



T.C.

ALTINBAŞ ÜNİVERSİTESİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE
İZOLASYON KOORDİNASYONU**

Yasin SELÇUK

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN

İstanbul, 2024

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE İZOLASYON KOORDİNASYONU

Yasin SELÇUK

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

ALTINBAŞ ÜNİVERSİTESİ

2024

Yasin SELÇUK tarafından hazırlanmış ve 26/01/2024 tarihinde sunulmuş ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE İZOLASYON KOORDİNASYONU başlıklı tez Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak **oy çokluğu** ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN

Danışman

Tez Savunma Sınavı Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN

Elektrik- Elektronik
Mühendisliği Bölümü,
Altınbaş Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mesut ÇEVİK

Elektrik- Elektronik
Mühendisliği Bölümü,
Altınbaş Üniversitesi

Doç. Dr. Suat İLHAN

Elektrik Mühendisliği
Bölümü,
İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak bütün şartları sağladığımı beyan ederim.

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışlara uygun olarak edinildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde, bu çalışmada, orijinal olmayan tüm materyalleri ve sonuçları tamamen alıntı yaptığımı ve referans gösterdiğimi de beyan ederim.

Yasin SELÇUK

İmzası

İTHAF

Tezin hazırlanma sürecinde bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim değerli danışman tez hocam Prof. Dr. Kevork MARDİKİYAN'a teşekkürleri bir borç bilirim.

Çalışma sürecimde en zor anlarımızı paylaştığım değerli eşime, beni bugünlere getiren aileme, kardeşlerime ve yeğenim Barış her zaman yanımda oldukları, beni destekledikleri, sevdikleri için sonsuz teşekkürler.



ÖZET

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE İZOLASYON KOORDİNASYONU

SELÇUK, Yasin

Yüksek Lisans, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Altınbaş Üniversitesi

Danışman: Prof. Dr. Kevork MARDİKİYAN

Tarih: Ocak/2024

Sayfa: 100

Bu çalışmanın ana hedefi, başlangıçta yalıtım koordinasyonunun tanım kavram ve anlatımını sağlayarak ardından iç ve dış aşırı gerilimlerin çeşitlerini ve onların hesaplamalarını göstermektir. Yüksek gerilimde delinme ve dayanma mukavemetlerinden hareket ederek konvansiyonel ve istatistiksel yalıtım koordinasyonunun ana ilkelerini ele alarak ve sonuç olarak da aşırı gerilimlere karşı koruma cihazlarının çeşitliliğini ve tasarımını göstermektir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Gerilim, İzolasyon Koordinasyonu, Güç Sistemleri Yalıtım, Yıldırım, Yıldırımdan Koruma.

ABSTRACT

INSULATION COORDINATION IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

SELÇUK, Yasin

M.Sc., Electrical and Computer Engineering, Altınbaş University,

Supervisor: Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN

Date: January/2024

Pages: 100

The aim of this study is at the beginning to define main conception, definition and explanation of insulation coordination and then variety of internal and external intensive stress and proving their calculations. By depending on, in the high strength, drilling and resistant strength, the aim is to discuss the main principles of conventional and statistical insulation coordination, starting from puncture and withstand strengths at high voltage, and as a result to show the diversity and design of protection devices against overvoltages.

Keywords: High Voltage, Insulation Coordination, Power Systems Insulation, Lightning, Lightning Isolation.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TABLO LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 İÇ VE DIŞ AŞIRI GERİLİMLER	1
2. BÖLÜM	4
2.1 YILDIRIM AŞIRI GERİLİMLERİ	4
2.1.1 Yıldırım Sonucu Oluşan Yürüyen Dalgalar	5
2.1.2 Yıldırımın Faz Hattına Düşmesi	7
2.1.2.1 Örnek elektrik direği modellenmesi ve oluşan anşırı gerilimler	10
2.1.3 Yıldırımın Direkteki Koruma Hattına İsabet Etmesi	13
2.1.4 Yıldırımın Direğe Düşmesi	16
3. BÖLÜM	18
3.1 İÇ AŞIRI GERİLİMLER.....	18
3.2 İÇ AŞIRI GERİLİMLERİN TÜRLERİ.....	18
3.2.1 Ferrorezonans	19
3.2.2 Anahtarlama Aşırı Gerilimleri	23
3.2.2.1 Dirençli anahatarlamalar	24
3.2.2.2 Geçici toparlanma gerilimi	25
3.2.2.3 Kısa devrenin kaldırılması	26

3.2.2.4 Yük anahatarlaması	28
4. BÖLÜM	31
4.1 GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLER	31
4.1.1 Endüktif Akımların Kesilmesi Sonucu Aşırı Gerilimler.....	32
4.1.2 Yük Atma.....	33
4.1.3 Harmonik Rezonans	34
4.1.4 Ferranti Olayı	34
4.1.5 Toprak Arızaları.....	36
4.1.5.1 Tek faz toprak arızası	37
4.1.5.2 Faz-faz arızası	38
4.1.5.3 İki faz –toprak arızası	39
4.1.5.4 Simetrik üç faz arızası	40
4.1.5.5 Simetrik bileşenler	41
5. BÖLÜM	45
5.1 YÜKSEK GERİLİM İSTASYONLARINDA İZOLASYON KOORDİNASYONU.	45
5.2 AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUYUCU CİHAZLAR	46
5.2.1 Şönt Bağlı Aşırı Gerilim Koruyucu Fonksiyonu	46
5.2.2 Hat Boşlukları	48
5.2.2.1 Ark boynuzları.....	48
5.2.2.2 Eklatörler.....	50
5.2.3 Parafudrlar.....	50
5.2.3.1 Değişken dirençli parafudrlar.....	51
5.2.3.2 SiC parafudr	53
5.2.3.3 Metal oksit parafudr	53

5.2.4 Paratonerler	55
5.2.5 Aktif Paratonerler.....	57
5.3 KORUNMUŞ BÖLGELERDEKİ İSTASYONLAR	60
5.3.1 Gelen Gerilim Dalgalarının Büyüklüğü ve Şekli	60
5.3.2 Parafudr Gerilimi ve Koruma Seviyesi.....	61
5.3.3 Ekipman Yalıtım Seviyesi	63
5.3.4 Mesafe Etkisi	64
5.4 ANORMAL ANAHTARLAMA AŞIRI GERİLİMLERİ.....	66
5.4.1 Kapasitif Anahtarlama	66
5.4.2 Akım Koparma.....	67
5.4.3 Küçük Endüktif Akımların Kesilmesi	67
6. BÖLÜM	69
6.1 HABERLEŞME MERKEZ İSTASYONU İÇİN YILDIRIMA KARŞI KORUMA TASARIMI ÇALIŞMASI.....	69
6.1.1 Koruma Taslağının Hazırlanması	69
6.1.2 Yapının Tepe Noktasından Başlayarak Korumanın Tasarlanması	77
6.1.3 Topraklamanın Yapının Temeline ve Çevresine Uygulanması	78
7. BÖLÜM	84
7.1 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	84
REFERANSLAR	86

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1:Yıldırım Sebebiyle İzolatörlerdeki Gerilimler	13
Tablo 6.1:Yapının İnşa Özellikleri ve Bağlı Özellikleri.....	71



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Dağıtım Sistemi [1].	2
Şekil 2.1: Yıldırımın Bulutta Oluşumu [5].	5
Şekil 2.2: Yıldırım Darbesi [4].	6
Şekil 2.3: Yıldırımın Hatta ve Direğe Düşmesi [6].	7
Şekil 2.4: Örnek Elektrik Direği.	10
Şekil 2.5: Biasleştirilmiş Model.	11
Şekil 2.6: Yıldırım Akımı Değeri (1/50 μ s).	12
Şekil 2.7: A fazında Oluşan Gerilimler.	13
Şekil 2.8: Yıldırımın Koruma Hattına Düşmesi [9].	15
Şekil 2.9: Direk Tepe Gerilimi.	16
Şekil 3.1: Aşırı Gerilimlerin Zamana Bağlı Değişimi.	19
Şekil 3.2: Kondansatörsüz ve Kompanzasyonsuz Sistem.	21
Şekil 3.3: 48 MVAr Gücünde Kompanzasyonlu Durum.	22
Şekil 3.4: 0.5 MVAr Kısa Kablo Hattı.	23
Şekil 3.5: Akım, Toparlanma ve Geçici Toparlanma Gerilimi.	25
Şekil 3.6: YG Hattına Etki Eden Dış Faktörler[18].	26
Şekil 3.7: Kısa Devre Tipleri.	27
Şekil 3.8: Bakım Amaçlı Mahalli Topraklama.	28
Şekil 3.9: Yük Ayırıcı Kumanda [19].	29
Şekil 4.1: Tek Faz Toprak Kısa Devre [22].	38
Şekil 4.2: Faz-Faz Kısa Devre Arızası.	39
Şekil 4.3: İki Faz Toprak Arızası [22].	40

Şekil 4.4: Üç Faz Kısa Devre Arızası [22].	41
Şekil 4.5: Üç Fazlı Dengeli Sistem.	42
Şekil 4.6: Dengeli Olmayan Üç Ayrı Simetrik Bileşen [24].	43
Şekil 5.1: Transformatörün Dayanım Gerilim-Zaman Karakteristiği [25].	46
Şekil 5.2: Çubuk Aralığı ve Aşırı Gerilim Saptırıcı ile Trafo Koruması.	47
Şekil 5.3: Ark Boynuzu.	49
Şekil 5.4: Ark Boynuzu Etrafında Oluşan Elektrik Alan Dağılımı.	50
Şekil 5.5: Atlama Aralıklı Değişken Dirençli Parafudr Yapısı.	52
Şekil 5.6: Mektal Oksit Parafudr ve Yapısı.	54
Şekil 5.7: Metal Oksit Parafudrda Sembolik Akım- Gerilim Karakteristiği.	55
Şekil 5.8: Paratoner Entegreli yapı [29].	56
Şekil 5.9: Aktif Paratoner Tipleri [30].	57
Şekil 5.10: Dairesel Koruma Alanı [5].	58
Şekil 5.11: Paratoner ve Parafudr Entegrasyonu.	59
Şekil 5.12: Parafudr Standartları[31].	59
Şekil 5.13: Ayırıcılar [33].	60
Şekil 5.14: Nötr Korunmalı ve Korumasız Parafudr Bağlantısı [34].	62
Şekil 5.15: Parafudr Tipleri [34].	63
Şekil 5.16: Kafes Diyagramı Aracılığıyla Tek hatlı, Tek Trafolu İstasyonlarda Aşırı Gerilim.	65
Şekil 6.1: Çevre Durumu Faktörü.	70
Şekil 6.2: Türkiye Oranlı Gün Sayısı[36].	71
Şekil 6.3: Yıldırımın İsabet Ettiği Varsayılan Yapı.	72
Şekil 6.4:Yapının İşlevselliği veya Donatıları ile Alakalı Bileşenler.	73
Şekil 6.5: Zararlar Sebebiyle Oluşan Bileşenler.	73

Şekil 6.6: Yıldırım Koruma Sistemleri İçin Etkinlik Değer Seviyeleri [37].	76
Şekil 6.7: Yakalama Ucu iletkeni ve İndirme İletkeni Entegrasyonu.	77
Şekil 6.8: Zemine Entegre Kısımına Kadar Teknik Detay [5].	78
Şekil 6.9: Esnek Bağlantı ve Temel Topraklayıcının Entegrasyonu.	79
Şekil 6.10: Toprak Türüne Göre Özdirençler.	80
Şekil 6.11: Kullanılan Kroşeler.	82
Şekil 6.12: Eş Potansiyel Bara Bağlantısı.	83



KISALTMALAR

Z	:	Empedans, (Ω)
I _m	:	Darbe Akımı Pik Değeri, (kA)
T ₁	:	Cephe Süresi
T ₂	:	Yarılanma Süresi Mikrosaniye Bazında (μ s)
U _m	:	Maksimum Sistem Gerilimi
U _{dd}	:	Anma Darbe Dayanımı Gerilimi
U _a	:	Artık Gerilimi, (kV)
N _d	:	Yıllık Direkt Olarak Yapıya İsbet Eden Yıldırım sıklığı (Adet/Yıl)
Q _{darbe}	:	Darbe Yüğü, (C)
N _c	:	Yapıya Dokunan Yıldırımın Enerji Boşalmalarının Kabul Edilen Yıllık Sıklığı
V _p	:	Dayanım Katsayısı
F _i	:	Uç Bara Dayanımı
N _a	:	İnşa Alanına Direkt Olarak İsbet Eden Beklenen Yıldırım Sıklığı
h	:	Yakalama Ucunun Yerden Yüksekliği, (m)
I _n	:	Anma Boşalma Akımı
BIL	:	Temel Yıldırım Dayanım Seviyesi
N _g	:	Toprağa Geçen Yıldırım Yoğunluğu ($\frac{yıldırım}{yıl.km^2}$)
C _e	:	Çevre Faktörü
A _e	:	Yapının Eşdeğer Toplam Alan Miktarı, (m ²)

AG	:	Alçak Gerilim
YG	:	Yüksek Gerilim
OG	:	Orta Gerilim
U_i	:	İşletme Gerilimi
SiC	:	Silisyum Karbür
MnO_2	:	Mangan Oksit
MOV	:	Metal Oksit Varistör
YKS	:	Yıldırımdan Korunma Sistemi
ZnO	:	Çinko Oksit
U_r	:	Parafudr Anma Gerilimi

1. GİRİŞ

Dünyadaki sanayileşme ve hızlı nüfus artışı sonucunda enerji arz ve talep dengesini de etkilemiştir. Öte yandan enerjiye olan talebin artması, enerji kaynağının sınırlı olması ve üretilen elektriğin büyük bir kısmının depolanamaması, elektriğin mevcut ihtiyacı karşılayacak miktarda ve çok daha yüksek verimle üretilip kullanıcıya ulaştırılmasını son zamanlarda zorunlu hale getirmiştir.

Güç sistemleri, esas olarak akım ve gerilimlerin kararlı değerlerindeki ani değişikliklerden kaynaklanan çeşitli geçici olaylara maruz kalır. Bu geçici olaylar sıralayacak olursak yıldırım çarpması, ani gelişen sistem arızaları, bakım veya arıza onarım için devrenin değiştirilmesi veya normal çalışmanın bir sonucu neden olabilir. Güç sistemlerinde geçici artışlara neden olan bu olaylar sistemin hem içinden hem de dışından gelebilir.

Elektrik sistemlerinde saha olayları, topraklama ve faz kısa devreleri, rezonans olayları sırasında ortaya çıkan gerilimlere iç aşırı gerilimler, atmosferik deşarjlar veya elektrik alan hat yükleri sonucu ortaya çıkan gerilimlere ise dış gerilimler adı verilmektedir. Bu geçici gerilimler, en gelişmiş sistem gerilimlerinden konut gerilimlerine kadar, kullanılan tüm güç sistemlerinde sorunlara neden olmaktadır. Geçici aşırı gerilimler, esas olarak elektrik sistemi izolasyon koordinasyonunu sağlamak ve optimum sistem tasarımını desteklemek için çok kapsamlı değerlendirilmek zorunluluğunu doğurmuştur.

Bu tezde elektrik sistemlerinde mevcut olan geçici aşırı gerilimler nedenlerine göre sınıflandırılarak teorik ve ampirik ifadeler yer verilmiştir. Bu ifadeler göre hatlarda indüklenen gerilimlerin genliğini ve frekansını belirlemek mümkündür. Ayrıca son bölümde bu gerilimlerin değerlendirilmesine olanak sağlayan mevcut analitik yöntemler özetlenmektedir.

1.1 İÇ VE DIŞ AŞIRI GERİLİMLER

Yüksek gerilim olarak da bilinen aşırı gerilimler, atmosferik elektrik boşalması olarak tanımlanan yıldırım çarpması yoluyla her türlü elektrik sistemini etkileyebilir. Yıldırım aşırı gerilimi diğer adıyla literatürde flaş olarak tanımlanır. Öte yandan devre elemanlarının bağlanması veya ayrılması, arızaların başlaması veya kesilmesi nedeniyle sistemde

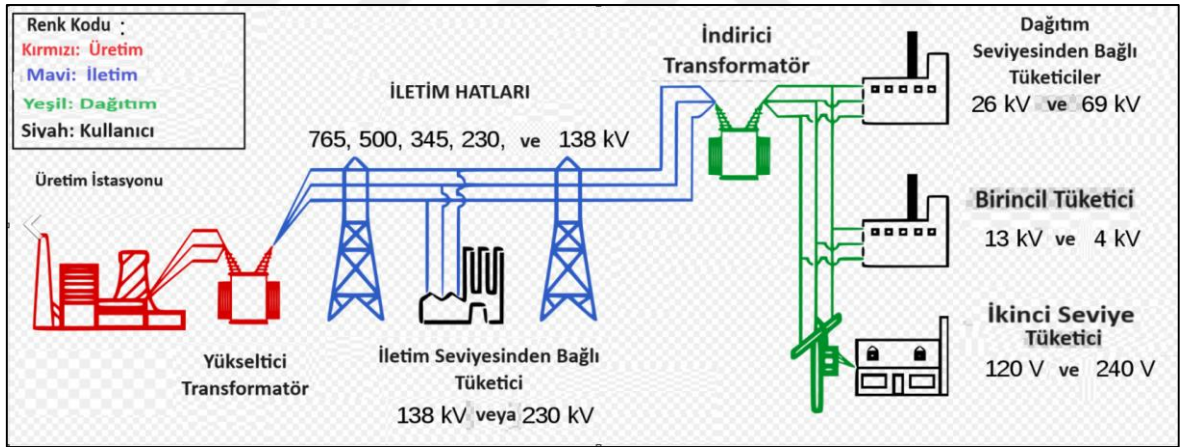
istenmeyen durumlar meydana gelebilmekte ve sistemde istenmeyen sonuçlar meydana getirebilmektedir.

