774)\Omega$

- Hava hattı L2. $R_{(0)L}=R_L$, $X_{(0)L}=4X_L$: $\underline{Z}_{(0)L2}=(R_{L2}+j4X_{L2})=(0,5015+j5,964)\Omega$

- Kablo $L3$. $R_{(0)L}=R_L$, $X_{(0)L}=3X_L$: $\underline{Z}_{(0)L3}=(R_L3+j3X_L3)=(0,0092+j0,0372) \Omega$

2.3- F1, F2, F3, F4, F5 ve F6 kısadevre yerlerinde, dengeli kısadevrelere için I''_k ve i_p kısa devre akımlarının hesabı:

F1 kısadevre yeri:

F1 kısadevre yerinde kısa devre yollarının empedansları:

$$\underline{Z}_{kQ,F1}=\underline{Z}_{Qt}+\underline{Z}_{QTLV}$$

$$= (0,0269 + j0,2694) + (0,0833 + j1,396) = (0,1102 + j1,6654) \Omega$$

$$\underline{Z}_a=\underline{Z}_{GK}+\underline{Z}_{L5}$$

$$= (0,1503 + j2,1475) + (0,0015 + j0,0003) = (0,1518 + j2,1478) \Omega$$

$$(\underline{Z}_{M1}+\underline{Z}_{L7})\|(\underline{Z}_{M2}+\underline{Z}_{L8})\|(\underline{Z}_{M3}+\underline{Z}_{L9}) \underline{Z}_\beta = \underline{Z}_{M1}+\underline{Z}_{L7} + \underline{Z}_{M2}+\underline{Z}_{L8} + \underline{Z}_{M3}+\underline{Z}_{L9}$$

$$= \frac{1}{0,2127 + j2,0748} + \frac{1}{0,7556 + j7,4485} + \frac{1}{1,2352 + j7,9623}$$

$$\underline{Z}_\beta = (0,1497 - j1,3510) \Omega$$

$$\underline{Z}_\alpha \| \underline{Z}_\beta$$

$$\underline{Z}_{rs1} = \frac{(0,1518 + j2,1478)(0,1497 + j1,3510)}{(0,1518 + j2,1478) + (0,1497 + j1,3510)} = (0,0790 + j0,8297) \Omega$$

$$\underline{Z}_\gamma = \underline{Z}_{rs1} + \underline{Z}_{L4} + \underline{Z}_{TLV} = (0,0790 + j0,8297) + (0,0038 + j0,0008) + (0,02745 + j0,4932)$$

$$= (0,11025 + j1,3237) \Omega$$

$$\underline{Z}_{\gamma t} = \underline{Z}_\gamma t^2 = (0,11025 + j1,3237) \cdot \left(\frac{34,5}{10} \right)^2 = (1,3390 + j15,7553) \Omega$$

$$\underline{Z}_{kGK,F1} = \underline{Z}_{\gamma t} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2} + \underline{Z}_{L3}$$

$$= (1,3390 + j15,7553) + (0,0191 + j0,0258) + (0,5015 + j1,491) + (0,0092 + j0,0124)$$

$$= (1,8688 + j17,2845) \Omega$$

I''_k en büyük başlangıç simetrik kısadevre akımı, (20) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge1)

için:

$$I''_{Q,F1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{kQ,F1}} = \frac{1,1.34,5}{\sqrt{3}(0,1102 + j1,6654)} = (0,8558 - j13,0989) \text{ kA}$$

$$I''_{kQ,F1} = 13,128 \text{ kA}$$

$$I''_{Q,F1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{kQ,F1}} = \frac{1,1.34,5}{\sqrt{3}(1,8688 + j7,2845)} = (0,1355 - j1,2530) \text{ kA}$$

$$I''_{kQ,F1} = 1,260 \text{ kA}$$

$$I''_{kQ,F1} = I''_{kQ,F1} + I''_{kQ,F1} = (0,8668 - j13,0989) + (0,1355 - j1,2530) = (1,0002 - j14,3519)$$

kA

$$I_{kF1} = 14,387 \text{ kA}$$

i_p darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16): $Z_k = R_k + jX_k$ kısadevre yolunun empedansından $R_{kQ,F1}/X_{kQ,F1} = 0,1102/1,6654 = 0,066$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{Q,F1} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{kQ,F1}/X_{kQ,F1}} = 1,02 + 0,98e^{-30,066} = 1,824$$

$$i_{pQ,F1} = \kappa_{Q,F1} \sqrt{2} I''_{kQ,F1} = 1,824 \sqrt{2} \cdot 13,128 = 33,864 \text{ kA}$$

$R_{kGK,F1}/X_{kGK,F1} = 1,8688/17,2845 = 0,108$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{GK,F1} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{kGK,F1}/X_{kGK,F1}} = 1,02 + 0,98e^{-30,108} = 1,729$$

$$i_{pGK,F1} = \kappa_{GK,F1} \sqrt{2} I''_{kGK,F1} = 1,729 \sqrt{2} \cdot 1,260 = 3,081 \text{ kA}$$

$$i_{pF1} = i_{pQ,F1} + i_{pGK,F1} = 33,864 + 3,081 = 36,945 \text{ kA}$$

F2 kısa devre yeri:

F2 kısadevre yerinde kısa devre yollarının empedansları:

$$Z_{kQ,2} = Z_{kQ,1} + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L3}$$

$$= (0,1102 + j1,6654) + (0,0191 + j0,0258) + (0,5015 + j1,491) + (0,0092 + j0,0124)$$

$$= (0,6400 + j3,1946) \Omega$$

$$Z_{kGK,F2} = Z_{\gamma t} = (1,3390 + j15,7553) \Omega$$

I_k'' en büyük başlangıç simetrik kısa devre akımı, (20) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2) için:

$$I_{kQ,F2}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{kQ,F2}} = \frac{1,1 \cdot 34,5}{\sqrt{3}(0,6400 + j3,1946)} = (1,3210 - j6,5939) \text{ kA}$$

$$I_{kQ,F2}'' = 6,725 \text{ kA}$$

$$I_{kGK,F2}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{kGK,F2}} = \frac{1,1 \cdot 34,5}{\sqrt{3}(1,3390 + j15,7553)} = (0,1173 - j1,3807)$$

$$I_{kGK,F2}'' = 1,386 \text{ kA}$$

$$I_{kF2}'' = I_{kQ,F2}'' + I_{kGK,F2}'' = (1,3210 - j6,5939) + (0,1173 - j1,3807)$$

$$= (1,4383 - j7,9746)$$

$$I_{kF2}'' = 8,103 \text{ kA}$$

i_p darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$$Z_k = R_k + jX_k \text{ kısa devre yolunun empedansından}$$

$$R_{kQ,F2}/X_{kQ,F2} = 0,6400/3,1946 = 0,200$$

oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{Q,F2} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{kQ,F2}/X_{kQ,F2}} = 1,02 + 0,98e^{-30,200} = 1,558$$

$$i_{pQ,F2} = \kappa_{Q,F2} \sqrt{2} I_{kQ,F2}'' = 1,55872 \cdot 6,725 = 14,817 \text{ kA}$$

$R_{kGK,F2}/X_{kGK,F2} = 1,3390/15,7553 = 0,086$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{GK,F2} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{kGK,F2}/X_{kGK,F2}} = 1,02 + 0,98e^{-30,086} = 1,779$$

$$i_{pGK,F2} = \kappa_{GK,F2} \sqrt{2} I_{kGK,F2}'' = 1,779 \sqrt{2} \cdot 1,386 = 3,487 \text{ kA}$$

$$i_{pF2} = i_{pQ,F2} + i_{pGK,F2} = 14,817 + 3,487 = 18,304 \text{ kA}$$

F3 kısa devre yeri:

F3 kısa devre yerinde kısa devre yollarının empedansları:

$$Z_{kQ,F3} = Z_{kQ,F2t} + Z_{TLV} + Z_{L4}$$

$$= (0,6400 + j3,1946) \cdot \frac{1}{(34,5/10)} + (0,02745 + j0,4932) + (0,0038 + j0,0008)$$

$$= (0,0850 + j0,7624) \Omega$$

$$\underline{Z}_{kGK,F3} = \underline{Z}_{rsl} = (0,0790 + j0,8297) \Omega$$

I''_k en büyük başlangıç simetrik kısa devre akımı, (20) bağıntısından, $c=1,1$:

$$I''_{kQ,F3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{kQ,F3}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3}(0,0850 + j0,7624)} = (0,9173 - j8,2278) kA$$

$$I''_{kQ,F3} = 8,279 kA$$

$$I''_{kGK,F3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{kGK,F3}} = \frac{1,1 \cdot 34,5}{\sqrt{3}(0,0790 + j0,8297)} = (0,7223 - j7,5856) kA$$

$$I''_{kGK,F3} = 7,620 kA$$

$$I''_{kF3} = I''_{kQ,F3} + I''_{kGK,F3} = (0,9173 - j8,2278) + (0,7223 - j7,5856)$$

$$= (1,6396 - j15,8134)$$

$$I''_{kF3} = 15,898 kA$$

i_p darbe kısa devre akımının hesabı için

$Z_k = R_k + jX_k$ kısa devre yolunun empedansından

$$R_{kQ,F3}/X_{kQ,F3} = 0,0850/0,7624 = 0,111$$

oranı bulunur ve κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{Q,F3} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{kQ,F3}/X_{kQ,F3}} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,111} = 1,722$$

$$i_{pQ,F3} = \kappa_{Q,F3} \sqrt{2} I''_{kQ,F3} = 1,722 \sqrt{2} \cdot 8,279 = 20,162 kA$$

$R_{kGK,F3}/X_{kGK,F3} = 0,0790/0,8297 = 0,095$ oranı bulunur κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{GK,F3} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{kGK,F3}/X_{kGK,F3}} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,095} = 1,757$$

$$i_{pGK,F3} = \kappa_{GK,F3} \sqrt{2} I''_{kGK,F3} = 1,757 \sqrt{2} \cdot 7,620 = 18,934 kA$$

$$i_{pF3} = i_{pQ,F3} + i_{pGK,F3} = 20,162 + 18,934 = 39,096 kA$$

F4 kısa devre yeri:

F4 kısa devre yerinde kısa devre yollarının empedansları:

$$\underline{Z}_{\delta} = \underline{Z}_{kQ,F3} \parallel \underline{Z}_{\beta}$$

$$\underline{Z}_{\beta} = (0,1497 + j1,3510)\Omega$$

$$\underline{Z}_{kQ,F3} = (0,0850 + j0,7624)$$

$$\underline{Z}_{\delta} = \underline{Z}_{kQ,F3} \parallel \underline{Z}_{p}$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_{\delta}} = \frac{1}{\underline{Z}_{kQ,F3}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\beta}} = \frac{1}{(0,0850 + j0,7624)} + \frac{1}{(0,1497 + j1,3510)}$$

$$\underline{Z}_{\delta} = (0,0542 + j0,48774)\Omega$$

I''_k en büyük başlangıç simetrik kısa devre akımı, (20) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2)

için:

$$I''_{kQ,F4} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{kQ,F4}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3}(0,0692 + j0,4876)} = (1,8119 - j12,7657)kA$$

$$I''_{kQ,F4} = 12,894kA$$

$$\underline{Z}_{kGK,F4} = \underline{Z}_{GK} = (0,1503 + j2,1475)\Omega$$

$$I''_{kGK,F4} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{kGK,F4}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3}(0,1503 + j2,1475)} = (0,2059 - 2,9429)\Omega$$

$$I''_{kGK,F4} = 2,950kA$$

$$I''_{kF4} = I''_{kQ,F4} + I''_{kGK,F4} = (1,8119 - j12,7657) + (0,2059 - 2,9424)$$

$$= (2,0176 - j15,4086)kA$$

$$I''_{kF4} = 15,838kA$$

i_p darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A

(16):

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k \text{ kısa devre yolunun empedansından}$$

$$R_{kQ,F3}/X_{kQ,F3} = 0,06921/0,4876 = 0,142$$

oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{Q,F4}=1,02 + 0,98e^{-3R_{kQ,F4}/X_{kQ,F4}} = 1,02+0,98e^{-30,142}=1,660$$

$$i_{pQ,F4} = \kappa_{Q,F4} \sqrt{2} I''_{kQ,F4} = 1,660.72.12,894 = 30,270 \text{ kA}$$