Bahsedilen aşırı ikinci tip, güç veya harmonik frekansına sahiplerse ve sürekli veya zayıf sönümlü iseler "geçici aşırı gerilimler" olarak veya çok sönümlü ve kısa süreliyse "anahtarlamalı aşırı gerilimler" olarak sınıflandırılır.

Standartları düzenleyen IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) normlarına göre güç mühendisliği topluluğu ve endüstriyel uygulama topluluğunun belirlediği, aşağıda yer almakta olan gerilim kategorileri vardır;

- 34.5kV ve altı endüstriyel dağıtım;
- 34.5 kV tan, 38 kV'a kadar şalt sahası
- 115 kV ve üstü iletim

Son sınıf genellikle üç sınıfa ayrılır:



Şekil 1.1: Dağıtım Sistemi [1].

- 115 kV'tan 230 kV'a kadar yüksek gerilim (HV)
- 345 kV'tan 765 kV'a kadar çok yüksek gerilim (EHV)
- 1000 kV ve üstü aşırı yüksek gerilim (UHV)

Şeklinde iletim ve dağıtım sistemleri uluslararası normları belirleyen kuruluş olan Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) tarafından kategorilendirilmiştir [2].

Ortak kökenleri nedeniyle, geçici aşırı gerilimler ve anahtarlama dalgalanmaları birlikte meydana gelir ve bunların birleşik etkisi, yalıtım tasarımıyla ilgilidir.

Yıldırım ve anahtarlama dalgalanmalarının çakışma olasılığı ise küçüktür ve ihmal edilebilir [3].

İkinci tip, güç veya harmonik frekansına sahiplerse ve sürekli veya zayıf sönümlü iseler "geçici aşırı gerilimler" olarak veya çok sönümlü ve kısa süreliyse "anahtarlama aşırı gerilimler" olarak sınıflandırılır.

Ortak kökenleri nedeniyle, geçici aşırı gerilimler ve anahtarlama dalgalanmaları birlikte meydana gelir ve bunların birleşik etkisi, yalıtım tasarımıyla ilgilidir.

Yıldırım ve anahtarlama dalgalanmalarının çakışma olasılığı ise küçüktür ve ihmal edilebilir [3].

Yıldırım darbeleri ve bu darbelerdeki inişli çıkışlı dalgalanmalar hat tasarımının etkisinden bağımsız olarak süregelir. Diğer taraftan anahtarlama dalgalanmalarının büyüklükleri, çalışma gerilimleri büyük ölçüde doğru orantılı olarak değişir.

Sonuç olarak, gerilimin 300 kV'a kadar ulaştığı noktalar için yıldırım darbe gerilimine ilave olarak anahtarlama darbe gerilimi de tasarım parametresi olarak kullanılmaktadır.

Literatürde aşırı yüksek gerilim aralığında yani 765 kV'a kadar, hem yıldırım hem de anahtarlama aşırı gerilimleri dikkate alınmalıdır.

Şu anda incelenmekte olan 'ultra yüksek gerilimler' için anahtarlama aşırı gerilimleri tek kriter olmasa da ana kriter olacaktır; özellikle izolatör kirliliği önemli bir tasarım faktörü olmaya devam edecektir. Dış yalıtımın ve hava boşluklarının anahtarlama darbe gücü, yaklaşık 1 MV'den itibaren artık doğrudan orantılı olarak artmaz [3].

2. BÖLÜM

2.1 YILDIRIM AŞIRI GERİLİMLERİ

Yıldırımlar fırtınalar sırasında, hava akımlarının etkileşimi sonucu bulutun üst kısmındaki buz kristallerinin ve alt kısmındaki yağmurun etkileşimi ile ayrılır. Bu olay bu konuda birçok teoriyi barındırır. Bu konu için önemli ve gözlemlenebilir olan olay ise büyük bulut kütlelerinin çoğunluğunun negatif yüklü olması ve bu büyük kümenin tepe noktasında pozitif yüklerin birikmiş olmasıdır. Söz konusu pozitif birim yerden genellikle 9 ile 12 km arasında bir uzaklıkta yer alır. Negatif yüklerin olduğu kısmın merkezleri yerden 500 ila 10 000 m yükseklikte olabilir, bulut tabanı 150 m kadar alçağa ulaşabilir. Fırtına bulutlarının potansiyelinin en az 100 milyon volt olduğu tahmin ediliyor [4].

Yıldırım oluşturan bulutların genellikle elektrik yükleri bağlamında kutuplaşmış olduğu tabanda, izleyici olarak bilinen zayıf ışık tayfında bir elektrik boşalımı gerçekleşir. Bahsi geçen ve tanımı yapılan doğa olayı zeminin altında bir yol izleyerek bu şekilde metrelerce derine kadar hareket eder. Söz konusu bu olayda meydana gelen tahmini yıldırımlar genel olarak literatürde metrede 400 kV/m gerilim değerleri ile 500 kV/m mertebelerine ulaşacak seviyelerde ilerler. Yıldırımın oluşacağı bulut tabanına en yakın noktalar olarak görülen ağaçlar, bacalar, paratonerler vb çevresel yapı ve faktörler hava, kutuplaşma eşiğine ulaştığı noktada 30 kV/m gerilim mertebeleri sonucu akımlar oluşur. Dolayısıyla yer kabuğu ile hava muhalefeti sonucundaki fırtına kaynaklı bulut arasında iyonlaşmadan dolayı hava tüneli oluşturarak muazzam elektriksel bir bağlantıya neden olur. Sonuç olarak söz konusu bu akış sonucu oluşan doğa olayı, toprak ile hava sınırlı bölge arasındaki elektriksel yük boşalmasıdır.

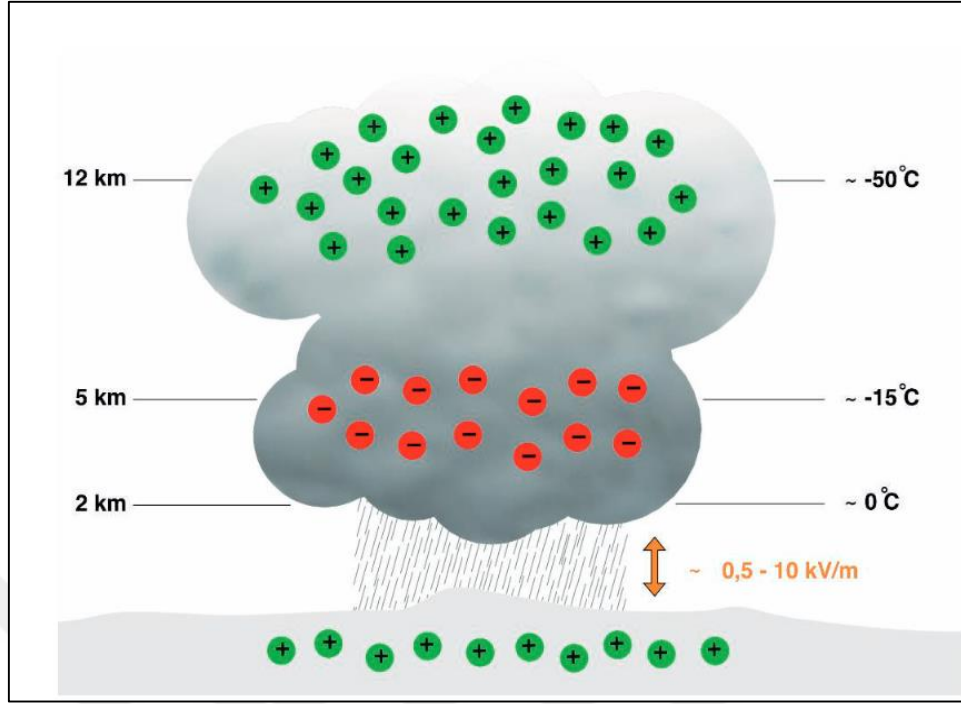
$$e_i = -E \frac{c_2}{c_1 + c_2} = \frac{q}{c} \quad (2.1)$$

E: Hattı takip eden en yüksek gerilim;

C1: Hat ve bulut arasındaki kapasite;

C: Birim uzunluk başına düşen kapasite;

C2: Zemin ve hat arası kapasite;



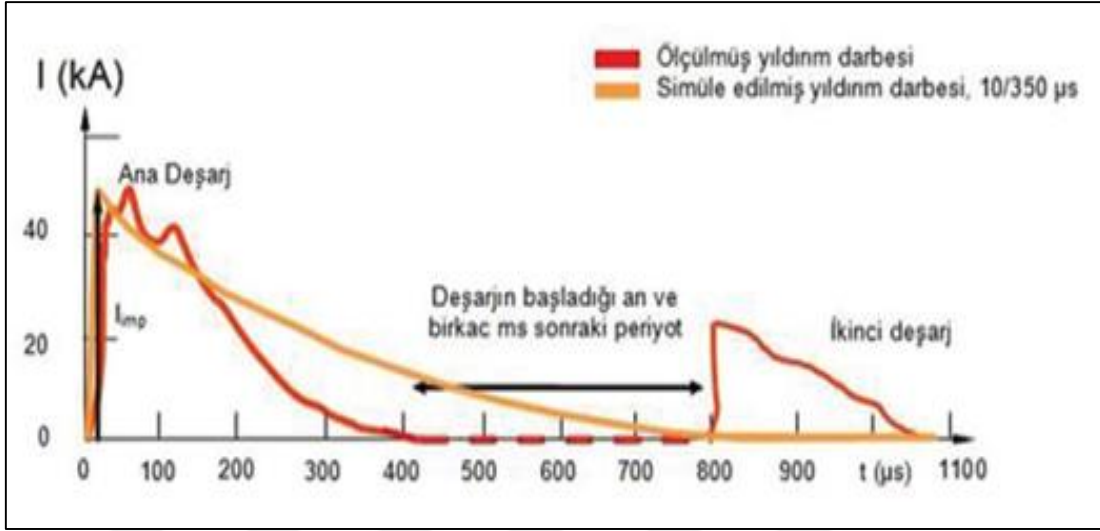
Şekil 2.1: Yıldırımın Bulutta Oluşumu [5].

Yıldırımlar yeryüzüne ulaşan şekliyle genellikle tek bir ışık tayfı olarak görünür. Nadir de olsa dalgalı formlarının da olduğu durumlar mevcuttur. Örneğin özel lensli kameralarla çekilen fotoğraflar, yıldırım darbelerinin çoğunun ardından, 0,5 ms ile 500 ms'lik aralıklarla ilk boşalmanın oluşturduğu yol boyunca ilerleyen tekrarlanan vuruşların geldiğini ortaya koymaktadır [3].

2.1.1 Yıldırım Sonucu Oluşan Yürüyen Dalgalar

Bir havai hat civarında toprağa gelen yıldırım darbesi hat iletkenleri üzerinde gerilimler indüklenir. 11 kV'luk sistemde bir yılda meydana gelen yüzlerce çeşit arızanın sebebi, Golde'nin hattaki yüzey yükleri (bound charge) hakkındaki teorisi ile açıklanmıştır. Hâlbuki arıza istatistikleri, yıldırımdan dolayı oluşan arızaların etkileri için yılda 10.000 adet arızanın gerçekçi bir rakam olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra direkt yıldırım darbeleriyle meydana gelen aşırı gerilimler ise yıldırım darbesinin doğrudan hava hattı veya topraklanmış tesis bölümleri üzerine düşmesi doğrudan etki olarak tanımlanır. Yürüyen dalgalar yıldırım, aşırı gerilimleri, yeraltı kabloları, yüksek gerilim hava hatları, trafolar gibi unsurlar ve alçak

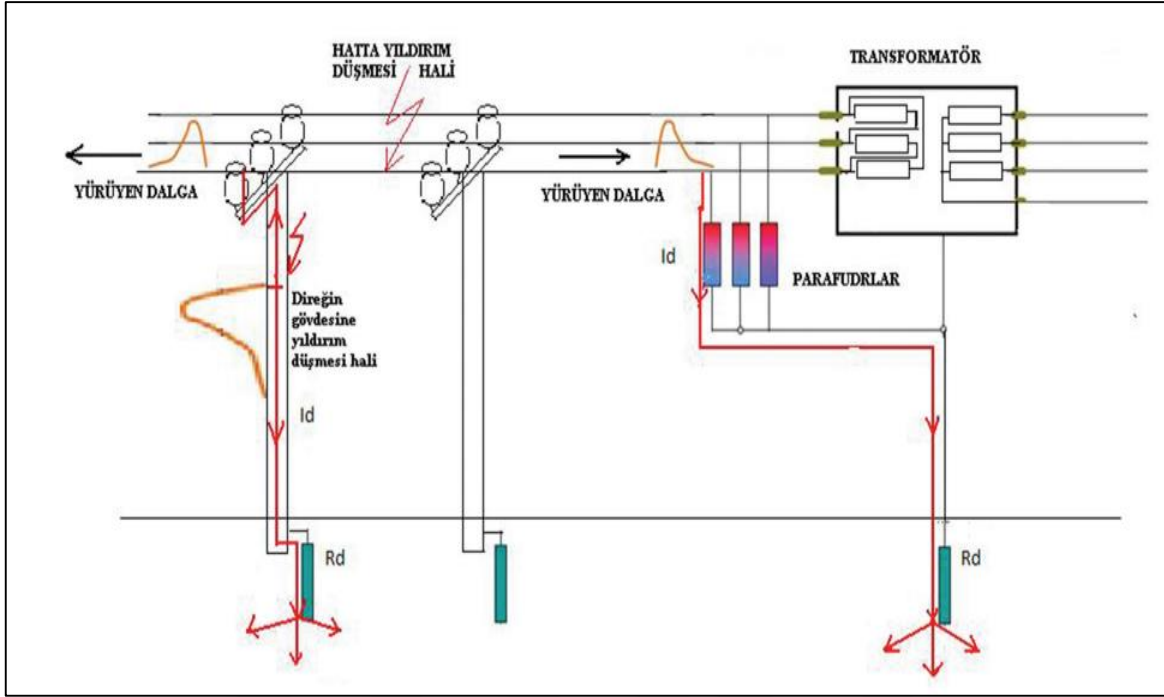
gerilimin kullanıcıları olan son kullanıcıların evlerindeki cihazlarına kadar zarar verebildiği görülmektedir [4].



Şekil 2.2: Yıldırım Darbesi [4].

Şekil 2.2' deki grafikte görüleceği üzere ölçülen yıldırım darbesi hemen hemen 1000 ile 1100 μ s(mikro saniye) arasında sürmektedir. Öte yandan gösterimi yapılan ve grafikte yer alan turuncu renk ile temsil edilmiş eğride yer alan yıldırım boşalması sırasında, 50 kA numerik değere sahip yıldırım darbesi zamansal olarak başlangıçta 0 mikro saniye (μ s) ile 10 μ s süren zaman aralığında en yüksek değere ulaşır ve 10-350 μ s 'lik zaman aralığında ise yarılanma değerine ulaşan süreci temsil etmektedir. Söz konusu bu yıldırım akımına dayanım özellikleri ise 10-350 μ s karakteristiğindeki boşalma akımı kapasitesi ile belirlenir. Öte yandan yıldırımın hat iletkenlerine temas etmesi durumunda ise yıldırım darbe akımı ikiye bölünür. İkiye bölünen yıldırım darbesi düşmüş olduğu noktanın sağına ve soluna olmak üzere hattın iki yönüne doğru yürüyen dalgalar biçiminde ve ışık hızında hareket ederek ilerler. Söz konusu bu yürüyen dalgalar, şebekenin yapısal özelliklerine göre işletme gerilimini çok fazla aşan hatta katlayabilecek yüksek düzeylere ulaşarak aşırı gerilimlerin oluşmasına yol açarlar. Yüksek gerilimden alçak gerilime dönüştürücü transformatörlere ulaşan yıldırım darbe akımı, buradaki parafudrlar vasıtasıyla toprağa akar. Yıldırım darbe akımı parafudrun taşıyabileceği akım değerinden büyük olduğunda parafudrun zarar görmesine neden olur. Parafudrun bulunmaması, transformatörün YG sargılarında dinamik ve elektriksel strese neden olarak transformatörlerin hasar görmesine ve kapanmasına neden

olur. YG sargılarında oluşan aşırı gerilim de AG tarafına geçer ve oradan AG şebekesine yayılır.



Şekil 2.3: Yıldırımın Hatta ve Direğe Düşmesi [6].

Buradaki önemli konulardan bir diğeri ise ise ark boynuzlarının gecikmeli çalışmasıdır. Yürüyen dalgaların yayılma hızı (havai hatlarda ışık hızında) ve özellikle yıldırım darbe gerilimlerinin ön dikliği dikkate alındığında, dağıtım transformatörleri gibi cihazların güvenli bir şekilde korunması için sadece ark boynuzlarının yeterli olmayacaktır.

Ark boynuzları özellikle iletim sistemi izolatörlerinde aşırı gerilimin atlaması sonucu oluşabilecek arkın yüzeyden uzaklaştırılarak izolatörlerin zarara uğramasını engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Aşırı gerilim etkisi nötralize olduktan sonra meydana gelen arkın söndürülmesi, sistemsel bakımın ve dolayısıyla planlı kesintiye gerektirir.

2.1.2 Yıldırımın Faz Hattına Düşmesi

Yıldırımın faz iletkenlerine düşmesi genel olarak sık karşılaşılmayan bir konudur. Yıldırımlar çoğunlukla elektrik direklerine, paratonerlere ve toprak iletkenlerine düşerler. Araştırmalarda bir yıldırım dalgası incelenirken elektrik direkleri için çeşitli modeller kullanılabildiği görülmektedir. Bazı uygulamalarda basit hat modelleri kullanılırken,

bazılarında ise daha doğru sonuçlar elde edebilmek için elektrik direğinin parametrelerinin yüksekliğe göre değiştirilmesi ve uniform olmayan hatlar ile modellenmesi gereklidir. Dikkate alınması gereken diğer bir husus ise hatlar arasında bulunan ortak endüktansın meydana getirdiği etkidir. İlk kez elektrik direklerinin yıldırım analizi matematiksel modellere dayandırılmış ve elektromanyetik alan teorisi kullanılmıştır. Böylelikle kullanılan matematiksel model direğin konik ve silindirik bir şekil temelinde yapılan hesaplamalara dayandırılmış ve modelleme elde edilmiştir. Bu sayede hesaplamalarda kolaylıklar sağlanmış olup doğru sonuçlar elde edilmesi hususunda önemli bir yol kat edilmiştir [7].

İki bulut arasında meydana gelen elektrikleşmenin boşaltılması (yıldırım) bir faz hattına düşmesi durumunda, düştüğü noktadan her iki yöne doğru ilerleyen (yürüyen) dalgalar ortaya çıkar.

$$I(t) = I_0(e^{-at} - e^{-\beta t}) \quad (2.2)$$

2.2'deki gibi ifade edilen yıldırım akımı dolayısıyla, yürüyen gerilim dalgası;

$$U(t) = \frac{1}{2}Zi(t) = \frac{1}{2}Zi_0(e^{-at} - e^{-\beta t}) = U_0(e^{-at} - e^{-\beta t}) \quad (2.3)$$

Şeklinde cebirsel olarak ifade edilir. Z faz hattının karakteristik empedansıdır ve $U_0 = \frac{1}{2}Zi_0$ değerine tekabül eder.

Örneğin: $Z = 250\Omega$ ve $I_m = 30 \text{ kA}$ olan hatta düşen yıldırımın maksimum değeri;

$$U_{max} = \frac{1}{2}ZI_m \text{ ise; } U_{max} = \frac{1}{2} \cdot 250 \cdot 30 = 3750 \text{ kV};$$

olarak hesaplanır. Bu çapta yüksek bir mertebedeki ilerleyen dalga ilk noktada yani ilk izolatörde atlama olayını gerçekleştirir. Bu durum Şekil 2-3'te şematize edilmiştir.

Topraklayıcıdan belirli ölçüde uzakta yer alan ve topraklayıcının tesirinin etki alanının dışında yer alan çevre bölümüne; literatürde referans toprağı denilmektedir. Sonuç olarak elektrik direğinde meydana gelen gerilim;

$$U_d \cong R_d \cdot i_d = Z \cdot i_L \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{2}i = i_d + i_L \quad (2.5)$$

2.4 ve 2.5 denklemleri yardımıyla;

$$U_d \cong \frac{1}{2} i \frac{R_d Z}{R_d + Z} \quad (2.6)$$

2.6 'daki gibi yaklaşık olarak hesaplanabilir. Burada R_d değişkeni ise yıldırımın isabet ettiği direğin topraklama direncini göstermektedir.

U_d ifadesi için ise;

$$U_d = R_d \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - U_k - M \frac{di_L}{dt} \pm U_s \quad (2.7)$$

ifadesi yazılabilir.

- a. $R_d \cdot i_d$, ifadesi ise topraklama direncinde oluşan gerilimi temsil etmektedir.
- b. $L_d \frac{di_d}{dt}$, Söz konusu yıldırıma maruz kalan direğin endüktansında oluşan endüktif gerilim düşümüdür.
- c. $M \frac{di_L}{dt}$, yıldırımdan dolayı elektrik direğinin faz hattında meydana gelen endüklenen gerilimdir.
- d. U_k , elektrik hattının faz kısmı ile koruma hattı arasında yer alan kapasitif kuplaj nedeniyle, koruma hattının faz hattında oluşturduğu gerilimdir.
- e. U_s – Şebekede meydana gelen ani gerilim büyüklüğüdür.

Söz konusu direğin darbeye maruz kalan topraklama direncindeki gerilim düşümü $R_d \cdot i_d$ olarak tanımlandığında, diğer terimler değerlerinin hesaba etki etmeyecek kadar küçük olduğundan dolayı ihmal edilebilirler. Bu yüzden direkte oluşan gerilim

$$U_d = R_d \cdot i_d \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir [8].

2.1.2.1 Örnek elektrik direği modellenmesi ve oluşan aşırı gerilimler

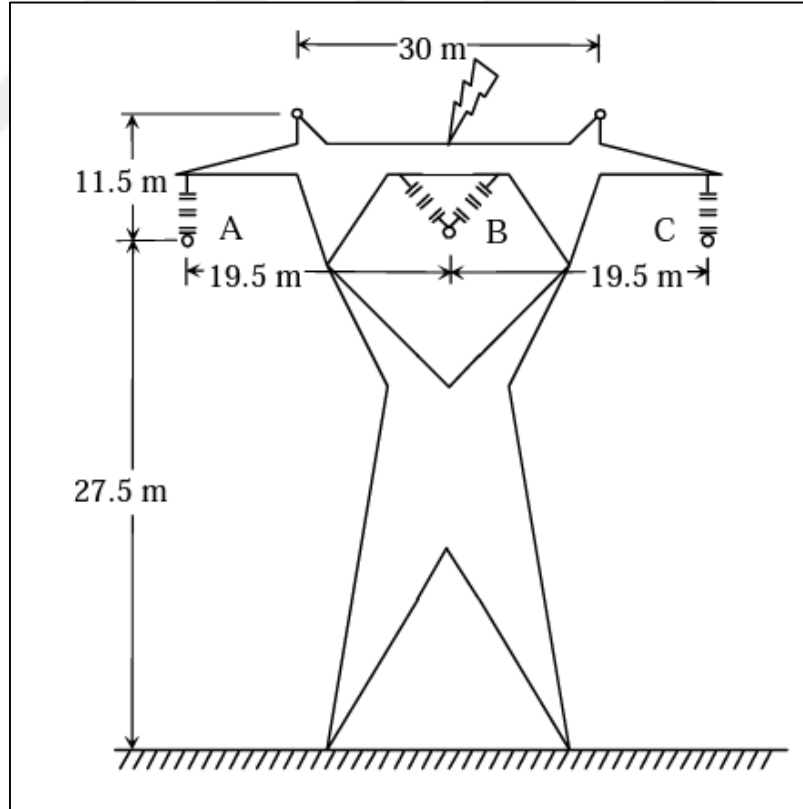
Burada ele alınan direk modeli düzgün yayılı olan (uniform) iletim hattı modellenmesi esasını baz almaktadır. Söz konusu bu modelde elektrik direği eşit uzunluktaki parçalara bölünerek, her bir eşit parçanın, her bir bölümü için birbirinden farklı karakteristik empedanslar tanımlanmıştır. Değişkenlik gösteren elektrik direğinin karakteristik empedansları; direğin, üst kısımlarında 220Ω direnç ve direğin ampertmanında ise direnç 150Ω olarak hesaba katılmıştır. Burada ortaya çıkan fark, üstel fonksiyon olarak ifade edilmiştir. Söz konusu bu fonksiyon;

$$Z_0(x) = 150e^{qx} \quad (2.9)$$

q: Direğin yüksekliği,

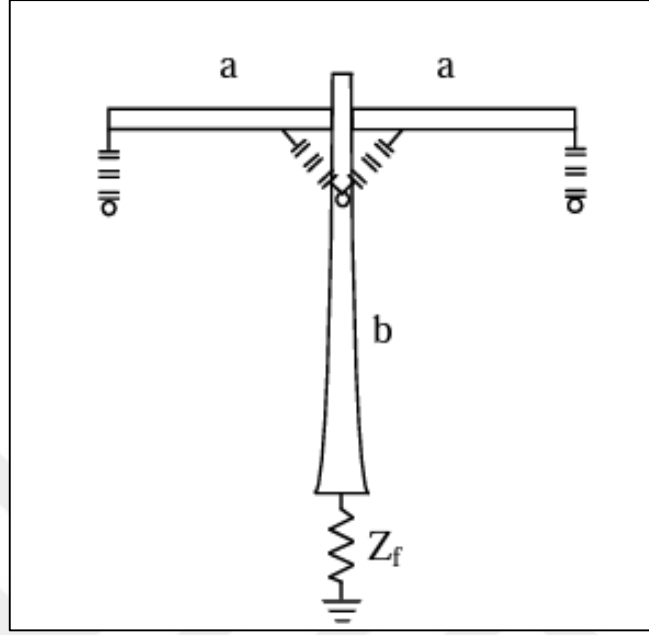
x: Direğin yerden yüksekliği,

Direğin topraklama direnci: 17Ω ,



Şekil 2.4: Örnek Elektrik Direği.

Şeklinde tanımlanmıştır ve direk Şekil 2.4'te matematiksel değerleri ile şematize edilmiştir. Ayrıca bu tür direkler Türkiye'de sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.5: Basitleştirilmiş Model.

Kaynak: a:19.5 m düzgün yayılı hat; b:39 m düzgün yayılı olmayan hat;

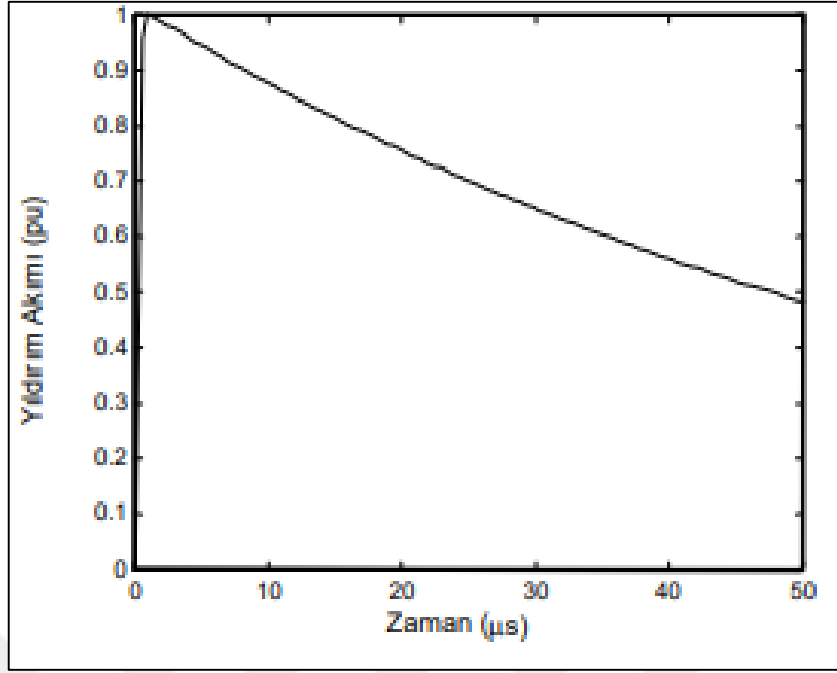
Örnek uygulamada direğin yüksekliği 39 metre ve L direğin yüksekliğini temsil ediyorken;

$$q = \frac{1}{L} \ln \frac{Z_{üst}}{Z_{alt}} \quad (2.10)$$

2.10 denklemi yardımıyla yapılan hesaplama sonucunda q değeri 0.0098 olarak elde edilir. Direğin düzgün yayılı olmayan yapısını gösterebilmek için 15 eşit parçaya bölünmüştür. Söz konusu düzgün yayılı olmayan direğe uygulanan yıldırım akımı bir çift üstel fonksiyon olup söz konusu bu çift üstel fonksiyon matematiksel olarak aşağıda gösterildiği gibi;

$$\dot{i}(t) = 1,0177 (e^{-1.5 \times 10^4 t} - e^{-6 \times 10^6 t}) \quad (2.11)$$

ifade edilmiştir.



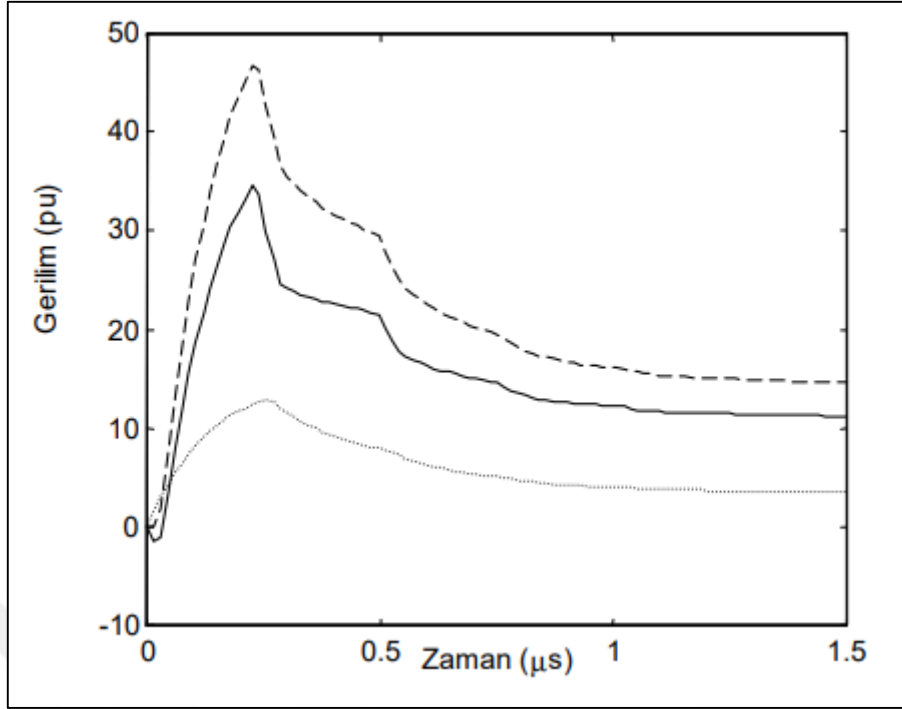
Şekil 2.6: Yıldırım Akımı Değeri (1/50 µs).

Kaynak empedansı Z , 400Ω olup düzgün yayılı olmayan direktteki dalga yayılım hızı ışık hızına eş değerde olup mikro saniyede 300 metredir ($300 m/\mu s$). Söz konusu direkte topraklama iletkeninin yarıçapı Φ ise 0.88 cm 'dir. Elektrik direğinin faz iletkenlerinin eşdeğer yarıçapları ise 24.14 cm 'dir. Söz konusu çalışma için yapılacak analizin kolaylığının sağlanması amacıyla iletim hattı direğe göre simetrik olduğu için, direğin sadece yarısı alınmıştır.

Bu işlem sırasında iletim hattındaki iletkenlerin karakteristik empedansının yarısı alınarak

Z_0 empedansının yarısı alınarak nümerik hesaplamalar yapılır.

EMTP bilgisayar programı destekli analiz sonucunda sırasıyla A, B ve C fazlarında meydana gelen gerilimlerin pik(tepe) değerleri verilmiş ve sonuç bağlamında A ve C fazları birbirlerinin simetrisi olduğundan dolayı bu üç fazın izolatörleri üzerinde oluşan gerilim değeri 34.5 p.u. olarak üçünde de eşit olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.7: A fazında Oluşan Gerilimler.

B fazının izolatörünün üzerinde ise 40.2 p.u.(per unit) olarak A ve C fazından daha yüksek bulunmuştur.

Tablo 2.1:Yıldırım Sebebiyle İzolatörlerdeki Gerilimler.