$R_{kGK,F4}/X_{kGK,F4} = 0,1503/2,1475 = 0,070$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{GK,F4}=1,02+0,98e^{-3 R_{kGK,F4}/X_{kGK,F4}} = 1,02+0,98e^{-30,070}=1,814$$

$$i_{pGK,F4} = \kappa_{GK,F4} \sqrt{2} I''_{kGK,F4} = 1,814. \sqrt{2} .2,9501 = 7,568 \text{ kA}$$

$$i_{pF4} = i_{pQ,F4} + i_{pGK,F4} = 30,270 + 7,568 = 37,838 \text{ kA}$$

F5 kısa devre yeri:

F5 kısa devre yerinde kısa devre yollarının empedansları:

$$\underline{Z}_{\varepsilon} = \underline{Z}_{kQ,F3} \parallel \underline{Z}_{rs1}$$

$$\underline{Z}_{kGK,F3} = \underline{Z}_{rs1} = (0,0790 + j,8297) \Omega$$

$$\underline{Z}_{kGK,F3} = (0,0850 + j0,7624)$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_{\varepsilon}} = \frac{1}{\underline{Z}_{kQ,F3}} + \frac{1}{\underline{Z}_{rs1}} = \frac{1}{(0,0850 + j0,7624)} + \frac{1}{(0,0790 + j0,8297)}$$

$$\underline{Z}_{\varepsilon} = (0,04119 + j0,3973) \Omega$$

$$\underline{Z}_{kF5} = \underline{Z}_{\varepsilon} + \underline{Z}_{L6} = (0,04119 + j0,3973) + (0,0099 + j0,00110)$$

$$= (0,05109 + j0,4083) \Omega$$

I''_k en büyük başlangıç simetrik kısa devre akımı, (20) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2)

için:

$$I''_{kF5} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{kF5}} = \frac{1,1.10}{\sqrt{3}(0,05109 + j0,4083)} = (1,9162 - j15,3130) \text{ kA}$$

$$I''_{kF5} = 15,432 \text{ kA}$$

$$I_{kF5} = 15,432 \text{ kA}$$

i_p darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$Z_k=R_k+jX_k$ kısa devre yolunun empedansından $R_{kF5}/X_{kF5}=0,05109/0,4083=0,125$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{F5}=1,02 + 0,98e^{-3 R_{kF5}/X_{kF5}}=1,02+0,98e^{-30,125}=1,693$$

$$i_{pF5}=\kappa_{F5}\sqrt{2}I''_{kF5}=1,693\sqrt{2}.15,432=36,948 \text{ kA}$$

F6 kısa devre yeri:

F6 kısa devre yerinde kısa devre yollarının empedansları

$$\underline{Z}_{kF6} = \underline{Z}_{kF5t} + \underline{Z}_{T1-2LV} = (0,05109 + j0,4083) \cdot \left(\frac{1}{10/0,4}\right) + (0,0006 + j0,0038) = (0,6817 + j4,4533) \cdot 10^{-3} \Omega$$

I''_k en büyük başlangıç simetrik kısadevre akımı, (20) bağıntısından, $c=1,0$ (Çizelge 2.2)

için:

$$I''_{kF6} = 51,261 \text{ kA}$$

i_p darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$Z_k=R_k+jX_k$ kısa devre yolunun empedansından $R_{kF6}/X_{kF6}=0,68174/4,4533=0,153$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{F6}=1,02+0,98e^{-3 R_{kF6}/X_{kF6}}=1,02+0,98e^{-30,153}=1,639$$

$$i_{pF6}=\kappa_{F6}\sqrt{2}I''_{kF6}=1,639\sqrt{2}.51,26=118,818 \text{ kA}$$

2.4. F1, F2, F3, F4, F5 ve F6 kısa devre yerlerinde iki faz kısa devreler için I''_{k2} ve i_{p2} akımlarının hesabı:

F1 kısa devre yerinde iki faz kısa devre akımı:

$$\underline{Z}_{(1)Q,F1}=\underline{Z}_{(2)Q,F1}=\underline{Z}_{kQ,F1}=(0,1102 + j1,6654) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2Q,F1} = \underline{Z}_{(1)kQ,F1} + \underline{Z}_{(2)kQ,F1} = 2 \cdot (0,1102 + j1,6654) = (0,2204 + j3,3308) \Omega$$

$$Z_{k2Q,F1} = |\underline{Z}_{k2Q,F1}| = \sqrt{0,2204^2 + 3,3308^2} = 3,3381 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)GK,F1}=\underline{Z}_{(2)GK,F1}=\underline{Z}_{kGK,F1}=(1,8688 + j17,2845) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2GK,F1} = \underline{Z}_{(1)kGK,F1} + \underline{Z}_{(2)kGK,F1} = 2 \cdot (1,8688 + j17,2845) = (3,7376 + j34,5690) \Omega$$

$$Z_{k2GK,F1} = |\underline{Z}_{k2GK,F1}| = \sqrt{3,7376^2 + 34,5690^2} = 34,7705 \Omega$$

I''_{k2} en büyük iki faz kısa devre akımı, (23) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2) için:

$$I''_{k2Q,F2} = \frac{cU_n}{Z_{k2Q,F2}} = \frac{1,1 \cdot 34,5}{6,5162} = 5,824 \text{ kA}$$

$$I''_{k2GK,F2} = \frac{cU_n}{Z_{k2GK,F2}} = \frac{1,1 \cdot 34,5}{31,6242} = 1,200 \text{ kA}$$

$$I''_{k2,F2} = I''_{k2Q,F2} + I''_{00} = 5,824 + 1,2 = 12,460 \text{ kA}$$

$$I''_{k2,F1} = 12,460 \text{ kA}$$

$$\sqrt{2,6780^2 + 31,5106^2} = 31,624$$

i_{p2} iki faz darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$Z_{k2} = R_{k2} + jX_{k2}$ iki faz kısa devre yolunun empedansından $R_{k2Q,F1}/X_{k2Q,F1}$
 $= (2,0,1102)/(2,1,6654) = 0,066$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{k2Q,F1} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{k2Q,F1}/X_{k2Q,F1}} = 1,02 + 0,98e^{-30,066} = 1,824$$

$$i_{p2Q,F1} = \kappa_{k2Q,F1} \sqrt{2} I''_{k2Q,F1} = 1,82472 \cdot 11,369 = 29,327 \text{ kA}$$

$R_{k2GK,F1}/X_{k2GK,F1} = (2,1,8688)/(2,17,2845) = 0,108$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{k2GK,F1} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{k2GK,F1}/X_{k2GK,F1}} = 1,02 + 0,98e^{-30,108} = 1,729$$

$$i_{p2GK,F1} = \kappa_{k2GK,F1} \sqrt{2} I''_{k2GK,F1} = 1,729 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,091 = 2,668 \text{ kA}$$

$$i_{p2F1} = i_{p2Q,F1} + i_{p2GK,F1} = 29,327 + 2,668 = 31,995 \text{ kA}$$

F2 kısa devre yerinde iki faz kısa devre akımı:

$$\underline{Z}_{(1)Q,F2} = \underline{Z}_{(2)Q,F2} = \underline{Z}_{kQ,F2} = (0,6400 + j3,1946) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2Q,F2} = \underline{Z}_{(1)kQ,F2} + \underline{Z}_{(2)kQ,F2} = 2 \cdot (0,6400 + j3,1946) = (1,2800 + j6,3892) \Omega$$

$$Z_{k2Q,F2} = |\underline{Z}_{k2Q,F2}| = \sqrt{1,2800^2 + 6,3892^2} = 6,5162 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)GK,F2} = \underline{Z}_{(2)GK,F2} = \underline{Z}_{kGK,F2} = (1,3390 + j15,7553) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2GK,F2} = \underline{Z}_{(1)kGK,F2} + \underline{Z}_{(2)kGK,F2} = 2 \cdot (1,3390 + j15,7553) = (2,6780 + j31,5106) \Omega$$

$$Z_{k2GK,F2} = |\underline{Z}_{k2GK,F2}| = \sqrt{2,6780^2 + 31,5106^2} = 31,6242 \Omega$$

I''_{k2} en büyük iki faz kısa devre akımı, (23) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2) için:

$$I''_{k2Q,F2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k2Q,F2}} = \frac{1,1 \cdot 34,5}{6,5162} = 5,824 \text{ kA}$$

$$I''_{k2G,F2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k2G,F2}} = \frac{1,1 \cdot 34,5}{31,6242} = 1,200 \text{ kA}$$

$$I''_{k2GK} = I''_{k2Q,F2} + I''_{k2GK,F2} = 5,824 + 1,200 = 7,024 \text{ kA}$$

$$I''_{k2F2} = 7,024 \text{ kA}$$

i_p iki faz darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$Z_{k2} = R_{k2} + jX_{k2}$ iki faz kısa devre yolunun empedansından

$$R_{k2Q,F2}/X_{k2Q,F2} = (2,0,6400)/(2,1,1946) = 0,200$$

oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2Q,F2} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{k2Q,F2}/X_{k2Q,F2}} = 1,02 + 0,98e^{-30,200} = 1,569$$

$$i_{p2Q,F2} = \kappa_{2Q,F2} \sqrt{2} I''_{k2Q,F2} = 1,569 \sqrt{2} \cdot 5,824 = 12,923 \text{ kA}$$

$R_{k2GK,F2}/X_{k2GK,F2} = (2,1,3390)/(2,15,7553) = 0,086$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2GK,F2} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{k2GK,F2}/X_{k2GK,F2}} = 1,02 + 0,98e^{-30,086} = 1,779$$

$$i_{p2GK,F2} = \kappa_{2GK,F2} \sqrt{2} I''_{k2GK,F2} = 1,779 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,200 = 3,019 \text{ kA}$$

$$i_{p2F2} = i_{p2Q,F2} + i_{p2GK,F2} = 12,923 + 3,019 = 15,942 \text{ kA}$$

F3 kısa devre yerinde iki faz kısa devre akımı:

$$\underline{Z}_{(1)Q,F3} = \underline{Z}_{(2)Q,F3} = \underline{Z}_{kQ,F3} = (0,0850 + j0,7624) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2Q,F3} = \underline{Z}_{(1)kQ,F3} + \underline{Z}_{(2)kQ,F3} = 2 \cdot (0,0850 + j0,7624) = (0,1700 + j1,5248) \Omega$$

$$Z_{k2Q,F3} = |\underline{Z}_{k2Q,F3}| = \sqrt{0,1700^2 + 1,5248^2} = 1,5342 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)GK,F3} = \underline{Z}_{(2)GK,F3} = \underline{Z}_{kGK,F3} = (0,0790 + j0,8297) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2GK,F3} = \underline{Z}_{(1)kGK,F3} + \underline{Z}_{(2)kGK,F3} = 2 \cdot (0,0790 + j0,8297) = (0,1580 + j1,6594) \Omega$$

$$Z_{k2GK,F3} = |Z_{k2GK,3}| = \sqrt{0,1580^2 + 1,6594^2} = 1,6669 \Omega$$

I''_{k2} en büyük iki faz kısa devre akımı, (23) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2) için:

$$I''_{k2Q,F3} = \frac{cU_n}{Z_{k2Q,F3}} = \frac{1,1 \cdot 10}{1,5342} = 7,170 \text{ kA}$$

$$I''_{k2G,F3} = \frac{cU_n}{Z_{k2G,F3}} = \frac{1,1 \cdot 10}{1,669} = 6,599 \text{ kA}$$

$$I''_{k2Q,F3} = I''_{k2GK,F3} = 7,170 + 6,599 = 13,769 \text{ kA}$$

$$I''_{k2F3} = 13,769 \text{ kA}$$

i_p iki faz darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$Z_{k2} = R_{k2} + jX_{k2}$ iki faz kısa devre yolunun empedansından $R_{k2Q,F3} / X_{k2Q,F3} = (2,0,0850) / (2,0,7624) = 0,111$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2Q,F3} = 1,02 + 0,98e^{-3 R_{k2Q,F3} / X_{k2Q,F3}} = 1,02 + 0,98e^{-30,111} = 1,722$$

$$i_{p2Q,F3} = \kappa_{2Q,F3} \sqrt{2} I''_{k2Q,F3} = 1,722 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,170 = 17,461 \text{ kA}$$

$R_{k2GK,F3} / X_{k2GK,F3} = (2,0,0790) / (2,0,8297) = 0,095$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2GK,F3} = 1,02 + 0,98e^{-3 R_{k2GK,F3} / X_{k2GK,F3}} = 1,02 + 0,98e^{-30,095} = 1,757$$

$$i_{p2GK,F3} = \kappa_{2GK,F3} \sqrt{2} I''_{k2GK,F3} = 1,757 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,599 = 16,397 \text{ kA}$$

$$i_{p2F3} = i_{p2Q,F3} + i_{p2GK,F3} = 17,461 + 16,397 = 33,858 \text{ kA}$$

F4 kısa devre yerinde iki faz kısa devre akımı:

$$\underline{Z}_{(1)Q,F4} = \underline{Z}_{(2)Q,F4} = \underline{Z}_{kQ,F4} = (0,0692 + j0,4876) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2Q,4} = \underline{Z}_{(1)kQ,F4} + \underline{Z}_{(2)kQ,4} = 2 \cdot (0,0692 + j0,4876) = (0,1384 + j0,9752) \Omega$$

$$Z_{k2Q,F4} = |\underline{Z}_{k2Q,F4}| = \sqrt{0,1384^2 + 0,9752^2} = 0,9850 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)GK,F4} = \underline{Z}_{(2)GK,F4} = \underline{Z}_{kGK,4} = (0,1503 + j2,1475) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2GK,F4} = \underline{Z}_{(1)kGK,F4} + \underline{Z}_{(2)kGK,F4} = 2 \cdot (0,1503 + j2,1475) = (0,3006 + j4,2950) \Omega$$

$$Z_{k2GK,F4} = |Z_{k2GK,F4}| = \sqrt{0,3006^2 + 4,2950^2} = 4,3055 \Omega$$

I''_{k2} en büyük iki faz kısa devre akımı, (23) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2) için:

$$I''_{k2QK,F4} = \frac{cU_n}{Z_{k2QK,F4}} \frac{1,1 \cdot 10}{0,9850} = 11,168 \text{ kA}$$

$$I''_{k2GK,F4} = \frac{cU_n}{Z_{k2GK,F4}} \frac{1,1 \cdot 10}{4,3055} = 2,555 \text{ kA}$$

$$I''_{k2F4} = I''_{k2Q,F4} + I''_{k2GK,F4} = 11,168 + 2,555 = 13,723 \text{ kA}$$

$$I''_{k2F4} = 13,723 \text{ kA}$$

i_p iki faz darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$Z_{k2} = R_{k2} + jX_{k2}$ iki faz kısa devre yolunun empedansından

$$R_{k2Q,F4} / X_{k2Q,F4} = (2,0,0692) / (2,0,4876) = 0,142$$

oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2Q,F4} = 1,02 + 0,98e^{-3 R_{k2Q,F4} / X_{k2Q,F4}} = 1,02 + 0,98e^{-3,0,142} = 1,660$$

$$i_{p2Q,F4} = \kappa_{2Q,F4} \sqrt{2} I''_{k2Q,F4} = 1,660 \sqrt{2} \cdot 11,168 = 26,218 \text{ kA}$$

$R_{k2GK,F4} / X_{k2GK,F4} = (2,0,1503) / (2,2,1475) = 0,070$ oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2GK,F4} = 1,02 + 0,98e^{-3 R_{k2GK,F4} / X_{k2GK,F4}} = 1,02 + 0,98e^{-3,0,070} = 1,814$$

$$i_{p2GK,F4} = \kappa_{2GK,F4} \sqrt{2} I''_{k2GK,F4} = 1,814 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,555 = 6,555 \text{ kA}$$

$$i_{p2F4} = i_{p2Q,F4} + i_{p2GK,F4} = 26,218 + 6,555 = 32,773 \text{ kA}$$

F5 kısa devre yerinde ki faz kısa devre akımı:

$$\underline{Z}_{(1)F5} = \underline{Z}_{(2)F5} = \underline{Z}_{kF5} = (0,05109 + j0,4083) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k2F5} = \underline{Z}_{(1)kF5} + \underline{Z}_{(2)kF5} = 2 \cdot (0,05109 + j0,4083) = (0,1022 + j0,8166) \Omega$$

$$Z_{k2F5} = |Z_{k2F5}| = \sqrt{0,1022^2 + 0,8166^2} = 0,8230 \Omega$$

I''_{k2} en büyük iki faz kısa devre akımı, (23) bağıntısından, $c=1,1$ (Çizelge 2.2) için:

$$I''_{k2F5} = 13,366 \text{ kA}$$

i_p iki faz darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$$Z_{k2} = R_{k2} + jX_{k2} \text{ iki faz kısa devre yolunun empedansından}$$

$$R_{k2F5}/X_{k2F5} = (2.0,05109)/(2.0,4083) = 0,125$$

oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2F5} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{k2F5}/X_{k2F5}} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,125} = 1,693$$

$$i_{p2F5} = \kappa_{2F5} \sqrt{2} I_{k2F5}'' = 1,693 \cdot 72.13,366 = 32,002 \text{ kA}$$

F6 kısa devre yerinde iki faz kısa devre akımı:

$$\underline{Z}_{(1)F6} = \underline{Z}_{(2)F6} = \underline{Z}_{kF6} = (0,68174 + j4,4533) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{k2F6} = \underline{Z}_{(1)kF6} + \underline{Z}_{(2)kF6} = 2 \cdot (0,68174 + j4,4533) = (1,3634 + j9,0660) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k2F6} = |\underline{Z}_{k2F6}| = \sqrt{1,3634^2 + 9,0660^2} = 9,1679 \text{ m}\Omega$$

I_{k2}'' en büyük iki faz kısa devre akımı, (23) bağıntısından, $c=1,0$ (Çizelge 2.2) için:

$$I_{k2,F6}'' = \frac{cU_n}{Z_{k2Q,F6}} = \frac{1,1,0,4}{9,1679 \cdot 10^{-3}} = 43,63 \text{ kA}$$

$$I_{k2F6}'' = 43,630 \text{ kA}$$

i_p iki faz darbe kısa devre akımının hesabı için bölüm 2.9.2.3.2 ye göre, yaklaşık olan yöntem A (16):

$$Z_{k2} = R_{k2} + jX_{k2} \text{ iki faz kısa devre yolunun empedansından}$$

$$R_{k2F6}/X_{k2F6} = (2.0,68174)/(2.4,4533) = 0,153$$

oranı bulunur ve bölüm 2.9.2.2.2 de κ için verilen bağıntıdan:

$$\kappa_{2F6} = 1,02 + 0,98e^{-3R_{k2F6}/X_{k2F6}} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,153} = 1,639$$

$$i_{p2F6} = \kappa_{2F6} \sqrt{2} I_{k2F6}'' = 1,639 \cdot \sqrt{2} \cdot 43,630 = 101,130 \text{ kA}$$

4.3. F1 ve F2 kısa devre yerlerindeki faz-toprak kısa devre akımları için I''_{kl} ve i_{p1} kısa devre akımlarının hesabı:

F1 kısadevre yerindeki faz-toprak kısa devresinde kısa devre akımı, toprağa değen faz ile F1 kısa devre noktası üzerinden QT transformatörünün topraklanmış olan yıldız noktasına; ayrıca, toprağa değen faz ile T transformatörünün topraklanmış olan yıldız noktasına akar.

Kısa devre empedansları:

$$\underline{Z}_{(1)Q,F1} = \underline{Z}_{(2)Q,F1} = (0,1102 + j1,6654) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)Q,F1} = \underline{Z}_{(0)QTLV} + \underline{Z}_{(0)E} = (0,0833 + j1,1168) + (3,20 + j0) = (60,0833 + j1,1168) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k1Q,F1} = \underline{Z}_{(1)Q,F1} + \underline{Z}_{(2)Q,F1} + \underline{Z}_{(0)Q,F1}$$

$$= 2\underline{Z}_{(1)Q,F1} + \underline{Z}_{(0)Q,F1} = 2(0,1102 + j1,6654) + (60,0833 + j1,1168) = (60,3037 + j4,4476) \Omega$$

$$|2\underline{Z}_{(1)Q,F1} + \underline{Z}_{(0)Q,F1}| = \sqrt{60,3037^2 + 4,4476^2} = 60,4675 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)GK,F1} = \underline{Z}_{(2)GK,F1} = (1,8688 + j17,2845) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)GK,F1} = \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2} + \underline{Z}_{(0)L3} + \underline{Z}_{(0)THV} + \underline{Z}_{(0)E}$$

$$= (0,0191 + j0,0774) + (0,5015 + j5,9640) + (0,0092 + j0,0372) +$$

$$(0,3267 + j5,2833) + (3,20 + j0) = (60,8565 + j11,3619) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k1GK,F1} = \underline{Z}_{(1)GK,F1} + \underline{Z}_{(2)GK,F1} + \underline{Z}_{(0)GK,F1}$$

$$= 2\underline{Z}_{(1)GK,F1} + \underline{Z}_{(0)GK,F1} = 2 \cdot (1,8688 + j17,2845) + (60,8565 + j11,3619)$$

$$= (64,5941 + j45,9309) \Omega$$

$$|2\underline{Z}_{(1)GK,F1} + \underline{Z}_{(0)GK,F1}| = \sqrt{64,5941^2 + 45,9309^2} = 79,2595 \Omega$$

Faz-toprak kısa devresi için I''_{kl} başlangıç kısa devre akımı, (29) bağıntısından:

$$I''_{k1Q,F1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)Q,F1} + \underline{Z}_{(0)Q,F1}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 34,5}{60,4675} = 1,087 \text{ kA}$$

$$I''_{k1F1,GK} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)Q,F1} + \underline{Z}_{(0)Q,F1}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 34,5}{79,2595} = 0,829 \text{ kA}$$

$$I''_{k1F1} = I''_{k1F1,Q} + I''_{k1F1,GK} = 1,087 + 0,829 = 1,916kA$$

$$I''_{k1F1} = 1,916kA$$

F2 kısa devre yerindeki faz-toprak kısa devresinde kısa devre akımı, toprağa değen faz ile F2 kısa devre noktası üzerinden QT transformatörünün topraklanmış olan yıldız noktasına; ayrıca, toprağa değen faz ile T transformatörünün topraklanmış olan yıldız noktasına akar.