	Maksim,um gerilim değeri(p.u),
Faz: A	34.5
Faz: B	40.2
Faz: C	34.5

2.1.3 Yıldırımın Direkteki Koruma Hattına İsalet Etmesi

Yıldırım darbelerinin koruma hattına isabet etmesi sonucu ciddi bir aşırı yüksek gerilim meydana gelebilir. Bunun kök nedeni ise yüksek gerilim hattının taşıyıcı görevini yerine getiren direklerin topraklanmalarının iyi derecede sağlanmamış olması yatmaktadır. Söz konusu olayda geri atlamalar meydana gelebilir. Özellikle insan hayatının en iyi korunması,

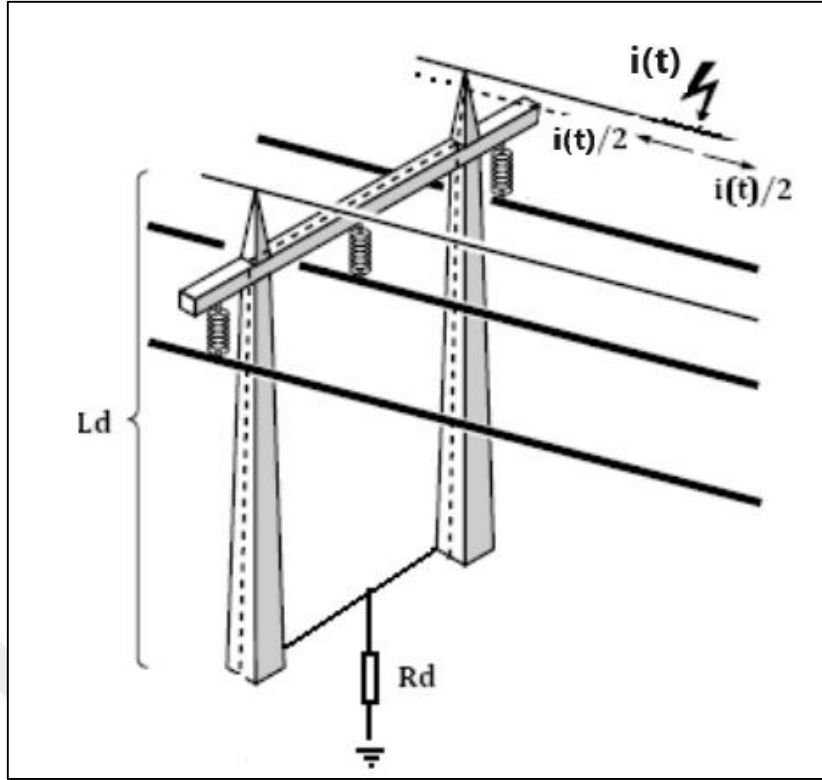
maksimum düzeyde bozulmanın, bozulmanın kaynağına mümkün olan en yakın noktada toprağa yönlendirilmesiyle sağlanır.

Bu nedenle etkili koruma mümkün olan en düşük toprak empedanslarını gerektirir. Bu, mümkün olan her yerde topraklama ağları ve topraklama elektrotları arasında ara bağlantılar oluşturularak sağlanabilir. Yüksek gerilim B sistemlerinde, trafo merkezleri için genellikle güç frekansında 1 Ω 'dan daha düşük bir toprak empedansı belirtilirken, kuleler için 10 ila 15 Ω 'luk bir empedans için çaba gösterilir [9].

Yıldırım akımlarına ve bunun sonucunda ortaya çıkan potansiyel artışlarına karşı çeşitli koruma seviyeleri vardır. Bunlar enerji seviyelerine dayalıdır.

Seviye 1 için çarpmanın büyük kısmının toprağa yönlendirilmesi ve ilk kesintiden oluşur. Bu seviye öncelikle yıldırım çarpması muhtemel nesnelere (hatlar ve trafo merkezleri) için geçerlidir.

Seviye 2 için ise artık gerilimin daha fazla kesintiyle sınırlandırılmasından oluşur. Bu seviyenin amacı, trafo merkezi ekipmanlarını ve/veya kurulumlarını iletilen aşırı gerilimlere karşı korumaktır. Kesilen enerjiyi dağıtmak için kurulum boyunca dağıtılmış çeşitli koruma cihazları gerekebilir.



Şekil 2.8: Yıldırımın Koruma Hattına Düşmesi [9].

Koruma hattına düşen gerilimin değeri şu şekilde hesaplanabilir;

Aşağıdaki denklemler yazılarak;

$$\frac{1}{2}i = i_d + i_L \quad (2.12)$$

$$U_d = R_i i_d = Z_0 i_L \quad (2.13)$$

Sonuç itibariyle direkte yıldırım düşmesi nedeniyle oluşan aşırı gerilimin değeri

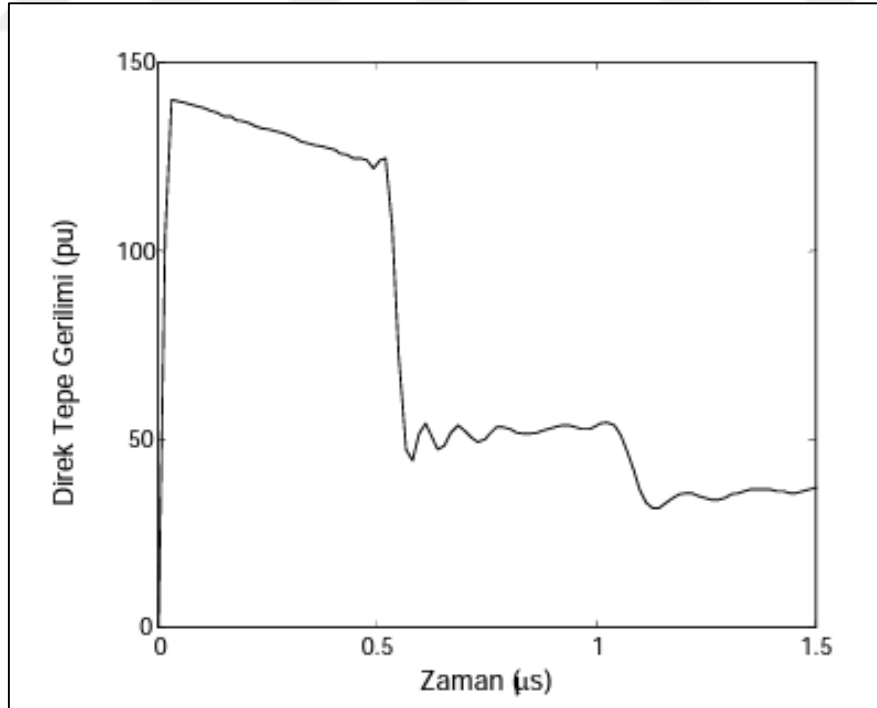
$$U_d = \frac{R_d Z_0}{2(R_d + Z_0)} i \quad (2.14)$$

Bu formülden bulunur. Oluşan aşırı gerilimin parafudr atlama geriliminden daha yüksek olduğu durumlarda söz konusu bölgede bir geri atlama olayı meydana gelir. Söz konusu geri atlamada sebebiyle şebeke arızasına neden olur.

2.1.4 Yıldırımın Direğe Düşmesi

Elektrik tesisatlarının yıldırım çarpmasından korunması ve sistem takım donanımlarının korunması enerji sürekliliği açısından önemlidir. Enerji iletim sisteminin yeterli düzeyde korunmasını sağlamak için, yıldırım, hat gerilimleri vb. gibi geçici durumlarda meydana gelen aşırı gerilimlerin bilinmesi gerekir. Bu gerilimleri hesaplamak için kullanılan sayısal teknikler iki ana gruba ayrılabilir. Birincisi zaman etki alanı ve diğeri ise frekans etki alanıdır. Doğrusal olmayan elemanların analizi zaman alanı yöntemleriyle kolaylıkla yapılabilir de, frekansa bağlı parametrelerin ifadesi frekans alanı yöntemleri kadar kolay değildir.

Bir elektrik direğine yıldırım düşmesi sonrasında faz tellerinde indüklenen gerilimler frekans aralığı kullanılarak hesaplanır. Bir elektrik direğinin karakteristik empedansı, direğin ucundan zemine kadar değişken (üniform olmayan) olarak alınır. Öncelikle koruyucu iletkenin bağlandığı direğin tepesindeki gerilimler hesaplanır ve bu gerilimden oluşan akım dalgası koruyucu iletkende bulunur. Bu akım dalgası dikkate alınarak faz tellerinin manyetik kuplajından kaynaklanan gerilim değerleri hesaplanarak numerik bir değer elde edilir [10].



Şekil 2.9: Direk Tepe Gerilimi.

EMTP bilgisayar programı (Electromagnetic Transients Program) kullanılarak direklere düşen yıldırım sonucunda parafudrun maruz kaldığı aşırı gerilimlerin hesaplamalarının yapılmasında kolaylıklar elde edilmektedir. Kullanılan elektrik direğinin uniform olmayan yapıda ele alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Söz konusu bu ve benzer çalışmalarda elde edilen sonuçların kullanılması, iletim sisteminin aşırı gerilimlerin oluşturduğu ekstrem şartlar durumunda koruma ve izolasyon seviyesinin belirlenmesi modelin güvenilirliği ve fizibilitesinin en yakın değerlerde elde edilmesi için yararlı olacaktır.



3. BÖLÜM

3.1 İÇ AŞIRI GERİLİMLER

Aşırı gerilimlerin özellikleri, sadece ortaya çıktıkları bölümlerde değil; aynı zamanda tüm sistem genelinde yürüyen dalgalar biçiminde ışık hızı düzeyinde yayılarak, sistemde bulunan tüm aygıtların izolatörlerinin zorlanmasına neden olmaktadır. Aşırı gerilimlerin genlikleri işletme gerilim genliklerinin katlayan yüksek düzeylere çıkabilir. Kimi zaman; sistemin yapısının yansıma ve kırılmalarla iki katına çıktığı durumlarda yürüyen dalga biçiminde yayılan aşırı gerilimlerin ortaya çıkardığı genlikler meydana gelir. Bu nedenle güç sistemleri, hatta aşırı yüklenmeler nedeniyle ortaya çıkan aşırı gerilimler, gerilim yükselmeleri, iç aşırı gerilimler ve dış aşırı gerilimler olarak detaylandırılır.

Elektrik güç sistemlerinde kullanılan cihazların, sistemde meydana gelebilecek tüm aşırı gerilimlere karşı dayanabilecek şekilde tasarlanması ekonomik maliyet açısından pek mümkün olamamaktadır. Aynı zamanda teknik olarak da aşırı kompleks alacağı için fizibilitesi pek de mümkün değildir. Günümüzde yüksek gerilim sistemlerinde ortaya çıkan açma-kapama aşırı gerilimlerini belirli bir düzeyde tutmak amacıyla, izolatör olarak metal-oksit parafudrların çok sık kullanıldığı görülmektedir.

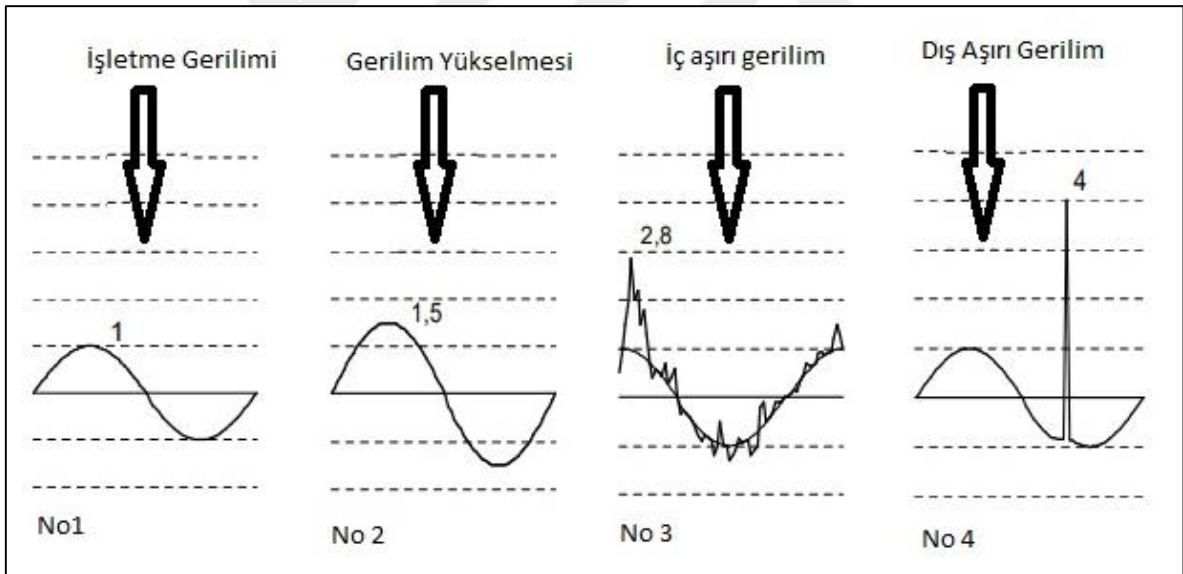
Orta düzey gerilim sistemlerinde korunma amacıyla metal-oksit parafudrlar kullanılır ve bu dışarıdan gelebilecek aşırı gerilimlere karşı koruma sağlar. Bu nedenle dağıtımda kullanılan transformatörlerin de, alçak gerilim cephesinde meydana gelebilecek aşırı gerilimlere maruz kalma durumuna önlem olarak korunması gerekliliği büyük önem arz etmekte ve bu durum göz ardı edilmemesi gerekmektedir [11].

3.2 İÇ AŞIRI GERİLİMLERİN TÜRLERİ

Literatürde iç aşırı gerilimler kapsam bağlamında devre açma-kapama (anahtarlama-switching) sırasında, meydana gelen aşırı gerilimler olarak tariflenir. Bahsedilen iç aşırı gerilimlerin genlikleri bazı kıstaslara bağlıdır. Bu ön koşullar iletim hattının uzunluğuna, istenilen işletme geriliminin seviyesi ve hat empedansına, hattın kompanzasyon seviyesine, sistemde bulunan kesicinin karakteristik özelliklerine, hattın fider tertibatlanması, kapama öncesi artık yüklerin olup olmaması durumlarına bağlıdır. Benzer biçimde yürüyen dalgalar

biçiminde yayılan iç aşırı gerilimler tüm sistemi etkisi altına alarak çoğunlukla açma kapama noktasına daha uzak istasyonlarda etkili olurlar.

İç aşırı gerilimler, ara sıra grafiksel olarak titreşimli bir değişim hareketi sergilerler. İşletme frekanslı gerilimin yaklaşık yarı periyodunda ($\sim 10ms$) sönerler. Çoğu zaman, cephe / yükselme süreleri birkaç yüz mikrosaniye (μs), sırt süreleri birkaç milisaniye (ms) uzunluğunda, periyodik olmayan değişime sahip darbe gerilimleri biçiminde tanımlanırlar. Titreşimli - sönümlü değişim gösteren bir iç aşırı gerilim darbesi, endüstriyel frekanslı gerilimin üzerine bindirilmiş biçimde, Şekil 3.1’de no.3 ile temsil edilen üçüncü görselde şematik olarak gösterilmiştir. Yüksek gerilim sistemlerinde açma-kapama aşırı gerilimlerini sınırlamak amacıyla geçmişte, kapama anında kesiciye seri direnç ekleme, faz gerilim açısını kontrol ederek (gerilim sıfırdan geçerken) kapama gibi yöntemlere başvurulurken; günümüzde bu amaca yönelik olarak metal-oksit parafudrların kullanılması tercih edilmektedir [3].



Şekil 3.1: Aşırı Gerilimlerin Zamana Bağlı Değişimi.

3.2.1 Ferrerezonans

Ferrerezonans kompleks bir elektrik olayı olarak tanımlanır. İlk olarak 1920’li yıllardan keşfedildikten sonra günümüze kadar güncelliğini koruyarak gelmiştir. Yüksek gerilimde ani gelişen akabinde yüksek dereceli harmonik distorsiyon bozulmalarına sebep olan olay

olarak nitelendirilir. Ferrerezonansın bir diğer tanımı ise ferromanyetik çekirdekli endüktans ile diğer kapasitif özelliklere haiz elemanlar arasında meydana gelen özel bir rezonans türü olarak tanımlanır. Öte yandan doğrusal sistem elemanlarında bulunan rezonans ferrerezonanstaki farklıdır. Yani doğrusal sistemlerin rezonansı, rezonansın sahip olduğu frekanstan dolayı yüksek sinüzoidal gerilim dalgası ile birlikte yüksek akımın da oluşmasına yol açmaktadır. Güç sistemlerinin harmonik hareketinin temel nedeni doğrusal sistem rezonansıdır. Benzer biçimde, ferrerezonans da yüksek gerilime ve akıma sebebiyet verir. Öte yandan oluşan dalga biçimi çoğu zaman düzenlilik göstermemektedir, karmaşıktır [12].

Ferrerezonans genellikle doğrusal rezonans tipolojisinden aşağıda maddeler halinde verilen açıklamalar yardımıyla ayırt edilebilir:

- a. Ferrerezonans ve rezonans birlikte değerlendirildiğinde ferrerezonanstaki, hattı ferrerezonans haline dönüştürecek kapasitans aralığının çok daha geniş olduğu bilinen farklılardan bir tanesidir [13].
- b. Ferrerezonans sonucu sistemin tepkisinin gerilim ve akım dalgalarının frekansları, sistemin sinüzoidal gerilim kaynağının frekansından daha değişik olabilir [13].
- c. Belirli bir devre topolojisi ve eleman değerleri için ferrerezonanstaki birden fazla kararlı çalışma durumu söz konusudur. Bunlardan biri doğrusal yaklaşımla bulunabilen beklenen normal çalışma noktasıdır; diğerleri ise genellikle tehlikeli durumları içeren, anormal derecede stabil çalışma noktalarıdır [13].