Kısa devre empedansları:

$$\underline{Z}_{(1)Q,F2} = \underline{Z}_{(2)Q,F2} = (0,6400 + j3,1946) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)Q,F2} = \underline{Z}_{(0)QTLV} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2} + \underline{Z}_{(0)L3} + \underline{Z}_{(0)E}$$

$$= (0,0833 + j1,1168) + (0,0191 + j0,0774) + (0,5015 + j5,9640) + (0,0092 + j0,0372)$$

$$+ (3.20 + j0) = (60,6128 + j7,1954) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k1Q,F2} = 2\underline{Z}_{(1)Q,F2} + \underline{Z}_{(0)Q,F2} = 2(0,6400 + j3,1946) + (60,6128 + j7,1954)$$

$$= (61,8928 + j13,5846) \Omega$$

$$|2\underline{Z}_{(1)Q,F2} + \underline{Z}_{(0)Q,F2}| = \sqrt{61,8928^2 + 13,5846^2} = 63,3661 \Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)GK,F2} = \underline{Z}_{(2)GK,F2} = (1,3390 + j15,7553) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)GK,F2} = \underline{Z}_{(0)THV} + \underline{Z}_{(0)E} = (0,3267 + j5,2833) + (3.20 + j0) = (60,3267 + j5,2833) \Omega$$

$$\underline{Z}_{k1GK,F2} = \underline{Z}_{(1)GK,F2} + \underline{Z}_{(2)GK,F2} + \underline{Z}_{(0)GK,F2}$$

$$\underline{Z}_{k1GK,F2} = 2\underline{Z}_{(1)GK,F2} + \underline{Z}_{(0)GK,F2} = 2(1,3390 + j15,7553) + (60,3267 + j5,2833)$$

$$= (63,0047 + j36,7939)$$

$$|2\underline{Z}_{(1)GK,F2} + \underline{Z}_{(0)GK,F2}| = \sqrt{63,0047^2 + 36,7939^2} = 72,9615 \Omega$$

Faz-toprak kısa devresi için I''_{kI} başlangıç kısa devre akımı, (29) bağıntısından:

$$I''_{k1Q,F2} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{Z_{k1Q,F2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 34,5}{63,36615} = 1,037kA$$

$$I''_{k1GK,F2} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{Z_{k1GK,F2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 34,5}{72,9615} = 0,901kA$$

$$I''_{k_1F_2} = I''_{k_{1Q,F_2}} + I''_{k_{1GK,F_2}} = 1,037 + 0,901 = 1,938kA$$

$$I''_{k_{1F_2}} = 1,938kA$$

Çizelge 4. 2 Üç faz kısa devre akımları:

Öge	Gerilim [kV]	Kısadevre yeri						
		154kV bara	F1	F2	F3	F4	F5	F6
QT Transformatörü	34,5		14,387					
Yıldız Entegre barası	34,5			8,103				
	10				15,898			
Generatör	10					15,838		
T1-2 Transformatörü	10						15,432	
	0,4							51,261

Çizelge 4. 3 İki faz (Toprak temassız) kısa devre akımları:

Öge	Gerilim [kV]	Kısadevre yeri					
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
QT Transformatörü	34,5	12,460					
Yıldız Entegre barası	34,5		7,024				
	10			13,769			
Generatör	10				13,723		
T1-2 Transformatörü	10					13,366	
	0,4						43,630

Çizelge 4.4 Faz-toprak kısa devre akımları:

Öge	Gerilim [kV]	Kısadevre yeri	
		F1	F2
QT Transformatörü	34,5	1,617	
Yıldız Entegre barası	34,5		1,938

5. ANSI/IEEE C37.010.1999 VE KISA DEVRE HESABININ TEORİK UYGULAMASI

ANSI/IEEE C37.010.1999 standardının amacı 1000 V ve üzerinde orta ve yüksek gerilim kesicilerinin seçilmesidir. Alçak gerilim kesicileri için belirlenmiş standart, bu tezde üzerinde durulmamış olan C37.013-1981'dir.

ANSI standardı p.u cinsinden ideal bir gerilim kaynağı ve onun önünde reaktanstan oluşan eşdeğer devre üzerinden basitleştirilmiş kısa devre hesabı yapmamıza imkân sağlar. E gerilim kaynağının tepe değeri hatanın oluştuğu baranın en yüksek çalışma voltajıdır ve hata öncesi gerilimi gösterir. Eğer çalışma gerilimi bilinmiyorsa nominal voltaj kullanılabilir.

Uygun düzeltici katsayılar yoluyla ANSI standardı DC ve AC kısa devre bileşenleri göz önüne alır. DC bileşen kısa-devre noktasından görünen eşdeğer empedansın X/R oranına bağlı olarak, AC bileşen ise motor ya da eşzaman generatör gibi döner makinelerin davranışları değerlendirilerek hesaplanır. AC bileşen ile ilgili olarak 2 olasılık göz önüne alınır, döner makine kısa-devre noktasına uzak ya da yakın olması durumları.

ANSI standardı kesiciyi simetrik akıma göre seçme eğilimindedir. Göz önüne alınan ister simetrik ister asimetrik olsun standart üç faz ve faz-toprak kısa-devreler üzerinde yoğunlaşır.

ANSI/IEEE C37.010.1999 da yapılan 3 çeşit çalışma vardır bunlar.

- a-) İlk çevrim çalışması(firt cycle duty)
- b-) Kontak ayırma çalışması(concat parting duty)
- c-) Zaman gecikmeli cihazlar için kısa devre hesabı(short-circuit current for time delayed relaying devices)

5.1. İlk Çevrim Çalışması

Efektif akımın yarım döngüsüdür ve hata oluşumu sonrasındaki ilk döngü içinde oluşacak stresin oluşumunun incelenmesini sağlar. Hesaplamayı yapmak için ilk çevrim devresi kurulmalıdır. Bunun için durağan yüklerin empedansı ihmal edilmeli seri empedanslar ve çarpım katsayısıyla düzeltilmiş döner makinelerin geçici hal empedansları hesaba katılmalı. Reaktanslar, empedans yerine kullanılabilir. Döner makinelerin çarpım faktörleri tablodan alınır. İndüksiyon motorları güçleri ve kutup sayılarına göre 3 gruba

ayrılır. İlk çevrim çalışmasında, hesaplamalarda yerel ya da uzak kısa-devre akım kaynaklarının göz önüne alınmasını gerektirmez.

İlk olarak eşdeğer reaktans X belirlenir, first-cycle heabı E/X oranı ile yapılabilir. Bu simetrik çalışma kesicinin açma ve kapama kapasitesinde daha az olmalıdır ve DC bileşen hesaba katılmaz.

Standart X/R değerine ulaşmak için 2 değişik devreyi önerir. İlki sadece reaktansa diğeri sadece rezistanstan oluşur. Bu prosedür kompleks empedans kullanımından daha güvenlidir. X ve R sanal ve reel parçalardır.

5.2.Kontak Ayırma Çalışması

Bu çalışma kesici kutupları ayrılması sırasında oluşan akımın hesabı için yapılır. Standartta en düşük kontak ayırma zamanı 2.5-4 çevrim arası olan kesiciler dikkate alınmıştır. Hata öncesi gerilim kaynağı ve eşdeğer empedans ile oluşturulmuş kesici devre yapılmalıdır. Eş değer empedans daha önce belirtildiği gibi hesaplanır. Döner makinelerin geçici hal reaktansı çarpım kat sayısı farklıdır. Çünkü en az kontak ayırma zamanındaki AC bileşen ilk çevrimdekinden daha büyüktür.

ANSI standardı uygun kesici seçiminde 2 prosedür sağlar. En basit olasılık X/R bilinmiyorsa, yeterli kesiciyi simetrik kapasitesi $2.25 E/X$ 'ten daha büyük seçmektir. Ötekisi ise X/R oranı analiz edilmesi ve sistem rezistansının bilinmesi gerekmektedir. Eğer X/R oranı 15'ten küçükse kesici simetrik kapasitesi E/X değerine büyük-eşit seçilebilir, aksi halde daha detaylı bir prosedür(AC ve DC azalma miktarı için ayar isimli) gündeme gelir ve müteakip olarak değerlendirilir.

Bu metodun izinde ilk olarak E/X hesaplanır. X/R oranına bağlı olan uygun düzeltici katsayıyı kullanarak kesiciyi seçmek mümkündür. Kesicinin nominal simetrik kapasitesi $F.E/X$ 'ten büyük olmalıdır. Bu yüzden geciktirici aygıt toplam kısa-devre akımı için de yeterli olmalıdır.

F katsayısı oluşturulurken eğrilerin 2 durumu uygundur standardın 5.3.2 maddesinde geçen uzak eğri ve yakın olan. Öncelikle hataya yakın noktadaki generatör deneye dayalı olarak bilinen AC ve DC bileşenler hesaba katılır. Sonraki eğri uzak generatörde olan hata ile ilgilidir ve DC bileşen içindir. Bu durumda $F.X/R$ 'nin analitik fonksiyonu olarak bulunabilir. Lokal ve uzak kaynaklar görüldüğünde hangi eğriden faydalanılacağına karar vermek zordur. Daha yüksek değerli bir katsayı uygulamak daha güvenli bir yol olacaktır.

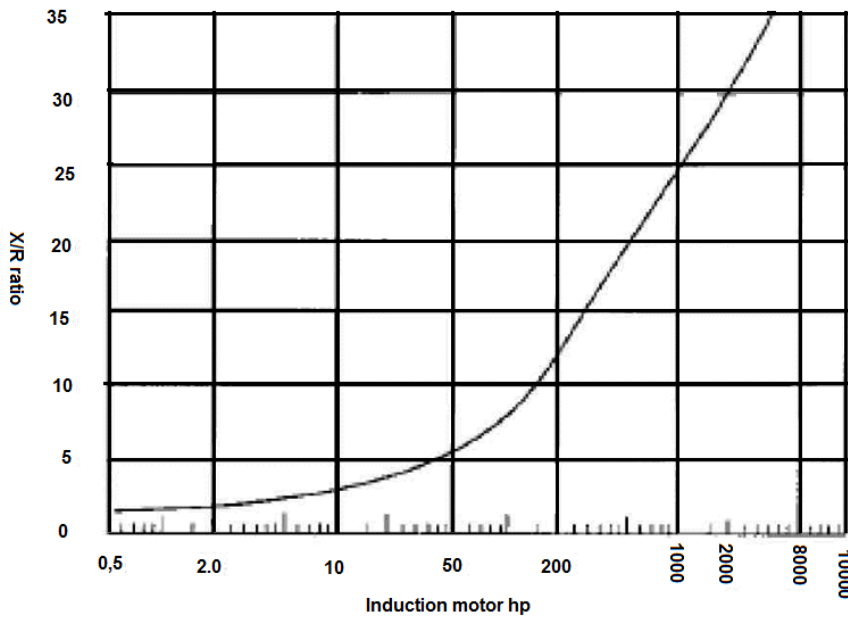
Tekil olarak hataya enterpolasyon tekniği uygulandığında, her bir durum için farklı çarpım faktörü uygulanır.

5.3. Zaman Gecikmeli Cihazlar İçin

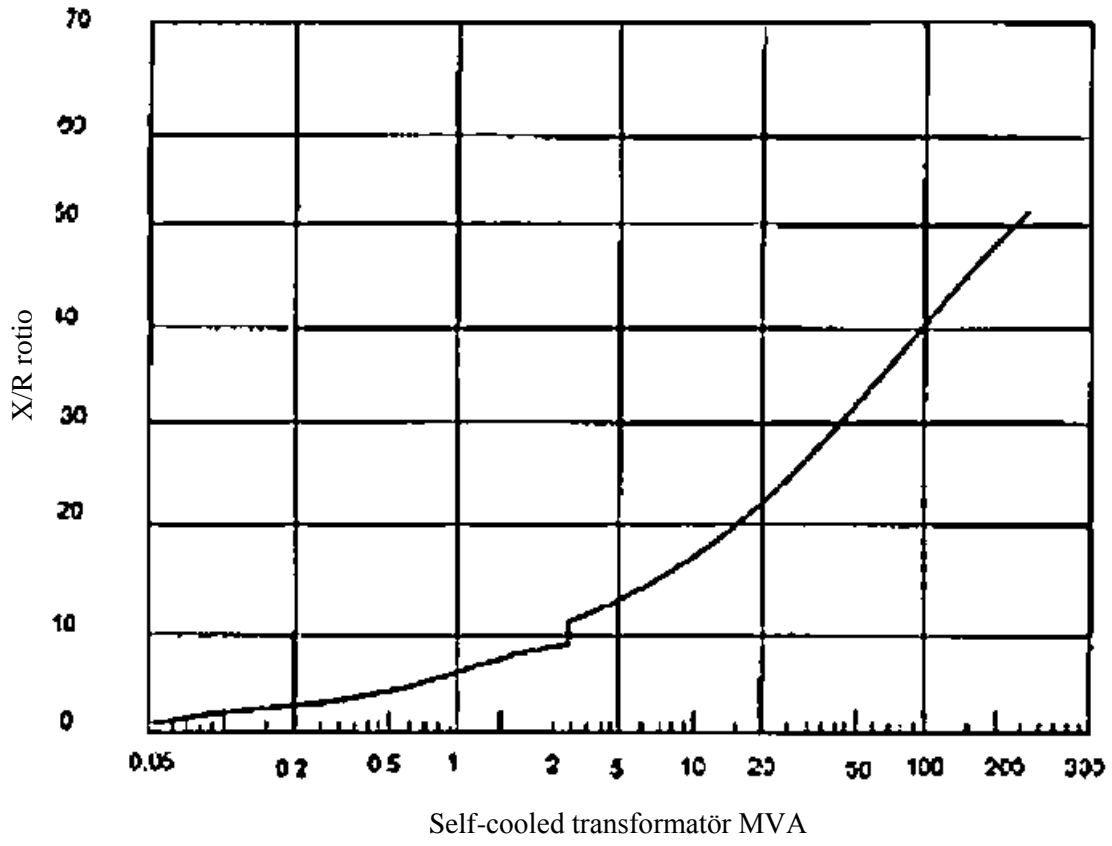
Zaman gecikmeli rölesi olan uygulamalarda 6 çevrimin ötesine uygulanması gereken çalışmadır. E/X'ten elde edilen kısa-devre akımı, oluşturulan devrenin sadece jeneratörlerden oluşturulup, hat ve trafo gibi pasif elemanlar ve omitting motorlar göz ardı edilir. Generatörler transient reaktansları ile ya da AC bileşende hesaba katılan daha büyük reaktans ile gösterilir. DC bileşen 0 alınmalıdır. Buradan bulunacak değer IEC 909'daki I_k ile kıyaslanabilir.

Çizelge 5. 1 AC ve DC eğrisi ayarlama

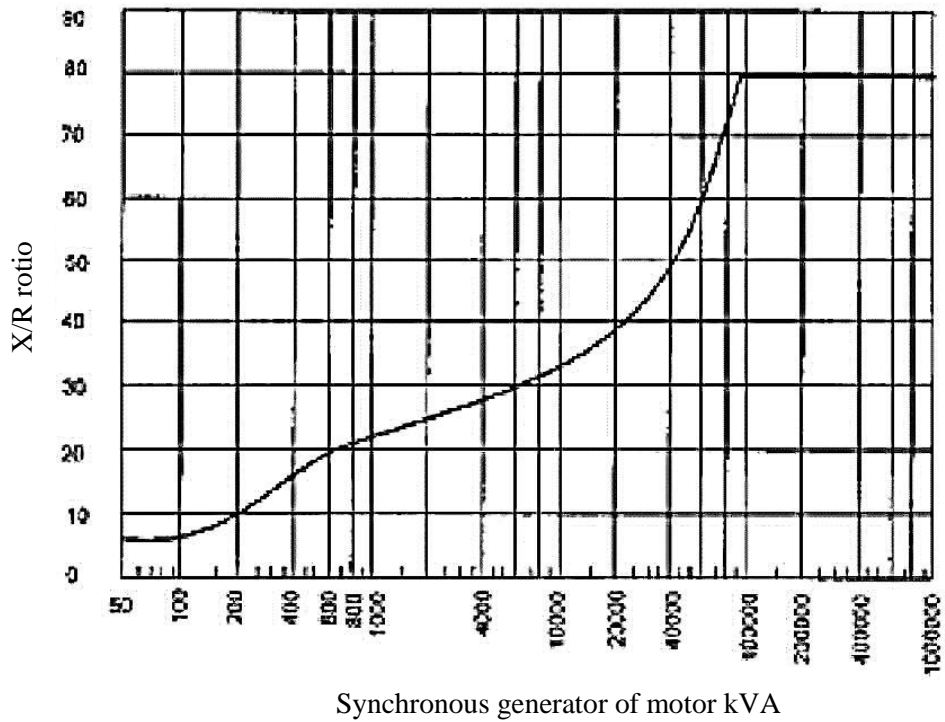
Kısa devre rezistansları için çarpım	
Sistem Bileşenleri	Yaklaşık Rezistans
Tirbün generatörler ve kondansatörler	Efektif rezistans
Çıkık kutuplu generatör ve motorlar	Efektif rezistans
Asenkron motorlar	Armatürün rezistansının 2.2 katı
Güç transformatörleri	AC yük bakır kayıpları
Reaktörler	AC rezistans
Kablo ve Hatlar	AC rezistans



Şekil 5.1 X/R oranı bilinmeyen asenkron motorlar için beygir gücüne bağlı X/R oranı eğrisi



Şekil 5.2 X/R oranı bilinmeyen zorlamalı soğutması olmayan transformatörler için güce bağlı X/R oranı eğrisi



Şekil 5.3 X/R oranı bilinmeyen senkron makinalar için güce bağlı X/R oranı eğrisi

Çizelge 5.2 Döner makinaların kısa devre empedansları için çarpım faktörleri

Döner makine çeşidi	+dizin reaktansları için	
	Interrupting duty(per unit)	Closing and latching duty (per unit)
Tüm tubo ve amortisör sargılı hidro generatörler	$2.0X_d''$	$2.0X_d''$
Amortisör sargılı olmayan hidro generatörler	$0.75X''$	$0.75X''$
Tüm senkron motorlar	$2.5X_d''$	$2.0X_d''$
Asenkron motorları	$2.5X_d''$	$2.0X_d''$
250 hp üstü, 3600 r/min	$2.5X_d''$	$2.0X_d''$
50 hp den.,1000 hp e, 1800 r/min yada altı	$3.0X_d''$	$2.0X_d''$
50 hp den 250 hp e, 3600 r/min	$3.0X_d''$	$2.0X_d''$
İhmal edilmiş 3 fazlı asenkron motorları, 50 hp altı ve tüm tek fazlı motorlar Alçak gerilim sistemleri için		
50 hp üstü asenkron motorları	$3.0X_d''$	$2.2X_d''$
50 hp altı asenkron motorları	00	$2.67X_d''$

5.4. Kısa devre Hesabının Teorik Uygulaması

ANSI standardında hesaplamada kullanılan per unit değerler yerine daha önce hesaplanmış, TS EN 60909 örneğindeki değerler kullanılacaktır.

5.4.1 2.1- + dizin empedansların hesabı:

UED = Ulusal elektrik şebekesi:

5.4.2 Şebeke fideri

$$Z_{Qt} = \frac{U_{mQ}^2}{S_{kQ}''} = \frac{1}{t_r^2} = \frac{154^2}{4834} \cdot \frac{1}{(154/34,5)^2} = 0,2462\Omega$$

$$X_{Qt} = 0,995Z_{Qt} = 0,995 \cdot 0,2462 = 0,245\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,1X_{Qt} = 0,2 \cdot 0,2462 = 0,02462\Omega$$

$$Z_{Qt} = (0,02462 + j0,245)\Omega$$

5.4.3. Transformatörler:

İndirici transformatör QT:

$S_{rQT}=100$ MVA, $U_{rQTLV}=34,5$ kV, $u_{krQT}=\%11,75$ ve $u_{RrQT}=\%0,7$ için:

$$Z_{QTLV} = \frac{u_{krT}}{\%100} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rQT}} = \frac{\%11,75}{\%100} \cdot \frac{34,5^2}{100} = 1,3985\Omega$$

$$R_{QTLV} = \frac{u_{RrQT}}{\%100} = \frac{U_{rQTLV}^2}{S_{rQT}^2} = \frac{\%0,7}{\%100} \cdot \frac{34,5^2}{100} = 0,0833\Omega$$

$$X_{QTLV} = \sqrt{Z_{QTLV}^2 - R_{QTLV}^2} = \sqrt{1,3985^2 - 0,0833^2} = 1,396\Omega$$

$$\underline{Z}_{QTLV} = (0,0833 + j1,396)\Omega$$

5.4.4. Step-up transformatör T:

$S_{rT}=20$ MVA, $U_{rTLV}=10$ kV, $u_{krT}=\%9,88$ ve $P_{krT}=109,792$ kW için:

$$Z_{TLV} = \frac{u_{krT}}{\%100} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{\%9,88}{\%100} \cdot \frac{10^2}{20} = 0,4940\Omega$$

$$R_{TLV} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{P_{krT}U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = \frac{109,792 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2}{20^2} = 0,02745\Omega$$

$$X_{TLV} = \sqrt{Z_{TLV}^2 - R_{TLV}^2} = \sqrt{0,4940^2 - 0,02745^2} = 0,4932\Omega$$

$$\underline{Z}_{TLV} = (0,02745 + j0,4932)\Omega$$

$$\underline{Z}_{THV} = \underline{Z}_{TLV} t^2 = (0,02745 + j0,4932) \cdot \left(\frac{34,5}{10}\right)^2 = (0,3267 + j5,8703)\Omega$$

5.4.5. Generatör:

$R_G/X''_d = 0,07$ için

$$\underline{Z}_G = R_G + jX''_d = 0,07X''_d + jX''_d = X''_d(0,07 + j) = \left(\frac{x''_d}{\%10}\right)^2 = (0,3267 + j5,8703)\Omega$$

$$\underline{Z}_G = \frac{\%16,6}{\%100} \frac{10^2}{7,73} (0,07 + j) = (0,1503 + j2,1475)\Omega$$

Asenkron motorlar MT1, MT2 ve MT3:

$$Z_{M1} = \frac{1}{L_{R1} / I_{rM1}} \cdot \frac{U_{rM1}^2}{S_{rM1}} = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{10^2}{8,777} = 2,0715 \Omega$$

Burada

$$S_{rM1} = \frac{P_{rM1}}{\cos \varphi_{r1} \eta_{r1}} = \frac{7500}{0,88 \cdot 0,971} = 8,777 \text{ kVA}$$

$$R_{M1} / X_{M1} = 0,10, \text{ bundan } X_{M1} = 0,995 Z_{M1}$$

$$X_{M1} = 0,995 \cdot 2,0715 = 2,0611 \Omega$$

$$R_{M1} = 0,10 \cdot 2,0611 = 0,2061 \Omega$$

$$\underline{Z}_{M1} = (0,2061 + j2,0611) \Omega$$

$$Z_{M2} = \frac{1}{I_{LR2} / I_{rM2}} \cdot \frac{U_{rM2}^2}{S_{rM2}} = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{10^2}{2,438} = 7,4577 \Omega$$

Burada:

$$S_{rM2} = \frac{P_{rM2}}{\cos \varphi_{r2} \eta_{r2}} = \frac{2100}{0,89 \cdot 0,968} = 2,438 \text{ kVA}$$

$$R_{M2} / X_{M2} = 0,10, \text{ bundan } X_{M2} = 0,995 Z_{M2}$$

$$X_{M2} = 0,995 \cdot 7,4577 = 7,4204 \Omega$$

$$R_{M2} = 0,10 \cdot 7,4204 = 0,7420 \Omega$$

$$\underline{Z}_{M2} = (0,7420 + j7,4204) \Omega$$

$$Z_{M3} = \frac{1}{I_{LR3} / I_{rM3}} \cdot \frac{U_{rM3}^2}{S_{rM3}} = \frac{1}{6,5} \cdot \frac{10^2}{1,924} = 7,9962 \Omega$$

$$S_{rM3} = \frac{P_{rM3}}{\cos \varphi_{r3} \eta_{r3}} = \frac{1600}{0,86 \cdot 0,967} = 1,924 \text{ kVA}$$