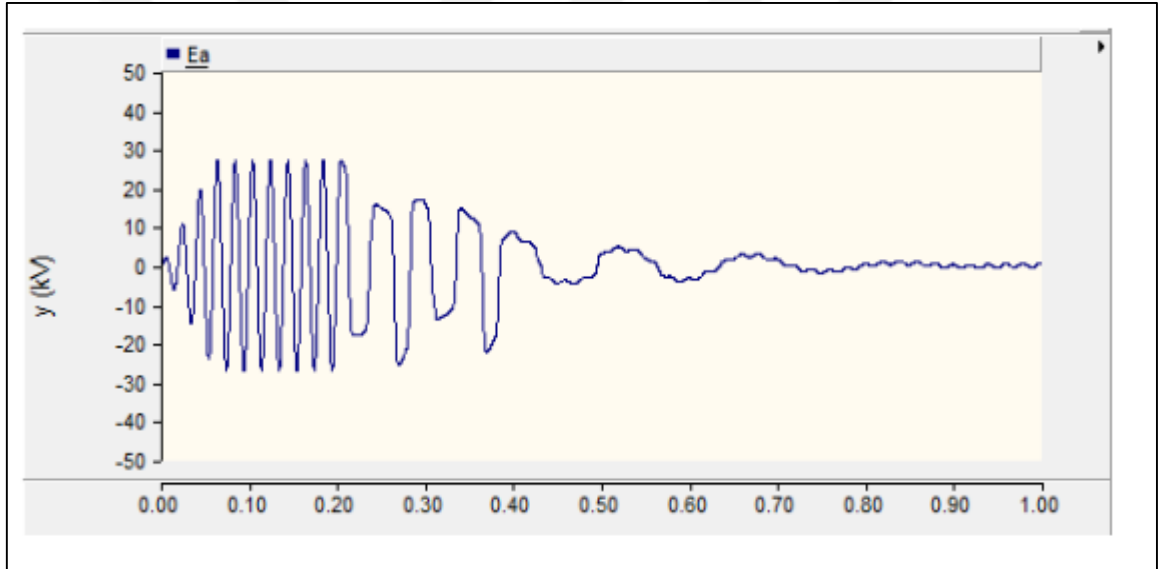
Ferrerezonans olgusunun bir sistemde meydana gelebilmesi için şu ön koşulların meydana gelebilmesi gerekir;

- a. Kapasitans kaynakları (kondansatörler) ve doğrusal olmayan endüktanslardan oluşan yapıların bir arada bulunması,
- b. Sistemde potansiyeli değişken olan en az bir noktanın bulunması (izole nötr nokta, tek fazlı sigorta çalışması, tek fazlı anahtarlama),
- c. Yüksüz yani boşta çalışan güç, gerilim ölçü transformatörü olması,

Koşullarının sağlanması ferrerezonansın gerçekleşmesinin sağlanması adına ön koşullardır [13].

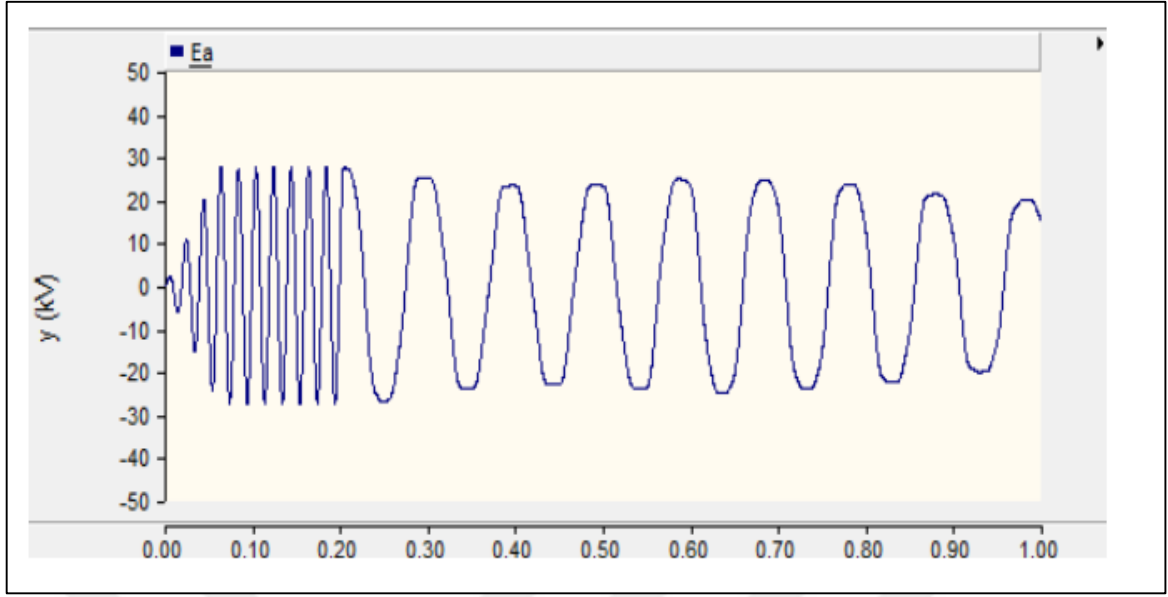
Bahsedilen ön koşullardan en az birinin veya birkaçının oluşmaması durumunda sistemde oluşmuş olan normal olmayan durumun kaynağının ferrerezonans olmadığını kolaylıkla anlayabilir, fakat bu şartların üçlü kombinasyonunun bir arada olması; bahsedilen sistemin ferrerezonansa kesin olarak girmesine neden olmaktadır.

Ferrerezonans oluşumuna bağlı en önemli özelliklerden ikisi, sistem parametrelerine ve başlangıç koşullarına gösterilen aşırı duyarlılıktır. Söz konusu bu duyarlılıklar sistemin bütüncül olarak ferrerezonansa direnç gösterebilmesine kaynaklık etmekte ve çözüm için alınabilecek tedbirlere öncülük etmekteki en önemli unsurlardandır.



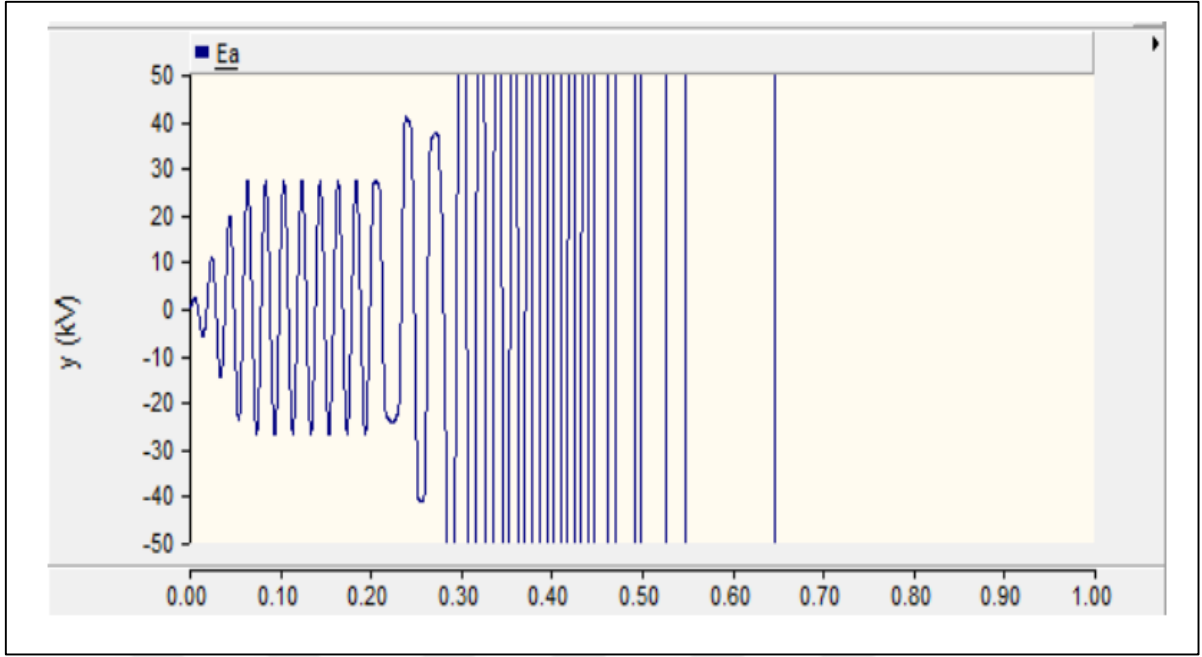
Şekil 3.2: Kondansatörsüz ve Kompanzasyonsuz Sistem.

Şekil 3.2’de kompanzasyonun olmadığı ve ferrerezonansın ortaya çıkmadığı koşullara ilişkin sonuçların yaşanmadığı olayı temsil etmektedir.



Şekil 3.3: 48 MVAr Gücünde Kompanzasyonlu Durum.

Şekil 3.3'te 48 MVAr gücünde kompanzasyonlu bir sistemdeki grafik gösterilmiştir. Üzerinde çalışılan sistemde kompanzasyonsuz senaryodaki durumda ferrorezonans yaşanmamıştır, ancak; yapılan diğer senaryoda ise yani kompanzasyonlu durumlarda her bir denemede en düşük dereceli kompanzasyonda bile en yüksek ferrorezonans yaşanmıştır. Söz konusu bu gelişmeler ışığında ferrorezonansın doğrusal olmayan özelliğini göstermektedir. Sonuçta modellenen sistem için üst sınırın aşılmasını sağlayacak ölçüde kapasitans değerlerine yaklaştıkça ferrorezonans etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.4: 0.5 MVAr Kısa Kablo Hattı.

Şekil 3.4'te 0.5 MVAr değerindeki kısa kablo hattında ise kompanzasyon değeri sabit tutulmuş ve hattın kablo boyu yarıya indirilmiştir ve sistemin yanıtının daha kötüleşmekte olduğu ve ferrezonansın özelliğinin karmaşığa yakınsadığı görülmektedir.

Ferrezonans olayı başlangıç koşullarına, sistemin haiz olduğu parametrelere karşı aşırı hassasiyete sahip olup, buna karşın yavaş ve tehlikeli istenmeyen sonuçlar barındıran bir geçici durum olarak literatürde yer almaktadır [13].

3.2.2 Anahtarlama Aşırı Gerilimleri

Anahtarlama aşırı gerilimleri yüksek gerilimli hatlarda düşük gerilim sınırlarına bağlıdır, izolasyon yalıtımının masrafları açısından artan işletme gerilimi ile bu açıklığın sayısal olarak düşürülmesi zor bir sorundur. Bu sayede anahtarlama aşırı gerilimleri parafudr tarafından kaydedilen koruma ve cihazların dayanıklılığına bağlı olup diğer bir deyişle alt izolasyon görünümüne her zaman daha yakın değerlerdedir. Havai hatta yer alan iletkenin, ayak oturtma pilonuna (elektrik nakil direği ayak oturtma alanı) iletim hattında karşı atlama gerilimi sorunu her daim güncelliğini koruyan bir tehlikedir. Atlama gerilimine karşılık gelen uygun hava aralığı, bu aralığın dayanım farklarının belirli bir miktar büyütülmesi ile ekonomik olarak yeni bir sorunu meydana getirecektir.

Öte yandan atmosferik kaynaklı olmayan sıcaklıktaki aşırı gerilimlerin kontrol hattının kullanılan tertibine göre az veya çok sınırlı olması mümkündür. Oluşan dalgaların cephe dikliği de belirli bir ölçüyü aşmamaktadır, bu değer aralığı günümüz için 1000 kV'dan başlayıp 2000 kV'ta kadar olan gerilim değer aralığında kabul edilmektedir. Aşırı gerilimlere mukavemet artışı sebebiyle hesaplamalarda, mesafe bazlı atmosfer gibi etkenler hesaplamalarda ciddi farklar oluşturmayacağı için hesaplamaya dahil edilmez. Dolayısıyla çok yüksek gerilimli yapılarda izolasyonun dayanım direncinin hesaplanması için öncelikle anahtarlama aşırı gerilimleri baz alınır. Bundan dolayı izolasyonun koordine edilmesinde en yüksek nokta baz alınacak şekilde, yapıların çatı noktasına göre yapılmaktadır.

Aşırı yüksek gerilimli şebekelerde iki kısım bulunur. Birinci kısımda havai hat izolasyonu iletkenlik askı düzenekleri ile ilgili özellikler iken ikinci kısımda bütün unsurların izolasyonunu içerir [14].

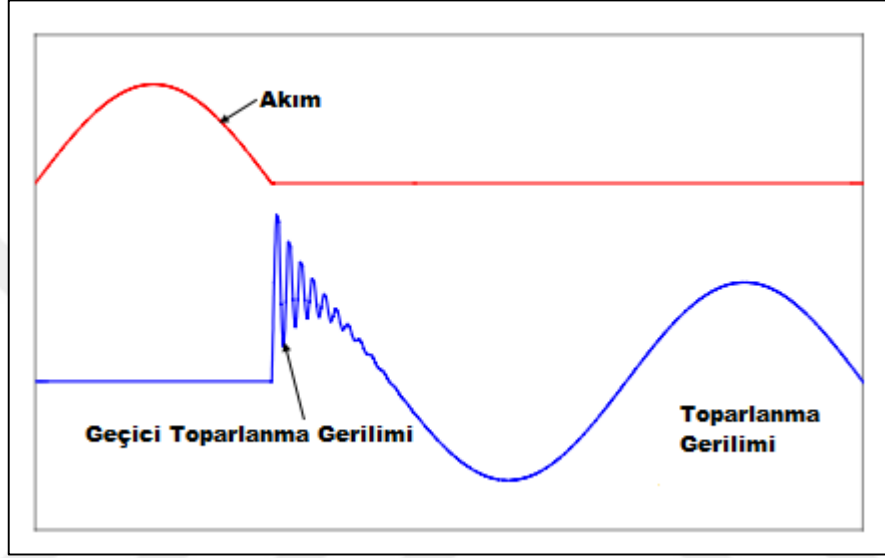
3.2.2.1 Dirençli anahtarlama

34.500 V ve üzeri yüksek gerilim sistemlerinde kapanma anahtarlama nedeniyle oluşan aşırı gerilimler, yıldırım düşmesi sonucu oluşan gerilimlerden daha yüksek olup sistemin yalıtımı buna göre hesaplanır. Bu tür sistemlerde kapatma manevraları iki adımda gerçekleştirilir. Öncelikle sisteme bir direnç üzerinden enerji verilir ve daha sonra bu direnç sistemden çıkarılarak normal besleme sağlanır. İki adımda ve direnç kullanılarak yapılan anahtarlama kapatma sırasında oluşan gerilimler, yıldırımdan kaynaklanan aşırı gerilimlerle (500 kV'a kadar olan sistemlerde) aynı şiddette azaltılır [15].

Bir nakil hattının izolasyonun dizaynı yapılırken, bu hattın aktif hale girdiğinde izolasyonu zorlayacak her türlü aşırı gerilimler dikkate alınmak zorundadır. Tek adım dirençli kapamalarda, enerji nakil hattı iki safhada enerjilendirilir. Öncelikle direncin üzerinden yapılan enerjilendirme ve belirli süre geçtikten sonra direncin kısa devre edilmesi olarak tanımlanır. Bu iki safhaya bağlı olarak da iki geçici yüksek gerilim meydana gelmektedir. Oluşan yüksek gerilimlerin genliği kullanılan direncin birer fonksiyonudur. Bundan dolayı direncin omik değeri öyle seçilmelidir ki iki safhada da meydana gelen geçici yüksek gerilimin değerleri hemen hemen eşit olsun.

3.2.2.2 Geçici toparlanma gerilimi

Geçici toparlanma gerilimi, bir devre kesicinin kutbunun terminalleri boyunca görünen gerilime denilir. Söz konusu bu gerilim birbirini takip eden iki zaman aralığında düşünülebilir. Birincisi geçici bir gerilimin mevcut olduğu süre, ikincisi ise yalnızca güç frekansı geriliminin mevcut olduğu zaman aralığı olarak tanımlanabilir. Geçici toparlanma gerilimini birkaç özelliğini sırasıyla şöyledir;



Şekil 3.5: Akım, Toparlanma ve Geçici Toparlanma Gerilimi.

Kesinti işlemi sırasında anlık akım sıfıra yaklaştıkça ark iletkenliğini hızla kaybeder.

Akım sıfırlandıktan birkaç mikrosaniye sonra devrede akım durur.

Geçici toparlanma gerilimini meydana getiren olgu, güç sisteminin mevcut kesintilere verdiği tepkiden ibarettir. Dolayısıyla geçici toparlanma gerilimi kısaca; devre kesicinin, kaynak tarafından yük tarafına kadar olan aradaki gerilim farkıdır. Açma kapama işlemi sırasında eğer devre kesici geçici toparlanma gerilimine ve güç frekansının geri kazanım gerilimine dayanabiliyorsa kesme işlemi başarılı olur.

Geçici toparlanma geriliminin genel özelliği, öncelikle dirençli, kapasitif veya endüktif (veya bazı kombinasyonlar) olsun, kesilen devreye bağlıdır. Bunun yanı sıra, dağıtılmış ve toplu devre elemanları farklı geçici toparlanma gerilimi, dalga şekilleri üretecektir [16].