$$R_{M3} / X_{M3} = 0,15, \text{ bundan } X_{M3} = 0,989 Z_{M3}$$

$$X_{M3} = 0,989 \cdot 7,9962 = 7,9082 \Omega$$

$$R_{M3} = 0,15 \cdot 7,9082 = 1,1862 \Omega$$

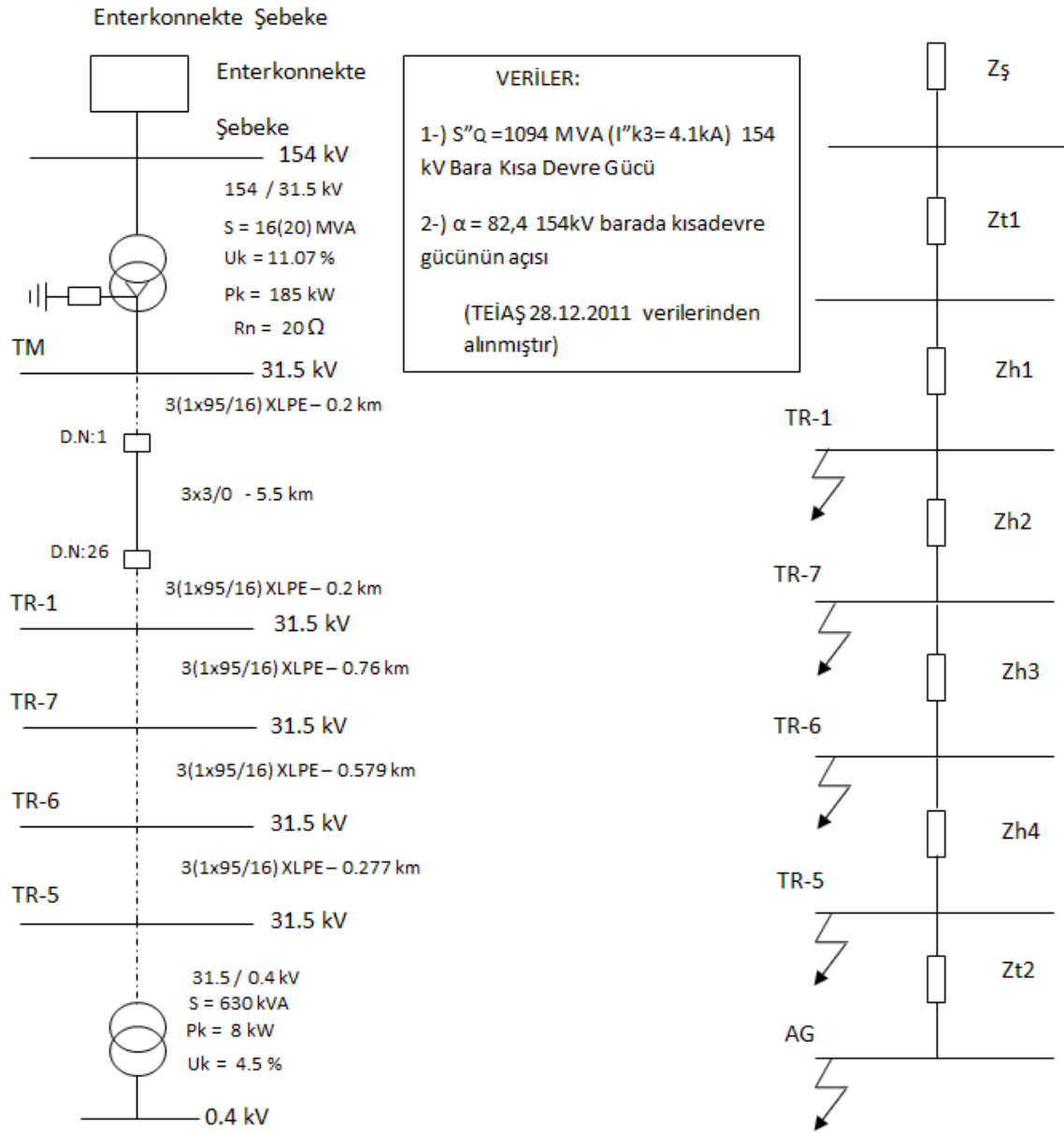
$$\underline{Z}_{M3} = (1,1862 + j7,9082) \Omega$$

6.TUNCELİ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ AG-YG ELEKTRİK PROJESİ

6.1.Kısa devre hesapları:

Bölgeyi besleyecek olan Mevcut enerji alınacak 3/0 F6(Nazimiye yeni) hattı ve ileride Tunceli OSB tarafından tesis edilecek 3/0 hatları aynı Trafo merkezinden çıktıklarından ve aynı mesafede olduklarından yapılacak hesaplar her iki hat için geçerli olacaktır.

Şebekenin tek kutuplu şeması ile TEİAŞ ve FEDAŞ'tan alınan Tunceli Organize Sanayi Bölgesinin ana besleme hatlarına ait parametreler aşağıdaki gibidir.



**TEDAŞ TÜRKİYE ELEKTRİK DAĞITIM A.Ş. GENEL MÜDÜRLÜĞÜ DAĞITIM HAT
ŞEHİR ŞEBEKELERİ OG-AG ELEKTRİK PROJESİ YAPIM ESASLARI EL KİTABI-5**

Kablo TİPİ	Damar Kesiti(mm2)		Nötr akımın dönüş yolu devreleri							
			Nötr iletkeni ve şilt		Nötr iletkeni şilt ve toprak		Şilt		Şilt ve toprak	
			R0/R1	X0/X1	R0/R1	X0/X1	R0/R1	X0/X1	R0/R1	X0/X1
Dört damarlı yada kuşaklan mış üç damarlı kablo	1 KV	10	3	2	1.5	22	6.5	1.5	1.25	25
	1 KV	25	3.2	2.5	2.2	17	9	1.4	1.5	25
	1 KV	35	3.3	2.6	2.5	15	10	1.3	2	25
	1 KV	50	3.5	2.7	2.9	10	13	1.3	2.5	24
	1 KV	70	3.6	2.8	3.2	8	16	1.25	3	23
	1 KV	120	3.7	2.9	3.4	5	19	1.25	5	22
	1 KV	180	3.8	2.9	3.5	4	22	1.2	10	20
	1 KV	240	3.9	3	3.6	3.5	23	1.2	10	17
Kuşaklan mış üç damarlı kablo	6 KV	50					10	1.3	2.5	20
	6 KV	300					20	1.2	10	12
	10 KV	50					8	1.3	2.7	16
	10 KV	300					16	1.2	10	9
	20 KV	50					5	1.2	3	10
	20 KV	300					11	1.1	9	5
H Kablo	20 KV	50					6	1.1	3	10
	20 KV	300					12	1.1	9	5
	30 KV	50					5	1.1	3	7
	30 KV	300					10	1.1	8	4

Çizelge 6.1

R₀: Sıfır bileşen direnci

R₁: Doğru bileşen direnci

X₀: Sıfır bileşen indüktif reaktansı

X₁: Doğru bileşen indüktif reaktansı

Verilen değerler damar başınadır.

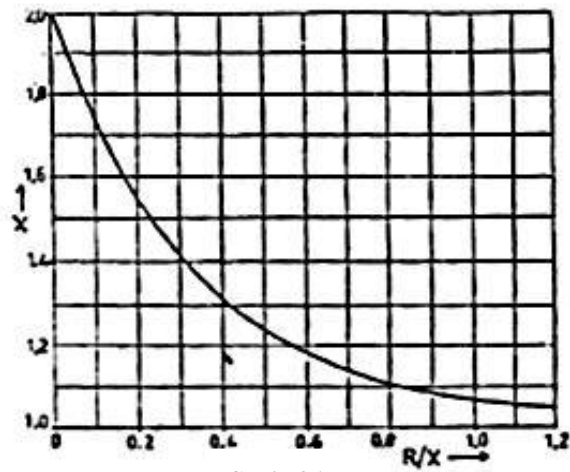
Hattın Yapısı	Tek Devre	Çift Devre
Çelik Toprak Telli	2.9	4.4
Çelik-AL. Toprak Telli	2.5	3.5
Toprak Telsiz	3.2	5.1

Çizelge 6.2 Havai hatlarda X_0/X_1 oranları

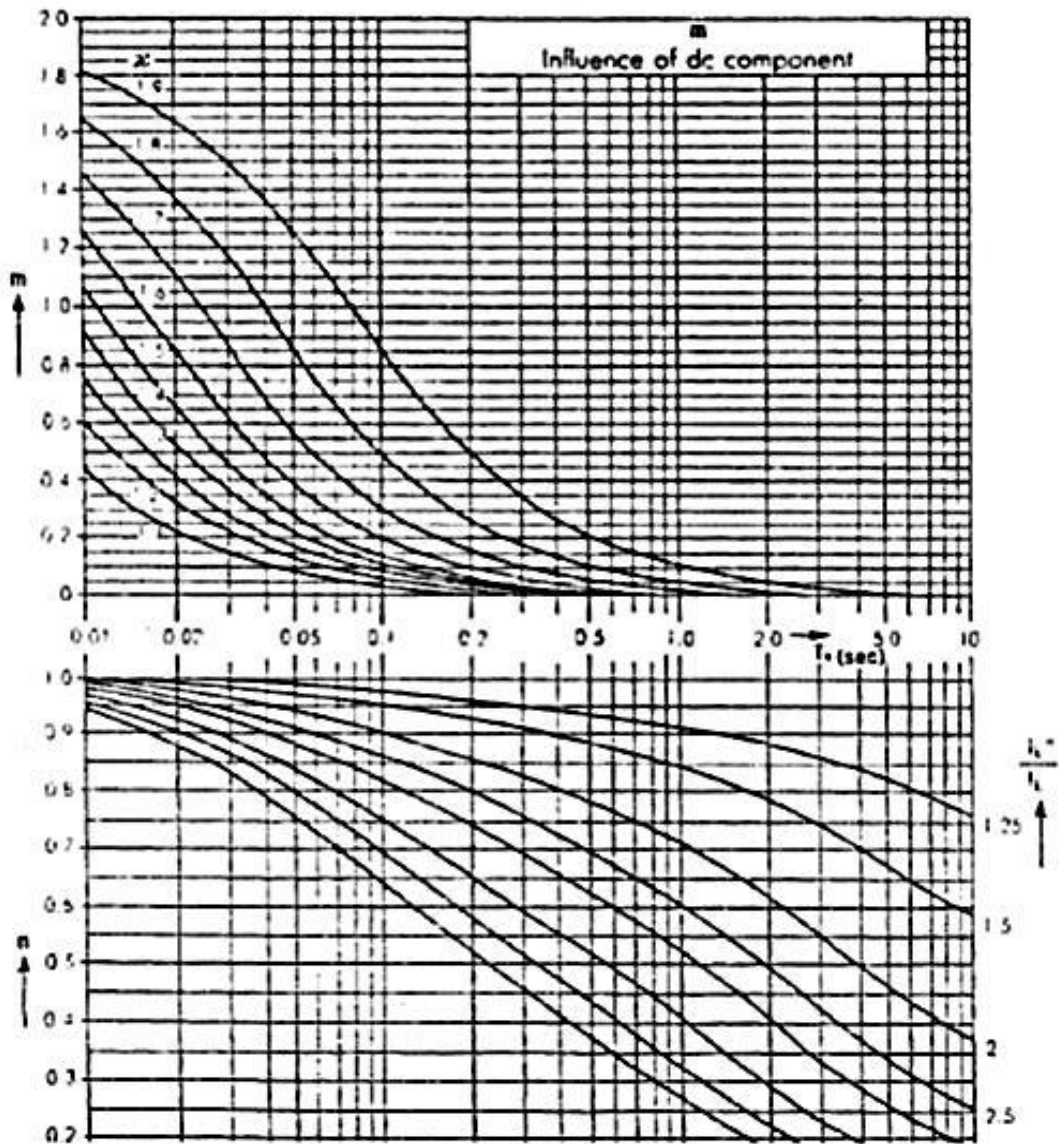
Genelde pratik bir değer olarak tek devreli orta gerilimli hatlarda $X_0=3X_1$ alınarak yapılan hesapta hata payı çok azdır.

GERİLİM KESİT(mm ²)	DİRENÇ R(Ω/km)	18 / 30 KV , X (Ω/km)		
		X (Ω/km)	Ω/km	Ω/km
25				
35				
50	0.387	0.2325	0.1477	0.1382
70	0.268	0.2231	0.1414	0.1288
95	0.193	0.2136	0.1319	0.1225
120	0.153	0.2073	0.1288	0.1194
150	0.124	0.2011	0.1257	0.1131
185	0.0991	0.1979	0.1194	0.1099
240	0.0754	0.1885	0.1162	0.1068

Çizelge 6.3 Kablo Kesitlerine göre km başına R ve X değerleri



Şekil 6.1



Şekil 6.2

Yukarıdaki verilere göre empedans Hesapları

1- Enterkonnekte Şebeke Empedansı (Z_Q)

$$Z_Q = \frac{1.1 \times 100}{S''_e} = \frac{1.1 \times 100}{1094} = 0.1005(\%)$$

$$R_Q = Z_Q \times \cos\alpha \quad R_Q = 0.0274$$

$$X_Q = Z_Q \times \sin\alpha \quad X_Q = 0.0967 \quad Z_Q = 0.0274 + j0.0967$$

2- 154/31.5 kV – 16 MVA Trafo Empedansı (Z_{t1})

$$Z_{t1} = Ur + jU_x$$

$$Ur = \frac{Pk}{S} \times 100 \quad Ur = 1.156 (\%)$$

$$U_x = \sqrt{(Uk^2 - Ur^2)} \quad U_x = \sqrt{(11.07^2 - 1.156^2)} \quad U_x = 11.009 (\%)$$

$$Z_{t1} = 1.156 + j11.009 \quad \text{MVA güç bazında Empedans } Z_{t1}(\%M) = \frac{Z_{t1}}{16}$$

$$Z_{t1} = 0.0722 + j 0.6881$$

3- Nötr Direnci (R_n)

$$R_n = 20\Omega$$

$$R_n = \frac{R_n \times 100}{U_n^2} \quad R_n = 2.016 (\%)$$

4- ENH Hatları Empedansları (Z_h)

1x95/16 XLPE Kablo : $R_h = 0.1930 (\Omega/\text{km})$ $X_h = 0.2136 (\Omega/\text{km})$ (XLPE kablo için km başına omik ve endüktif direnç değerleri)

$$\frac{X_{h0}}{X_h} = 4 \quad \frac{R_{ho}}{R_h} = 8 \quad X_{ho} = 0,8544 \quad R_{ho} = 1.544 \quad (\text{Çizelge 6.1})$$

3/0 İletken : $R_h = 0.3366 (\Omega/\text{km})$ $X_h = 0.385 (\Omega/\text{km})$

$$\frac{Xh_0}{Xh} = 3 \quad \frac{Rh_0}{Rh} = 3 \quad Xh_0 = 1,155 \quad Rh_0 = 1,009 \quad (\text{Çizelge 6.2})$$

$$Z_h = \frac{Xh}{U_n^2} \times 100 \times L \quad Zh_o = \frac{Zh_0}{U_n^2} = \times 100 \times L$$

$$\begin{aligned} Zh_1 &= 0.1944 + j 0.222 & Zh_{1o} &= 0.0622 + j 0.6747 \\ Zh_2 &= 0.0148 + j 0.0164 & Zh_{2o} &= 0.1183 + j 0.0654 \\ Zh_3 &= 0.0113 + j 0.0125 & Zh_{3o} &= 0.0901 + j 0.0499 \\ Zh_4 &= 0.0054 + j 0.0060 & Zh_{3o} &= 0.0431 + j 0.0239 \end{aligned}$$

5- 31.5/0.4 kV – 630 kVA Trafo Empedansı (Z_{t2})

$$Z_{t2} = Ur + jU_x$$

$$Ur = \frac{Pk}{S} \times 100 \quad Ur = 1.27 (\%)$$

$$U_x = \sqrt{(Uk^2 - Ur^2)} \quad U_x = \sqrt{(4,5^2 - 1.27^2)} \quad U_x = 4.32 (\%)$$

$$Z_{t2} = 1.27 + j4.32 \quad \text{MVA güç bazında Empedans } Z_{t2}(\%M) = \frac{Z_{t1}}{0,63}$$

$$Z_{t2} = 2.016 + j 6.857$$

A- TR-1 BARASINDA KISADEVRE AKIM HESABI

Üç Faz Kısa Devre Akımı

$$Z_{e\varnothing} = Z_s + Z_{t1} + Z_{h1}$$

$$Z_{e\varnothing} = (0.0274 + 0.0722 + 0.1944) + j(0.0967 + 0.6881 + 0.222)$$

$$Z_{e\varnothing} = 0.294 + j 1.007 \quad Ze\varnothing = 1.049 (\%)$$

$$I''_{k3} = \frac{1.1 \times 100}{\sqrt{3} \times U \times Z_{e\varnothing}} \quad I''_{k3} = \frac{1.1 \times 100}{\sqrt{3} \times 31.5 \times 1.049} = 1.922 \text{ kA}$$

Faz-Toprak Kısa Devre Akımı

$$Z_{e\phi 0} = Z_{\phi} + Z_{t1} + 3R_n + Z_{h10}$$

$$Z_{e\phi 0} = (0.0274 + 0.0722 + 6.048 + 0.0622) + j(0.0967 + 0.6881 + 0.6747)$$

$$Z_{e\phi 0} = 6.2098 + j 1.4595 \quad Z_{e\phi 0} = 6.38 (\%)$$

$$Z_{e\phi 0} / Z_{e\phi} = 6.082 > 1 \text{ dir.}$$

Bu durumda Faz-Toprak akımı, iki faz-Toprak akımından daha büyüktür.

$$I''_{k1} = I''_{k3} \times \frac{3}{2 \times Z_{e\phi 0} / Z_{e\phi}} \quad I''_{k1} = 1.922 \times \frac{3}{2 \times 6.082 / 1.049} = 0.713 \text{ kA}$$

Asimetrik Kısa Devre Akımları

$$\frac{R}{X} = \frac{0.294}{1.007} = 0.292 \rightarrow X = 1.4$$

$$I_s = X \cdot \sqrt{2} \times I''_{k3} = 1.4 \sqrt{2} \times 1.922 = 3.94 \text{ kA} \quad (\text{Şekil 6.1})$$

Termik Kısa Devre Akımları

$X = 1.4$, t ve X 'e göre tablodan $m = 0.000$ bulunur. (Şekil 6.2)

Kesicinin Açma Zamanı = 0.6 Sn

Arıza yeri kaynaktan uzak olduğundan $I_k''/I_k = 1$ alınabilir.

Buna ve t 'ye göre tablodan $n = 1$ bulunur.

$$I_t = I''_{k3} \times \sqrt{(m+n)} = 1.9222 \text{ kA} \text{ , kablo ve havai hat iletkeni seçiminde}$$

$$I_t = I''_{k3} \times \sqrt{(m+n) \times t / 1} = 1.489 \text{ kA} \text{ , akım trafosu seçiminde}$$

KESİCİNİN SEÇİMİ

VDE standartlarına göre kesici akımı $I_a = \mu \times I''_{k3}$ olarak tanımlanmıştır.

μ kaynaktan uzak kısa devrede 1 alınabilir. $I_a = I''_{k3} = 1.922 \text{ kA}$

$$S''_{k3} = \sqrt{3} \times U \times I''_{k3}$$

$$S''_{k3} = 105 \text{ MVA}$$

Seçilen Kesici : 36 kV 630A 16kA 770 MVA dır.

Seçilen Kesici Kısa devre kesme gücü 770 MVA > 105 MVA uygundur.

B- TR-5 AG Barasında Kısadevre Akım Hesabı

Üç Faz Kısa Devre Akımı

$$Z_{eş} = Z_s + Z_{t1} + Z_{h1} + Z_{h2} + Z_{h3} + Z_{h4} + Z_{t2}$$

$$Z_{eş} = 2.3415 + j7.899 \quad Z_{eş} = 8.2387 (\%)$$

$$I''_{k3} = \frac{1.1 \times 100}{\sqrt{3} \times U \times Z_{eş}} \quad I''_{k3} = \frac{1.1 \times 100}{\sqrt{3} \times 0.4 \times 8.2387} = 19.27 \text{ kA}$$

$$S''_{k3} = \sqrt{3} \times U \times I''_{k3}$$

$$S''_{k3} = 13.35 \text{ MVA}$$

Seçilen Alçak Gerilim malzemeleri (TMS, AG Pano, AG Box) kısa devre dayanım akımı minimum 25kA seçilmiştir.

7. SONUÇLAR

Kısa devre meydana geldiğinde, mevcut sistemin eşdeğer empedansı generatörün iç empedansı ve kısa devre yolu üzerindeki empedansın toplamına indirgenir. Bu durumda hesaplanan eşdeğer empedans, sistemin çalışması planlanan empedans değerine göre çok küçük olacağından, kısa devre akımı nominal akıma göre çok büyük değerler alır ve sisteme ciddi zararlar verir. Bu zararlı etkiler akımın karesiyle artan sisteme kalıcı zarar veren mekanik ve ısı etkileri, kısa devre arkının yakıcı etkisi, nötrü topraklanmış olan sistemlerde faz toprak kısa devresinde ölüme yol açabilecek temas ve adım gerilimleri meydana gelmesi olarak sıralanabilir.

Elektrik tesislerinde kısa devre olayı etki olarak çok farklı şekilde olabilmektedir. Kısa devrenin darbe şeklinde ani olarak baş göstermesi ile devreden geçen büyük kısa devre akımları, tesis elemanları üzerinde dinamik kuvvetlerin oluşmasına ve bunların mekanik yoldan zorlanmasına yol açmaktadır. Devreden uzun süre geçen, sürekli kısa devre akımları ise tesis elemanlarının ısınmasına ve malzemenin termik bakımdan zorlanmasına sebep olur. Bu sebeple hem tesis hemde işletme personeli bundan zarar görebilir. Kısa devre olayının sebep olduğu arızalar sonucunda; işletme kısmen veya tamamen durur ve kademe kademe enerji üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi artık normal olarak devam edemez. Ayrıca arızanın sebep olduğu hasar büyük onarım masraflarını da beraberinde getirir.

Elektrik dağıtım sistemlerinde hesaplara uygun olarak tesis edilmiş bir tesiste kısa devreden kaynaklı meydana gelebilecek bir arızada, dengesizlik veya aşırı gerilimde tesisat elemanları arızanın olumsuz etkilerine rahatlıkla dayanabilecek ve arıza en kısa sürede sistemden izole edilebilecektir.

Kısa devre akımlarına ve topraklama dirençlerine; projelendirme, tesis ve işletme aşamalarında gereken önem verilmez ise sağlıklı bir röle koordinasyonunun kurulamayacağını, bu takdirde korunması istenilen cihazların koruma ve denetimi de sağlıklı olarak yapılamayacağını bu nedenle koruma ve denetim cihazlarına gereksiz yatırım yapılacağı aşıkardır. Olumsuz durumdan kurtulmak için devre elemanlarını koordineli bir işleve oturtmak önem teşkil etmektedir.

Aygen ve ark. (1995), Monte Carlo yöntemini kullanan bir bilgisayar programı geliştirilerek örnek bir sistem üzerinde kısa devre analizine uygulamışlardır. Belirli bir bara için arıza akımının olasılık dağılımı histogram şeklinde elde edilmiştir. Sonuçta bu dağılımdan görülen, en kötü arıza durumunun gerçekleşme olasılığı %1 olduğu görülmüştür.

Kısa devre akımının gerçekleşme olasılıkları güç sistemleri tasarımında maliyet açısından göz önüne alınması gerektiği ifade edilmektedir. Olasılığa bağlı arıza analizinde Monte Carlo yöntemi ve analitik yöntem kullanılarak arıza akımının olasılık yoğunluk fonksiyonları elde edilmiştir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçların benzerliği sayısal uygulama sonuçlarında görülmektedir. Bu yöntemin daha karmaşık sistemlere uygulanabilecek şekilde geliştirilmesiyle Monte Carlo yönteminin yerine geçeceği belirtilmektedir.

Chen ve Chung (1996), Güç akış çalışmaları için, standart Per unit metoduna alternatif olarak kompleks kısa devre gücü (MVA) metodu önerilmektedir. Konvansiyonel Per unit değerler yerine güç sistem ekipmanlarını MVA metoduyla temsil etmekle baz değerlere ihtiyaç kalmamaktadır. Önerilen metodoloji klasik yöntemden daha sade ve istenmeyerek yapılan küsurat hatalarına karşı daha az hassastır. Eğitim ve endüstride önemli potansiyele sahip yöntemin, güç akış çalışmaları için uygulaması sunulmaktadır. Bu araştırmanın uygulama safhasında klasik yöntemler yerine kısa devre gücü metodu etkili bir şekilde kullanılmıştır.

Bu araştırmadan alınan sonuç neticesinde;

Güç sistemlerinde kısa devre analizi için; Teorik bilgiler ve hesaplamalar için gerekli ispatlı formüller, yayımlanmış olan çeşitli ulusal ve uluslararası makaleler ve master tezleri ile desteklenerek, Güç sistemlerinde kısa devre ve topraklama dirençlerine sağlıklı bir röle koordinasyonu yapabilmek için verilmesi gereken önem üzerinde durulmuştur. Kısa devre hesaplamaları için; Monte Carlo, Analitik ve kısa devre gücü (MVA) yöntemleri karşılaştırmak sureti ile kısa devre arıza analizini varsayılan hat parametreleri yerine, Tunceli İli Merkez İnönü mahallesinde kurulacak olan Organize Sanayii Bölgesi enerji nakil hattının gerçek hat parametreleri TEİAŞ ve FEDAŞ işletme müdürlüklerinden alınıp uygulanabilirlik açısından en ekonomik olan yönteme indirgenerek gerçek kısa devre hesabı yapılmıştır.