3.2.2.3 Kısa devrenin kaldırılması

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımını bütünsel olarak tamamen simetrik bir yapı içerisinde. Diğer bir ifade ile her bir faz iletkeninden geçen akım ile iletkenler arasındaki gerilim mutlak değer birbirinin aynısıdır. Tek fazlı yüklerin, fazlara eşit bir biçimde dağıtılmasıyla iletkenlerde denge sağlanmaya gayret edilir. Fakat üç fazlı simetrik kısa devre dışında, ya dengesiz yükler ya da iletken kontağı, iletkenler ve toprak gibi arızalar ya da iletkenlerin kendi aralarındaki kısa devre olayları nedeniyle elektrik sistemindeki faz iletkenlerinde simetrik olmayan akımlar akar. Farklı büyüklükte gerilimler oluşur. Elektrik sistemindeki aksaklıkların büyük bir bölümü kısa devre olaylarıdır. Kısa devrelerin farklı nedenleri vardır.

- Kaynağı tamamen elektrik olanlar. Bu durum iletkenlerin izolasyonunun çalışma gerilimine karşı direncini kaybetmesi durumunda ortaya çıkar [17].
- Kaynağı mekanik olanlar. Ağaçların havai hat iletkenlerine düşmesi, herhangi bir cisme çarpması, yer altı kablolarına kazma ile çarpması, heyelan, heyelan vb. sebeplerden dolayı kısa devre meydana gelir.



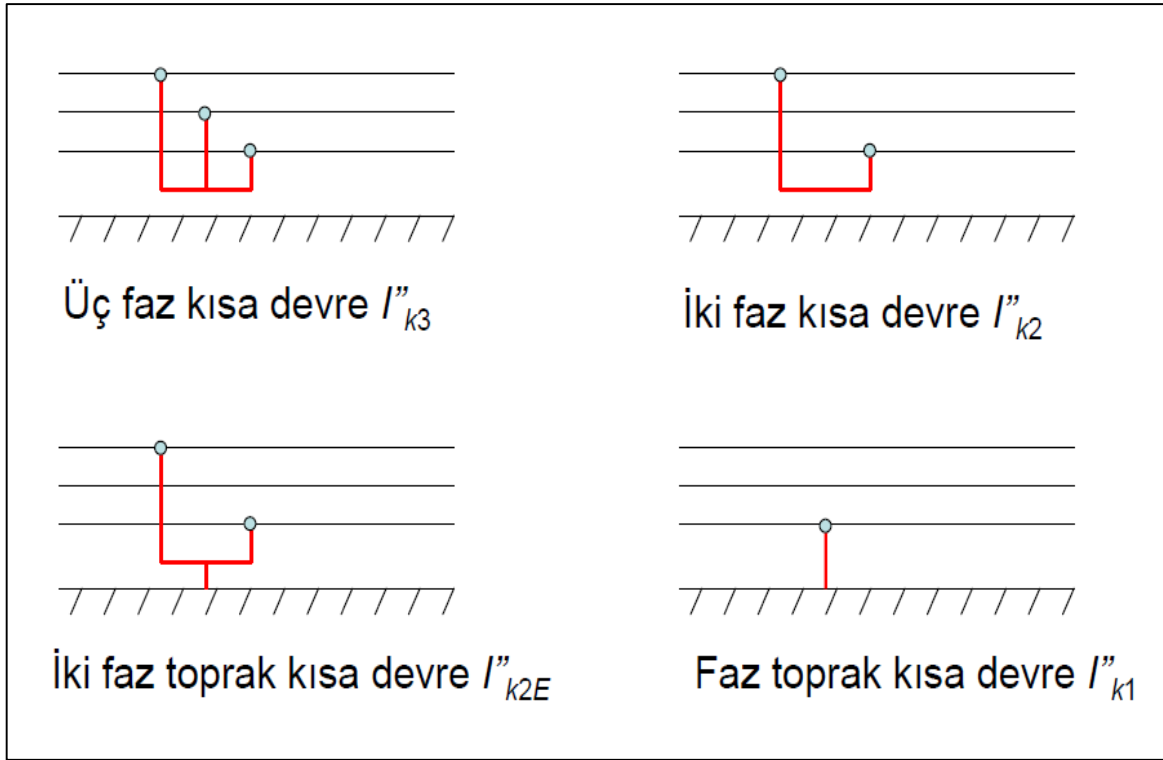
Şekil 3.6: YG Hattına Etki Eden Dış Faktörler[18].

- Kaynağı atmosferik olanlar. Bu durum havai hat iletkenlerine veya çevresine yıldırım düşmesi veya hattın üzerinden statik yüklü bir bulut geçmesi durumunda meydana gelebileceği gibi yalıtkanların kirlenmesi, iletkenlerin buzlanması veya yağmur nedeniyle güvenli mesafenin kaybolması durumunda da meydana gelebilir.

- d. Şebekede meydana gelen geçici olaylar sonucu oluşan aşırı gerilimler, tesisat elemanlarının yalıtkanlarının bozulmasına, dolayısıyla kısa devre arızalarına neden olur.
- e. İnsan hatasından dolayı tesisatta yapılan yanlış anahtarlamalar sonucu oluşan kısa devre arızaları.

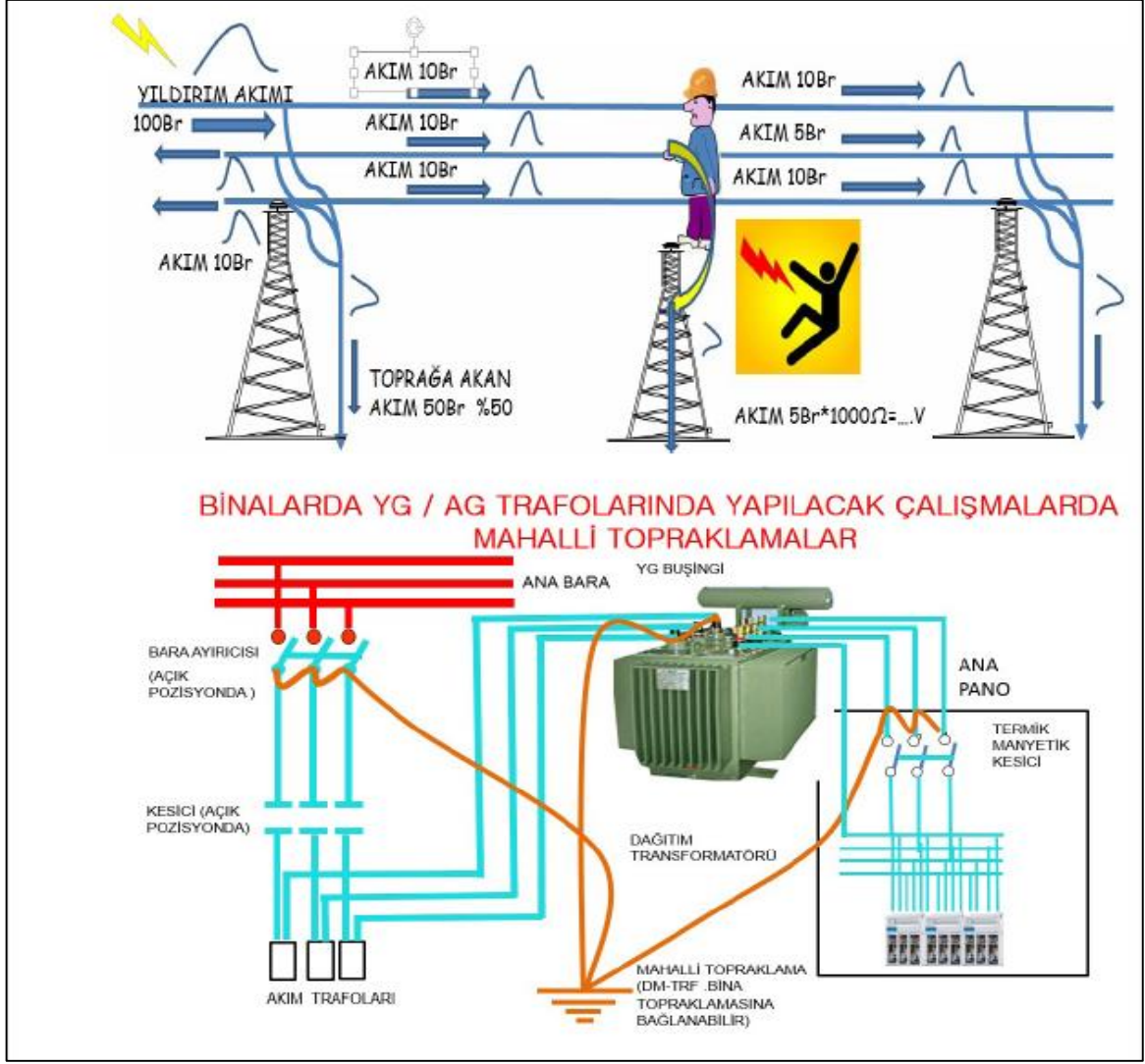
Kısa devrenin IEC 909 (International Electrotechnical Commission) 'daki tanımı şu şekilde yapılmaktadır;

Bir elektrik devresinde, gerilimleri farklı olan iki ya da daha fazla noktanın, bağıl olarak düşük bir empedans üzerinden kaza veya kasıt ile birbirine temas etmesine kısa devre denir.



Şekil 3.7: Kısa Devre Tipleri.

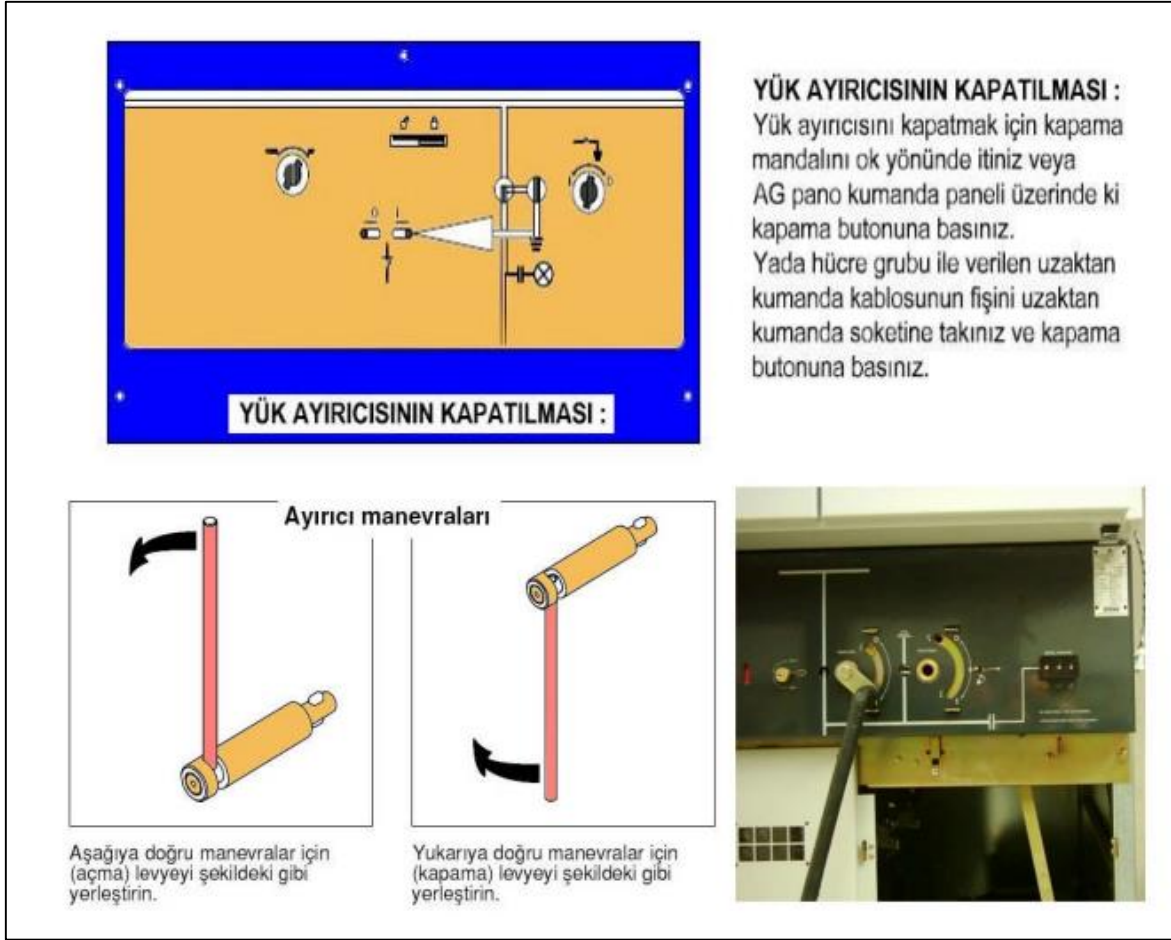
Gerilimi kesilmiş yüksek gerilim tesislerinde bakım ve kontrollü çalışma sırasında çalışılacak bölüm önceden topraklanmış olan bir düzenek üzerinden kısa devre edilir. Kısa devre ve topraklama, ancak bütün çalışmalar bittikten ve bunları yapanların hepsine haber verildiği kesin olarak öğrenildikten sonra kaldırılabilir.



Şekil 3.8: Bakım Amaçlı Mahalli Topraklama.

3.2.2.4 Yük anahtarlama

Anahtarlama aşırı gerilimleri, açma-kapama işlemleri ile şebekedeki arızalarda titreşim olaylarından dolayı meydana gelen bütün aşırı gerilimleri kapsar. Bu anahtarlama şu şekildedir;



Şekil 3.9: Yük Ayırıcı Kumanda [19].

- önceden yüksüz bırakılan, boşta çalışan hatların kapanması,
- Bir hattın seri tekrar kapanması,
- Toprak kaçağı ve kısa devrelerin açılması,
- Bir hattın sonunda yük atma,
- Büyük indüktansların açılması,

Bu işlemlerden dolayı meydana gelen gerilimlerin tehlike hiyerarşisi farklılık göstermektedir. Yapılan çalışmalara göre yüksek aşırı gerilimlere sebep olan kapama olayları; en tehlikeli durumu temsil eden seri tekrar kapamalardır. Büyük indüktansların açılması bugün modern kesicilerle tehlikesiz hale getirilebilmektedir. Modern

transformatörlerin boşta çalışma akımları, kesilme esnasında tehlikeli aşırı gerilimleri oluşturamayacak kadar küçüktür.

Aşırı gerilimlerin meydana gelişi kapama olaylarına istinaden daha yakından tetkik edilecektir. Basitlik ve açıklık temin gayesiyle aşağıdaki deney tek fazlı olarak tatbik edilecektir. 400 *kV*'luk hat kapamadan önce yüksüzdür. Bu hat bir transformatör üzerinden bir santrale bağlanmıştır. Santral ve transformatör bu durumda ideal bir gerilim kaynağı ve bir indüktans olarak kabul edilmiştir. Hattın eşdeğer montajı ikame edilmiştir. Amortisman direneleri devrede iki yere konulmuştur.



4. BÖLÜM

4.1 GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLER

Yalıtım koordinasyonu açısından geçici aşırı gerilimlerin önemi, paratonerlerin sürekli gerilimlere veya risk tahribatına karşı yeniden yalıtılabilmesi gerekliliğinde yatmaktadır. Herhangi bir tür aşırı gerilim saptırıcının yani diğer adıyla paratonerin koruma seviyesi yeniden kapama gerilimi ile orantılı olduğundan, ekipmanın yalıtım düzeyi ve maliyeti dolaylı olarak geçici aşırı gerilimlerin büyüklüklerine bağlıdır

Geçici aşırı gerilimlerin oluşum sebepleri ani yük kaybı; endüktif yüklerin bağlantısının kesilmesi veya kapasitif yüklerin bağlanması; Ferranti etkisi ve dengesiz toprak arızaları olarak çeşitlendirilebilir.

Daha yüksek harmonik frekanslı salınımlar oluşum sebepleri yük bağlantısı yapılmamış transformatörlerin mıknatıslama akımları tarafından uyarılabilir. Öte yandan alt harmonik salınımlar ise hafif yüklü transformatörler veya şönt reaktörlerle rezonansa giren seri kondansatörlerden kaynaklanabilir.

Tek fazlı anahtarlama ve iletkende meydana gelen sorunlar örneğin kopmuş iletkenler, ferro-rezonans geçici aşırı gerilimlerine neden olabilmektedir.

Frekansları güç frekansından çok farklı olmayan aşırı gerilimler şönt kompanzasyonlu iletim hatlarının bağlantısı kesildiğinde ve kapama kısılmış yükler hat kapasitansı ile reaktör endüktansı arasında salındığında ortaya çıkar.

Daha yüksek harmonik frekanslı salınımlar, yüksüz transformatörlerin mıknatıslama akımları tarafından uyarıma maruz kalabilir. Diğer taraftan alt harmonik salınımlardaki durum ise hafif yüklü transformatörlerin veya şönt reaktörlerle rezonansa giren seri kapasitörlerden kaynaklanabilmektedir.

Geçici aşırı gerilimlerin süresi her bir döngü periyodunda değişebilmektedir. Bunlar eğer kesme veya gerilime bağlı röle koruması sağlanıyorsa veya azaltma otomatik gerilim regülatörlerine bağlıysa birkaç saniye, insan müdahalesinin mümkün olma olasılığı yüksek ise çok daha uzun sürelere kadar yükselebilir.

Şiddetli güç frekansı aşırı gerilimleri, endüktif yükten kapasitif yüke geçiş (örneğin, yüklü bir iletim hattının uzak ucundaki bir devre kesicinin açılması) ile tam yük reddinin ve eş zamanlı topraklamanın birleşiminden kaynaklanabilir

Diğer hatlar veya yerel bir yük, güç için bir miktar çıkış gücü sunuyorsa, güç istasyonu yükünün tamamen reddedilmesi mümkün değildir.

Genel olarak söz konusu durum, bir sistem ne kadar yoğun ise, yük reddinin neden olduğu aşırı gerilimler o kadar düşük olur [3].

4.1.1 Endüktif Akımların Kesilmesi Sonucu Aşırı Gerilimler

Güç sistemlerinde normal işletme prosedürünün bir parçası olarak devrelerin anahtarlanması ve arızaların temizlenmesi işlemi kesiciler vasıtasıyla yapılır. Bir kesici vasıtasıyla bir devredeki akımın kesilmesi, normalde AC dalganın bir akım sıfırı noktasında (current zero) olur ve kesicinin kontakları arasında bir gerilim görülmesiyle sonuçlanır. Bu gerilim bir geçici bileşeni içerir. Bu geçici bileşen geçici toparlanma gerilimi (Transient Recovery Voltage, TRV) olarak bilinir ve düşük güç faktörlü devreler için bu geçici bileşen, sistem nominal geriliminden daha yüksek değerlere ulaşabilir. Geçici toparlanma geriliminin pik değeri ve bu pikin artış oranı kesici performansına tesir eder.

Bir kesicide akım kesilmesi olayı sürekli sıfır akım derecesinde gerçekleşmeyebilir. Kesici; transformatörleri, şönt reaktörleri ve motorları tekrar enerjilendirmek için kullanıldığında kesilen akım, kesicinin kesmeye haiz olduğu arıza akımıyla karşılaştırıldığında büyük mertebede olabilmektedir. Arkın sönmesi ve akımın hemen sıfıra dönmesi muhtemel sonucu ile kesici arkında kararsızlık meydana gelebilir. Akım kopması (current chopping) olarak bilinen bu olay, ani olarak azalan bir akımda doğal olarak oluşacaktır. Akım kopmasının tabii akım sıfırından önce oluşması ihtimali, tabii akım sıfırından sonra oluşması ihtimaline göre çok daha yüksektir [37].

Kesicideki akım, akım kopması ile sıfıra zorlanmasına rağmen, endüktif yükteki akım hemen değişmez ve yükün terminallerinde mevcut olan herhangi bir kapasite (kaçak kapasite veya başka türlü bir kapasite) içinden akmaya devam eder. Endüktif yükteki bu akım, terminallerde (kapasiteden dolayı) elektrostatik enerjiye dönüştürülen manyetik enerjiyi temsil eder. Eğer kapasite küçükse bu dönüştürme tarzı, terminallerde görülen bir

aşırı gerilimle sonuçlanır. Olay bütün endüktanslı yükler, özellikle boşa çalışan transformatörler için önemlidir. Şebekelerde yalıtım düzenlemesi ve işletme güvenliği bakımından geçici aşırı gerilimlerin çok iyi bilinmesi gerektiğinden, küçük endüktanslı akımları açmada oluşan geçici aşırı gerilimler kuramsal ve deneysel olarak eskiden beri incelenmiştir. Bu incelemeleri kolaylaştırmak için özel bilgisayar programları da geliştirilmiştir [20].

4.1.2 Yük Atma

Bir elektrik santralının çıkışının önemli bir bölümünü taşıyan bir iletim hattı kapatıldığında, jeneratörler hızlanacak ve gerilim yükselecektir. Hız regülatörleri ve otomatik gerilim regülatörleri, normal koşulların geri kazanılması anlamında müdahale edecektir. Ulaşılan en yüksek bara geriliminin eksiksiz olarak belirlenmesi, makinelerin, regülatörlerin ve uyarma sistemlerinin parametrelerinin yanı sıra dijital veya analog bilgisayarlar gibi matematiksel yardımcılarının tam olarak bilinmesini gerektirir. İlk yaklaşımda yeterli olabilecek yaklaşık bir değerlendirme için, başlangıçta alt geçici reaktansın arkasındaki gerilimin olaydan önceki değerinde değişmeden kaldığı, ancak birkaç döngüden sonra geçici reaktansın arkasındaki E'_d geriliminin sabit sürücü gerilim haline geldiği varsayılabilir.

Kayıplar ve kısa geçiş dönemi ihmal edildiğinde, E'_d ve gönderen uç bara gerilimi (V_1) arasındaki ilişki şöyle olur:

$$V_1 = \frac{\left(\frac{f}{f_0}\right) E'_d}{\left[1 - \frac{\left(\frac{f}{f_0}\right) X_s}{X_c}\right]} \quad (4.1)$$

Bu denklem, E'_d üzerindeki etkisiyle aşırı hızlanma ile ilişkili gerilim artışlarını açıklamaktadır. Burada yer alan endüktif ve kapasitif varyasyon frekanslı aktif reaktanslar. X_s 'ler X_c arasındaki reaktans ve V_1 (genellikle jeneratör geçici reaktansı ve trafo reaktansının toplamı), X_c açık devrenin kapasitif giriş reaktansıdır. Artırılmış frekanstaki hat ve $\frac{f}{f_0}$, maksimum gerilime ulaşıldığı andaki anlık frekansın anma frekansına oranını tanımlamaktır.

Turbo jeneratörler için, tam yük reddinde maksimum hız artışı yaklaşık %10 kadardır ve bu geçiş bir saniyeden daha kısa sürede gerçekleşir.

Bu süre içinde rotor akısı fazla değişmemiştir ve maksimum gerilim, reddedilen yük için maksimum hız artışına karşılık gelen anlık frekans kullanılarak denklem 4.1'de yaklaşık olarak hesaplanabilir [3].

4.1.3 Harmonik Rezonans

Büyük geçici (temporary) aşırı gerilimler sisteme bağlı transformatörlerde doymaya yol açabilir. Üretilen harmonikler bir sistem tabii frekansına yakın bir frekansa ulaşırsa harmonik rezonans oluşabilir. Yükün devreden çıkartılması ve bu sebeple gerilimdeki yükselme transformatörde doymaya ve harmoniklerin üretilmesine sebep olabilir.

Bir generatör transformatörüne bağlı 420 kV'luk 35.4 km uzunluktaki bir hattan 270 MW, 0.85 güç faktörlü bir yük devre dışı edildiğinde, böyle bir durum kaydedilmiştir. Bu sırada 1.4 p.u.'luk bir geçici aşırı gerilim kaydedilmiş ve bu gerilim güç frekanslı gerilime bir harmonik gerilimin bindirilmesinden oluşmuştur.

Transformatörlerle sonlandırılmış hatların enerjilenmesi harmonik rezonansların sebep olduğu geçici (temporary) aşırı gerilimlere götürebilir. Örneğin Finlandiya'da transformatörlerle sonlandırılmış 400 kV'luk 520 km uzunluklu bir hat, zayıf bir kaynaktan enerjilendirilmiştir ve uzun süreli 2.5 p.u.'luk bir aşırı gerilimle sonuçlanan bu durumda ikinci harmoniğin görüldüğü resmi olarak açıklanmıştır. Böyle aşırı gerilimlere, uzun hatlara sahip zayıf sistemlerde sıkça karşılaşılır. Sistem, harmoniklerden biriyle rezonansa geldiğinde çok zor koşulların oluştuğu bilinmektedir. Bu aşırı gerilimler uzun bir süre devam edebilir. Bu gecikmenin sebebi, yüksüz transformatör çekirdeklerinin yavaş yavaş mıknatıs gibi davranıştan kurtulmasıdır [9].

4.1.4 Ferranti Olayı

Uzun iletim hatlarında güç frekans gerilimlerini etkileyen en önemli faktörler, normal çalışma sırasındaki hat ve bir arıza sırasındaki gerilimlerdeki artış, hattın uzunluğu ve şönt kompanzasyon derecesidir. Her iki parametrenin de, normal anahtarlama işlemlerinin yanı sıra bir arızanın başlatılması veya giderilmesi ile bağlantılı geçici olaylar üzerinde önemli

bir dolaylı etkisi vardır. Ferranti etkisi, belirli sıklık ve frekans koşulları altında meydana gelen anormal olguyu tanımlar. Hat uzunluğunda, sinüzoidal bir giriş gerilimine göre açık uçlu bir iletim hattında bir gerilim artışı gözlemlenebilir. Etki, 19. yüzyılın sonunda Büyük Britanya'da AC (Alternatif akım) tabanlı bir dağıtım sisteminin kurulması sırasında keşfedildi. ABD'de Nikola Tesla'nın sahip olduğu Westinghouse ile Thomas Edison arasında yaşanan akım savaşı olarak tabir edilen edilen AC – DC akım mücadelesinden kaynaklanan bu olgu bu esnada keşfedilmiştir. Thomas Edison esas olarak ticari amaçlarla bir DC akım (doğru akım) sistemi önerdi. Birleşik Krallık'ta, AC sistemlerinin önemli bir savunucusu olarak Sebastian Ziani de Ferranti; ara gerilim seviyeleri ve uzaktan düşürücü trafolar içeren bir AC dağıtım sistemi kurdu. Bu, temel olarak bugüne kadar kullanılan sistemlerin öncüsüdür. Sistem şu şekildeydi; dağıtım bölümleri ekleyerek, yani iletim hattının toplam uzunluğunu artırarak, hattaki gerilimi yerel olarak arttırdı. Esas olarak Deptford - Londra hattında bazı karbon fiber lambaların bir ampul taktıklarında parlaklığının arttığını gözlemlediler. Ek dağıtım bölümü, bu durumda, $935 \text{ kW}'ı$ biraz aşan etkili bir jeneratör gücüne sahipken yalnızca birkaç düşük güçlü ampul yüküne sahip oldukları açıkça ortadaydı. Böylece Ferranti'nin aslında yaklaşık olarak açık uçlu bir iletim hattı vardı. Sonuç olarak bugün ferranti etkisi, nispeten düşük frekanslarda uzun mesafelerde güç aktarımı alanında iyi bilinmektedir [16].

Bir iletim hattı yüksüz olduğunda, ferranti etkisi, göndericiden gelen gerilimin yükselmesine neden olur. Uç, uzak uca doğru açık hat gönderen uçtan düştüğünde, devre kesicinin her iki tarafındaki gerilim ters yönde değişecektir. Dolayısıyla kaynak tarafındaki gerilim, açıkken geçici bir salınım yoluyla kendisini daha düşük bir seviyeye ayarlayacaktır. Hat tarafında ise, hat şarj akımının kesilmesi sonucu hat boyunca meydana gelen elektrostatik yükün yeniden dağıtılması sürecinde gerilim yükselecektir. Aşağıda verilen program Matlab kodu Ferranti etkisini göstermektedir. Uygulamada hat uzunluğu değiştirilerek etkiyi simüle eder ve programın akışı şöyledir; hattı sıfırdan (alıcı uçtan) 5000 km'ye 10 km'lik adımlarla gösterir ve gönderen uç gerilim fazörünü çizer. Ek A'da kapsamlı kodu yer almaktadır.

MATLAB Kodu şu şekildedir;

1. *clear*
2. $VR = 220e3 / \sqrt{3};$
3. $alpha = 0.163e-3;$
4. $beta = 1.068e-3;$
5. $l = 5000;$
6. $k = 1;$
7. *for i= 0:10:l,*
8. $VS = (VR/2) * \exp(alpha*i) * \exp(j*beta*i) + (VR/2) * \exp(-alpha*i) * \exp(j*beta *i);$
9. $x(k) = \text{real}(VS);$
10. $y(k) = \text{imag}(VS);$
11. $k = k + 1;$
12. *end*
13. *plot (x,y); Ferranti*

Uygulamada simüle edilen kodda 10 km aralıklar ve adımlar ile ferranti etkisini çizmeyi sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir.

4.1.5 Toprak Arızaları

Dağıtım sistemlerinde meydana gelebilecek en olası arıza türü tek fazlı toprak arızasıdır. Tek fazlı toprak arızası sonucunda topraklama tipine bağlı olarak yüksek genlikli akımlar veya yüksek genlikli gerilimler gözlemlenebilir. Her iki durumda da dağıtım sistemi için tehlike ortaya çıkar. Bu nedenle dağıtım sistemleri bu tür arıza olasılıklarına karşı koruma röleleri ile korunmaktadır. Genel olarak dağıtım sistemlerinde yönsüz koruma uygulaması yaygındır. Ancak kullanılan fiderlerin boylarının artması veya kullanılan fiderlerin havai hatlar yerine kablo olması, yönsüz koruma uygulamasının yetersiz kalmasına neden

olmaktadır. Bu durum yönlü korumanın yaygın kullanımını hızlandırdı. Bu çalışmada örnek bir radyal dağıtım sistemi modellenmiştir. Tek fazlı toprak arızalarında yönlü koruma gerektiren durumlar topraklama türlerine göre analiz edilmiştir [21].

4.1.5.1 Tek faz toprak arızası

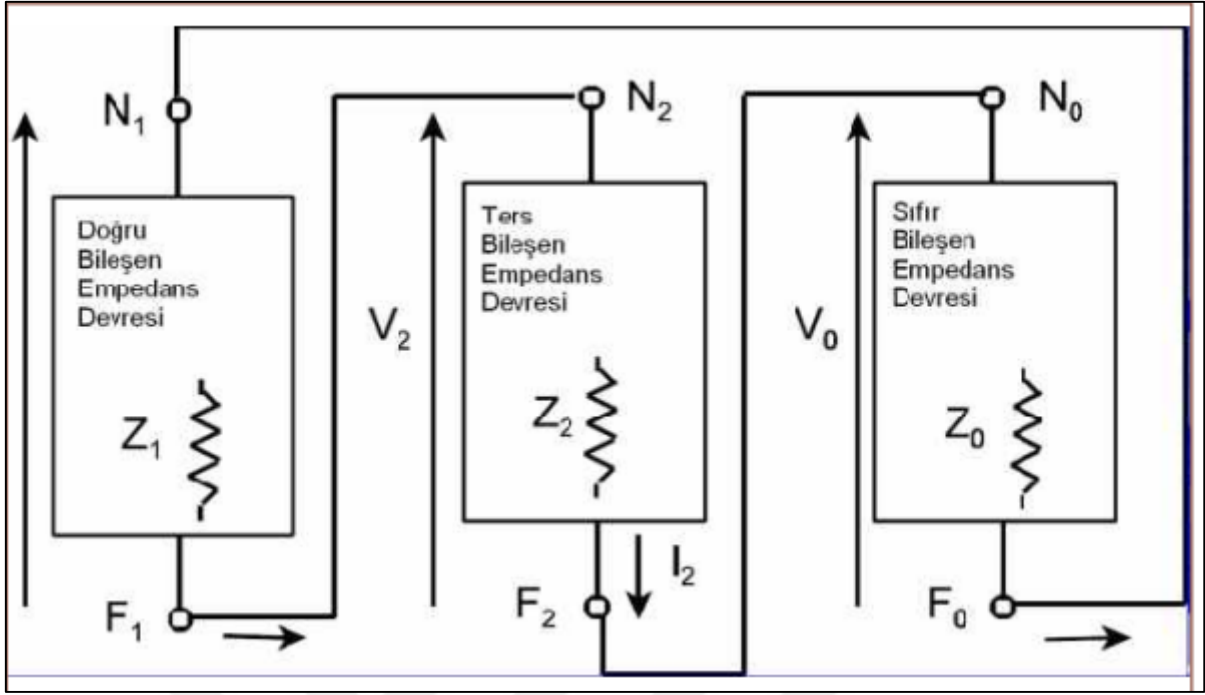
Tek fazlı toprak arızası, sistemdeki tek bir fazın doğrudan veya bir empedans aracılığıyla toprakla temas etmesi sonucu oluşan arıza türüdür. Genellikle açık ağlarda meydana gelme olasılığı %80'dir. Sistemde görülen bu arıza akımı, arıza noktasına bağlı olarak en yüksek kısa devre akımı değerlerine sahip olabilir. Olay anında arıza akımı 10 ila 100 kat arasında üstel oranlarda artarken, diğer akım değerleri yaklaşık olarak sıfırdır. Arıza akımının sıfır geçişlerinde ilgili arıza gerilimi maksimumda iken geçişlerde sıfıra düşer a fazında tek faz-toprak arızası oluştuğunu varsayarsak matematiksel ifade şu şekilde hesaplanır;

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3Z_f)} \quad (4.2)$$

$$I_a = I_0 = I_1 = 3I_1 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3 + Z_f)} \quad (4.3)$$

$$I_b = (I_0 + a^2 I_1 + a I_2) = 0 \quad (4.4)$$

$$I_c = (I_0 + a I_1 + a^2 I_2) = 0 \quad (4.5)$$



Şekil 4.1: Tek Faz Toprak Kısa Devre [22].