KAYNAKLAR

Akın, B., 2001. Sinüsoidal Olmayan Şebekelerden Beslenen Lineer Olmayan Yüklerde, Harmonik Akım ve Gerilimlerin Güç Faktörü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Anonim, 1998. IEC 60909. Short - circuit current calculations in three phase a.c. systems 45.

Anonim, 2005. Connection to the HV utility distribution network. Schneider Electric - Electrical installation guide 37.

Anonim, 2006. TS EN 60909-0. Üç fazlı a.a. sistemlerde kısa devre akımları bölüm 0: akımların hesaplanması, mart 2006. 57.

Anonymous., 1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE IAS Std.519-1992.

Arifoğlu, U., 2002. Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Alfa Bas. Dağ. İstanbul, 135-137.

Arrilaga, J., Watson, N. R., 2003. Power System Harmonics, John Wiley & Sons, Ltd West Sussex, England.

Arrilaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R., Wood, A.R., 1997. Power System Harmonics, John Wiley & Sons, USA,

Ay, S., 1996. Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri ve Filtre Tasarımı, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 95, Kasım-Aralık.

Batista,J., Afonso,J., Martins,J., 2003. Low-Cost Power Quality Monitor Based on a PC, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, 9-11 July.

Bayram, M., 1977. Güç Katsayısının Düzeltilmesi ve Güç Kondansatörleri, Elektroteknik Mecmuası, 3-25, Mart

Bayram, M., 2000. Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Bilki, F., 2008. Reaktif Güç ve Kompanzasyonu Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Boyrazoğlu, B., Ünsar, Ö., Polat, B., 2007., Elektrik İletim Sisteminde Akım ve Gerilimdeki Harmonik Bileşenlerin Gerçek Zamanlı Ölçülmesi, II.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli/Türkiye, Mayıs.

**Buhan,S.,Boyrazoğlu,B.,Ünsar,Ö.,Altıntaş,E.,Haliloğlu,B.,Polat,B.,
Özedemirci,E.,2007.** Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Mobil Güç Kalitesi Ölçümleri, II.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli/Türkiye, Mayıs.

Chi-Jui,W., Wei-Nan,C., 1997. Developing a Harmonics Education Facility in a Power System Simulator for Power Engineering Education, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 12, No.1, February.

Costa,J., Pregitzer,R., Sousa,T., Batista,J., Afonso,J., 2005. A Case of Power Quality Assesment Using a Developed Power Quality Monitor, IEEE 1 st International Conference on Electrical Engineering Coimbra, Portugal,10-12 October.

Çorapsız, M. H., 2004. Pasif Harmonik Filtrelemede Pratik Yaklaşımlar , 3e Electrotech Aylık Dergisi, 1(116): 104-107 s.

Demirbaş, Ş., Bayhan, S., 2009. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Gerçek Zamanlı Ölçüm ve Analizi”, Gazi Üniv. Müh.Mim.Fak. Der., Cilt 24, No 3, 461-468.

Demirci, T., Kalaycıoğlu, A., Salor, Ö., Pakhuylu, S., İnan, T.,

Küçük, D.,Güder M., can. T., Akkaya, Y., Bilgen, S., Çadırcı, I., Ermiş, M., 2008. Türkiye Elektrik İletim Sistemi için Yurt Çapında Güç Kalitesi İzleme Ağı ve Veri Değerlendirme Merkezi: Güncel Gelişmeler, Sinyal İşleme, İletişim ve Uygulamaları Kurultayı, Didim/Türkiye, Nisan.

Didem, E., 2005. Harmonikli Ortamlarda Kompanzasyon, I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Mayıs.

Dugan R.C. vd., 2002. Electrical Power System Quality , Mc-Graw Hill, Second Edition.

Efe, Serhat B., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Eralp, F.Y., 1985. Mühendisler için Fourier Yöntemi ile Dalga Analizi, Nur Ofset Matbaası, İstanbul.

Erkan, E., 1996. Nonlinear Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ersamut, R., 2009. Statik Var Kompanzasyonu Sistemlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Filiz,C., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Grady. W.N, Gilleskie. R.J., 1993. Harmonics and How They Relate to Power Factor, Proc. of the EPRI Power Quality, Issues & Opportunities Conference (PQA 93), San Diego, 13p.

Güler, Ö., 1995. Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Sakıncaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Huang, S.J. and Wu, C.J., 1999. A Control Algorithm for Three-Phase Three-Wired Active Power Filters Under Nonideal Mains Voltages, Power Electronics, IEEE Transactions on, 14, 753-760.

İzmirlioğlu, I., 1990. Fourier Serileri ve Laplace Dönüşümleri, Marmara Üniversitesi Matbaa Eğitimi Bölümü, İstanbul.

Kakilli, A., Tunçalp, K. ve Sucu, M., 2008. Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi ve Simülasyonu, Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi, Sayı 1.Cilt 20 sf 109-115.

Karakas, A., 2000. Harmonikli Devrelerde Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi,

Kocatepe, C. Uzunoğlu, M. ve Yumurtacı, R., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Kocatepe, C., 1994. Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kocatepe. C., Uzunoglu, M., 2001. Harmoniklerin Sınırlanması ve Harmonik Standartları, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 150.

Lin,H., 2006. An Internet-Based Graphical Programming Tool for Teaching Power System Harmonic Measurement, IEEE Transactions on Education, Vol 49, No 3, August.

Mack G., Santoso S., 2001 Understanding Power System Harmonics, IEEE Power Engineering Review, November.

Makram E.B., Haines R.B., Girgis A.G., 1992. Effect of Harmonic Distortion in Reactive Power Measurement, IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol.28, No.4, July/August, usa., 271p.

Mandal, R., Basu, S.K., Kar, A., Chowdhury.S.P., 1994. A Microcomputer Based Power Factor Controller., IEEE Trans. On inds. Electron. Vol. 41, No.3 June 157p.

Marganitz, A., 1992. Power Measurement Of Periodic Current and Voltage by Digital Signal Processing. Eur. Trans. power, pp.117-123.

Miller, T.J.E., 1982. Reactive Power Control Systems, John Wiley & Sons inc. U.S., 15p.

Moreno, J., Paracula, J., 2000. A PC-based Tool for Evaluation of Harmonics and Power in Three- Phase Power Electronic Converters, IEEE 7 th Computers in Power Electronics Workshop, USA,July.

Mutlu,H. H., 2011. DSP Tabanlı Paralel Aktif Güç Filtresi İle Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Konya.

Salor, Ö., Buhan, S., Ünsar, Ö., Boyrazoğlu, B., Altıntaş, E., Atalık, T., Haliloğlu, B., İnan, T., Kalaycıoğlu, A., Terciyanlı, A., Demirci, T., Özdemirci, E., Çadircı, I., Ermiş, M., 2008. Mobile Monitoring System to take Nationwide PQ Measurements on Electricity Transmission Systems , Measurement.

Sankaran, C., 2002. Power Quality, CRC Press, New York.

Sheble, G.B., 1987. Reactive Power Basic, Problems and Solutions, IEEE Press, U.S., 167p.

Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A., 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, Industrial Electronics, IEEE Transactions on,46, 960-971.

Sucu M., 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyon, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şekkeli,M., 2006. Hassas Bir Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Gerekli Güçlerin Hesabında Temel Bileşenlerin Kullanılması , KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 9, Sayı 2, 66-70, K.Maraş.

Tunçalp K., Kakilli, A., Sucu, M., 2003. Bir Alçak Gerilim Elektrik Enerji Tesisinde Harmonik Ölçüm Sonuçlarının Matlab’da Simülasyonu ve Pasif Filtre Uygulaması, Türkiye 9.Enerji Kongresi, İstanbul, Türkiye.

Türker, T., Öztürk, S., Alboyacı, B., Yörükeren, N., Çetinkaya, H. B., 2005. Harmonikli Yük Akımlarının Konut Bölgelerinde Kullanılan Transformatörler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli-Türkiye, Mayıs.

URL-1, [http:// www.seltaselektrik.com/teknik/181.pdf](http://www.seltaselektrik.com/teknik/181.pdf), 15 Mayıs 2013.

Vural, O., 2003. Alçak Gerilim Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Yalçın, B., 2000. Aktif Harmonik Filtreler, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:134, Mayıs. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen BilimleriEnstitüsü, İstanbul.

Yılmaz, M., 2006. Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi İçin Bir Analiz, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Anonim, 1998. *IEC 60909*. Short - circuit current calculations in three phase a.c. systems 45. Anonim, 2005. *Connection to the HV utility distribution network*. Schneider Electric - Electrical installation guide 37.

Anonim, 2006. *TS EN 60909-0*. Üç fazlı a.a. sistemlerde kısa devre akımları bölüm 0: akımların hesaplanması, mart 2006. 57.

Arifoğlu, U., 2002. *Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi*. 1. Baskı. Alfa Basım Yayım dağıtım Ltd. Şti., Yay. No: 1065, İstanbul. 459.

Aygen, Z., Batman, M. A., Tarkan, N., 1995. Elektrik Enerji sistemlerinde Monte Carlo Yöntemi Kullanılarak Olasılığa Bağlı Kısa devre Analizi. *Elektrik Mühendisliği 6.Ulusal Kongresi Bildirileri*. 11- 17 Eylül 95. Bursa. 41-44.

Aygen, Z., Batman, M. A., Tarkan, N., 1997. Olasılığa Bağlı Kısa Devre Analizinde Analitik Yöntemin ve Monte Carlo Yönteminin Karşılaştırılması. *Elektrik Mühendisliği 7.Ulusal Kongresi Bildirileri*. 1997.

Bayazıt, B., 2000. *Enerji sistemlerinin Kısa Devre Arıza Analizi* (yüksek lisans tezi.). SA Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.

Chen, T.H., Chuang, H.J., 1996. Applications of the complex short-circuit MVA method to power flow studies. *Science Direct Electric Power Systems*, (38):135-143.

Çakır, H., 1986. *Elektrik Güç Sistemleri Analizi*. Y Ü, Mühendislik Fak., İstanbul. 321.

Çamlı, N., 1995. Kısa Devre Akımı ve Toprak direncinin Primer ve sekonder Cihazların seçimine ve Röle Koordinasyonuna Etkileri. *Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi Bildirileri*. 11-17 Eylül 1995. Bursa. 162-167.

Grainger, J.J., Stevenson, W.D., 1994. *Power System Analysis*. McGraw-Hill, Inc. America. 777.

Haktanır, D., 2001. Yüksek Gerilimde Kısa Devre Ve Kısa Devrelerin Üniter Hesabı. *Emobilim*, cilt no (1) sayı 2:8-13.

Küçük, S., 2005. *Elektrik Tesislerinde Arızalar*. Türkiye Petrol Rafineleri A.Ş., İzmit. 299.

Metiner, D., Dağkiran. F.Z., 2002. *Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Generatörlerin Elektriki Karakteristikleri* TEİAŞ Bilgi İşlem Dairesi SA-2002/1 Raporu.

Noblat-Metz, B., Dumas. F., Thomasset, G., 2000. Calculation of short-circuit currents *Cahier Technique Schneider Electric no. 158 / p.32* <http://www.schneider-electric.com>.

Özdemir, A., 1997. *EMTP Yardımıyla Kısa Devre Akımının Dinamik Simülasyonu* (yüksek lisans tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Özgenel, O., 1992. *Enerji İletim Hatlarının Modellenmesi ve Mesleki Eğitime Katkısı* (yüksek lisans tezi). M ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

10.12.1979 Merkez Tunceli doğumludur. İlk orta ve lise (E.M.L.-Elektrik) öğrenimini Tunceli’de tamamladı. 2002’de Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinden mezun oldu. 2006’da Türkiye İş Bankası İstanbul operasyon merkezi bilgi işlem biriminde göreve başladı. 2010 yılı ilkbahar dönemi Tunceli Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisansa başladı. 2009’dan beri Fedaş Tunceli İl Müdürlüğü Proje Tesis biriminde Etüt proje, kontrol ve inceleme görevinde Teknik personel olarak görev yapmaktadır.