4.1.5.2 Faz-faz arızası

Sistemdeki iki fazın temas etmesi ve akabinde meydana gelen arıza çeşididir. Bu tür arızanın matematiksel olarak ifadesi edilmesi şu şekilde yapılır;

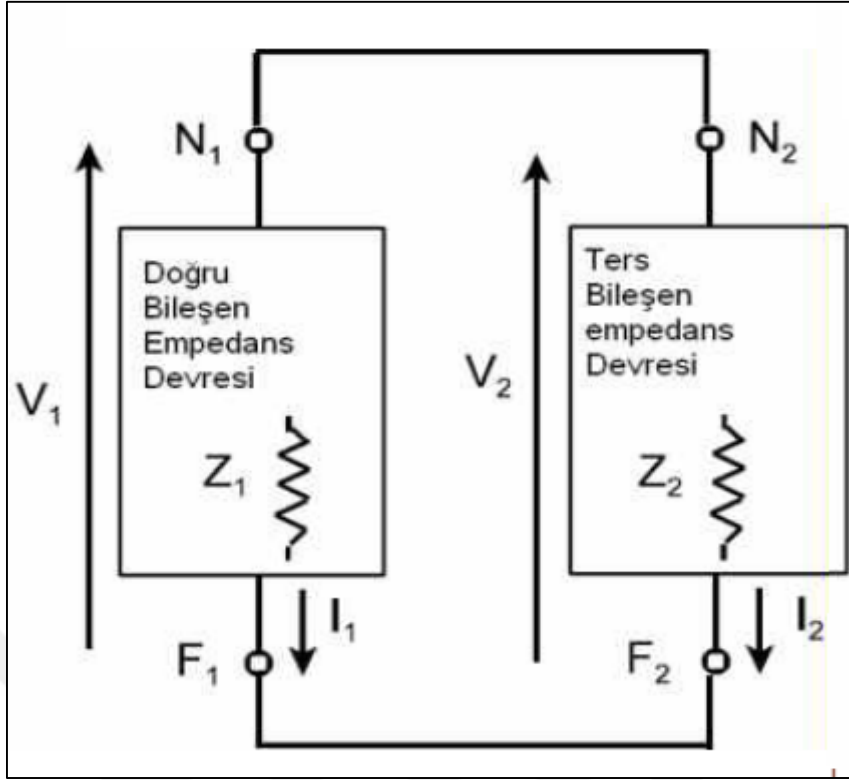
$$I_0 = 0 \quad (4.6)$$

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (4.7)$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (4.8)$$

$$I_b = -\frac{j\sqrt{3}V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (4.9)$$

$$I_c = (I_0 + a I_1 + a^2 I_2) = -I_b \quad (4.10)$$



Şekil 4.2: Faz-Faz Kısa Devre Arızası.

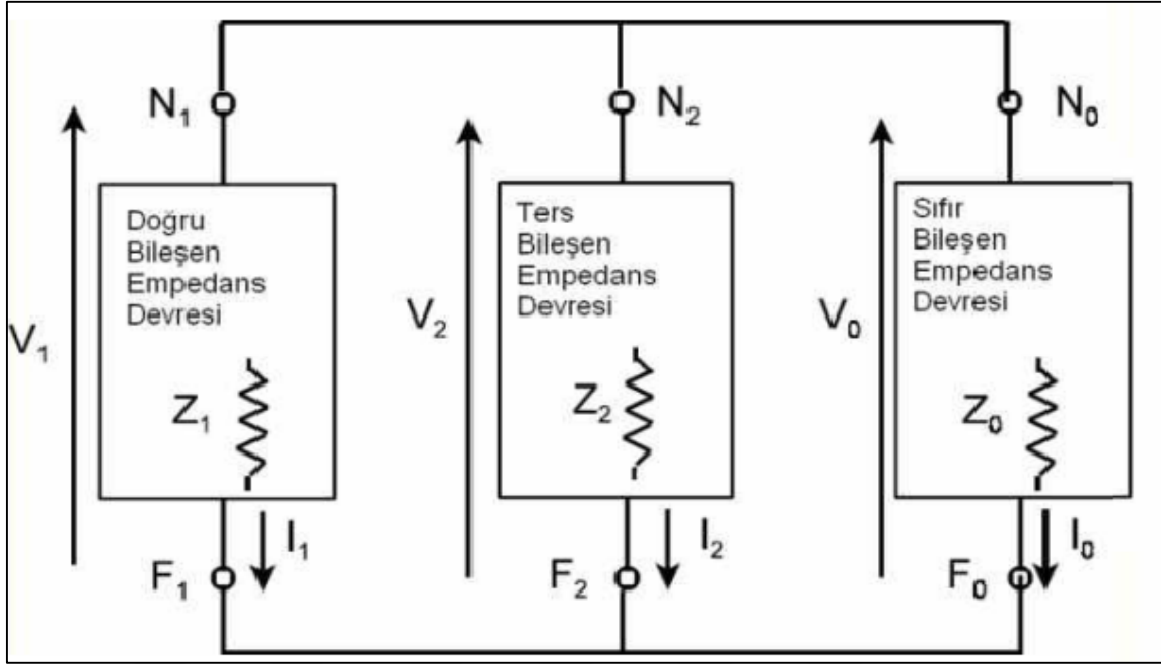
4.1.5.3 İki faz –toprak arızası

İki fazın birbiriyle ve toprakla teması sonucu oluşan arıza çeşididir. Bu tip arızanın matematiksel ifadesi aşağıda belirtilmiştir

$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1 + \left[\frac{Z_2 (Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \right]} \quad (4.11)$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0 + 3Z_f}{Z_1 + \left[\frac{Z_2 (Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \right]} \quad (4.12)$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_1 + \left[\frac{Z_2 (Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \right]} \quad (4.13)$$



Şekil 4.3: İki Faz Toprak Arızası [22].

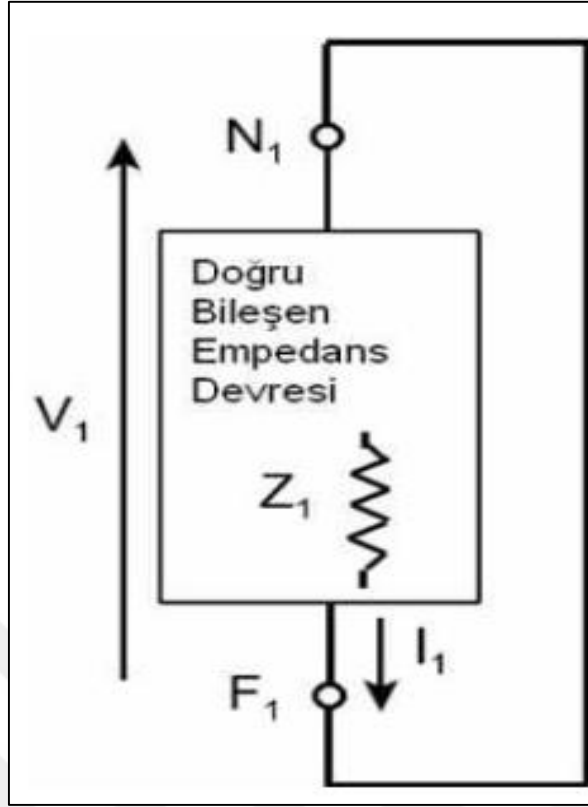
4.1.5.4 Simetrik üç faz arızası

Üç fazın birbiriyle temas etmesi sonucu oluşan bir arıza türüdür. Bu tip arızalarda toprak kontağının olup olmasının parametrelere etkisi yoktur. Bu tip arızanın matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$I_0 = 0 \quad (4.14)$$

$$I_2 = 0 \quad (4.15)$$

$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1} \quad (4.16)$$



Şekil 4.4: Üç Faz Kısa Devre Arızası [22].

Simetrik bileşenler yöntemi kullanılarak, dengeli (üç fazlı) kısa devre arızalarının ve açık devre arızalarının, özellikle üç fazlı güç sistemlerinde dengesiz kısa devre arızalarının analizi rahatlıkla yapılabilmektedir. Bu yöntem aynı zamanda güç sistemlerinde koruma ve koruma koordinasyonu için de kullanılır.

4.1.5.5 Simetrik bileşenler

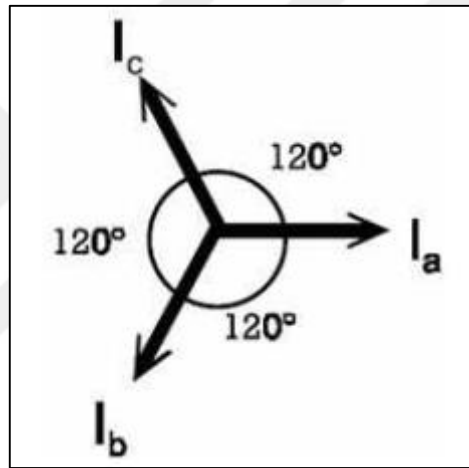
Elektrik güç sistemlerinde simetrik bileşenler yöntemi, asimetrik üç fazlı güç sistemlerinin analizini kolaylaştırır. Matematiksel bir teknik olarak kullanılmaktadır. İlk olarak bu yöntem Charles Legey tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra bu teknik bilim insanı Fortescue tarafından geliştirilerek 1918'de yayınlandı. "Çok Fazlı Ağlar İçin Çözüm" başlıklı teknik makalede sunulan makaledeki yöntem, orijinal sistemin asimetrik işaretçilerini çözmektir.

Bu simetriklerin mantığı ilk olarak vektör alanlarının üstel ifadeler içermesi diğer taraftan aslında λ ifadesi simetriklerin bulunmasını sağlayan uzanım formülüne eklenen bir fonksiyonu temsil etmektedir. Bu fonksiyon sayesinde sıfırdan farklı ya da aşık olmayan yeni sonsuz küçük ifadeler (vektör alanlarının katsayıları) bulma imkanını sağlar öte yandan

denklemleri sağlayan λ fonksiyonuna aynı zamanda simetri denilir. Lineer olmayan adi diferansiyel denklemlerin λ simetrisi yardımıyla ilk integralleri ve integrasyon çarpanları bulunabilir ve bu ilk integraller kullanılarak denklemin analitik çözümlerine ulaşılabilir [23].

Simetrik bileşenler yöntemiyle üç fazlı güç özellikle kararsız kısa devre sistemlerinde dengeli (üç fazlı) kısa devre ve aralıklı arızalar hataları analiz etmek kolaydır. Bu yöntem aynı zamanda elektrik sistemlerinin ekranlanması ve korunması için de kullanılır. Aynı zamanda koruma koordinasyonu için de kullanılır [22].

Bunun için dengeli faz gruplarının geliştirilmesi için N asimetrik çok fazlı sayı ve N dengeli işaretçi simetrik gruplarının toplamı şu şekilde ifade edilebilir.

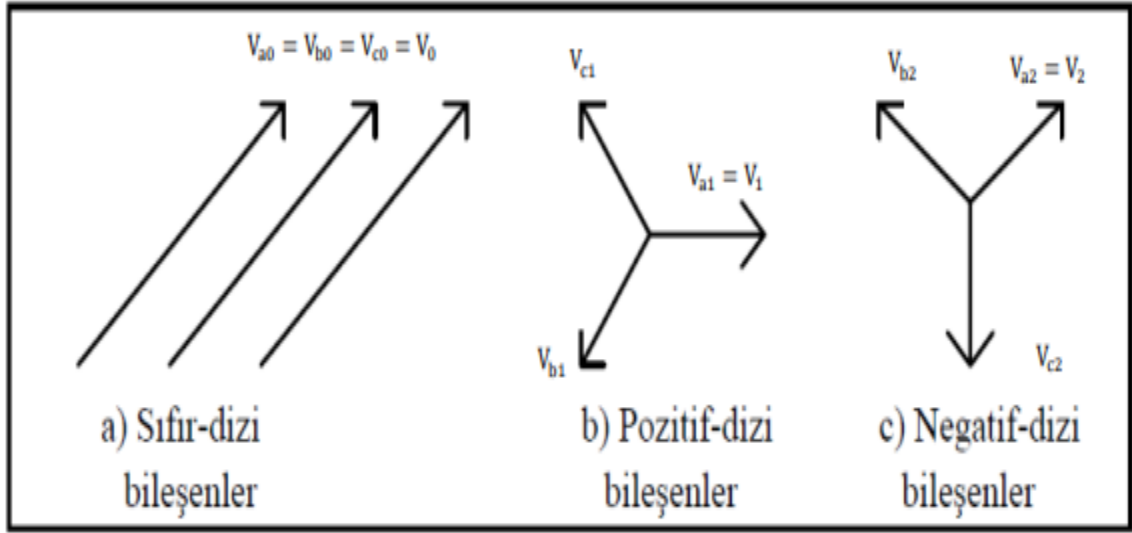


Şekil 4.5: Üç Fazlı Dengeli Sistem.

Şekil 4.5'te dengeli üç fazlı bir sistemin fazörlerini göstermektedir. Üç fazörün her biri büyüklük olarak eşit ve birbirlerinden 120 derece fark ile yerleştirilmiştir. Öte yandan, pozitif dönüş yönü, saatin ters yönündedir. Söz konusu bu şekil, normal olarak çalışan bir güç sisteminin üç faz akımlarını temsil etmektedir. Fazör takımının Fortescue'ya göre hat gerilimlerinin fazörleri üç ayrı bileşene V_a , V_b ve V_c olarak tanımlanan hat gerilimleri olarak gösterilir [24].

a. Şekil 4.2 'de şematize edilen üç fazörden meydana gelen ve sıfır-dizi bileşen sistemi olarak adlandırılan bileşen sistemi, faz farkı olmayan ve büyüklükleri aynı olan gerilimleri temsil etmektedir.

- b. Pozitif-dizi bileşeni sisteminde ise, birbirleri içerisinde $\pm 120^\circ$ faz farkına haiz yalnız sistemle aynı dizi büyüklükleri yine şekil 4.2’de gösterilen üç fazörden meydana gelir.
- c. Negatif-dizi bileşen sisteminde, birbirleri içerisinde $\pm 120^\circ$ faz farkına sahip özgün sistemle ters dizi büyüklükleri aynı olup şekil 4.2’de verilen üç fazörden meydana gelir.



Şekil 4.6: Dengeli Olmayan Üç Ayrı Simetrik Bileşen [24].

Üç fazlı sistemin sadece A fazına ait sıfır, pozitif ve negatif dizi bileşenlere ait sırasıyla V_{a0} , V_{a1} ve V_{a2} fazörleri analiz edilecektir. Daha sade ve basit bir yöntem ile “a” indisini göz ardı edilerek belirlenen bileşenleri V_0 , V_1 ve V_2 olarak alınacaktır. Bu bileşenler ise 4.2.1 matris denkleminde dönüştürülerek tanımlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$a = 1\cos 120 + j\sin 120 = \angle 120^\circ = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.18)$$

4.17’de bulunan katsayılar matrisinden yola çıkılarak üç farklı denklem yazılabilir. Şöyleki;

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (4.19)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (4.20)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (4.21)$$

Eşitlik 4.19'da üç fazlı dengeli bir sistemde, dengeli fazörlerin toplamı sıfıra eşit olacağından sıfır dizi bileşen geriliminin olmayacağı anlamına gelir. Dengesiz bir üç fazlı sistemde, faz-toprak gerilimleri sıfır dizi bileşenine sahip olabilir. Ancak fazdan faza gerilimler hiçbir zaman sıfır dizi bileşenine sahip değildir. Benzer şekilde simetrik bileşen dönüştürme işlemleri, bir sistemin bileşen gerilimlerinin yanı sıra akım fazörlerine de uygulanabilir. Bu denklemler aşağıda belirtildiği gibi yazılabilir [24].

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (4.22)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (4.23)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + I_c) \quad (4.24)$$

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

$$I_n = (I_a + I_b + I_c) \quad (4.25)$$

4.25' teki denklemden sistemdeki sıfır dizi akımı geçmediğinden yıldız noktasının nötr akımı sıfır olur. Diğer taraftan üçgen bağlantılı bir sistemin veya yıldız bağlantılı bir sistemin nötr noktası topraklanmamışsa bu şekilde tasarlanan sistemlerde sıfır bileşen bulunmamaktadır.

5. BÖLÜM

5.1 YÜKSEK GERİLİM İSTASYONLARINDA İZOLASYON KOORDİNASYONU

Yüksek gerilim istasyonlarının yalıtım tasarımı birden fazla faktöre bağlıdır. Temel olarak trafo ve diğer yüksek gerilim ekipmanlarını barındıran ve bu ekipmanların kendi öz korumaları yok ise istasyonlar en iyi şekilde izolasyonu sağlamak zorundadır. Öte yandan bu istasyonlar genel olarak sahip oldukları önem arzından ötürü hava arkları bile hesaba katılıp tüm riskler minimize edilmelidir [25].

Önemli istasyonlarda yıldırım dalgalanmalarına karşı koruma, şönte bağlı koruyucu cihazlar aracılığıyla koruyucu bir gerilim seviyesinin oluşturulması ile sağlanır. Yıldırım darbe dayanım seviyeleri çeşitli ekipman öğelerinin her biri koruyucu seviyenin üzerinde olmalıdır. Mesafeye bağlı olarak tasarım şekillenecektir. Ekipmanın çeşitli öğelerinin her biri, göreceğimiz gibi, ekipmanın koruyucu cihazdan uzaklığıyla artan uygun bir kademe kadar koruma seviyesinin üzerinde olmalıdır. Bu marj, daha önce tartışılan istatistiksel yöntemlerle hava yalıtımı açısından belirlenebilir, ancak istatistiksel dayanma gerilimi bilinmeyen kendi kendini onarmayan yalıtım için marj, geleneksel yöntemle seçilir [25].

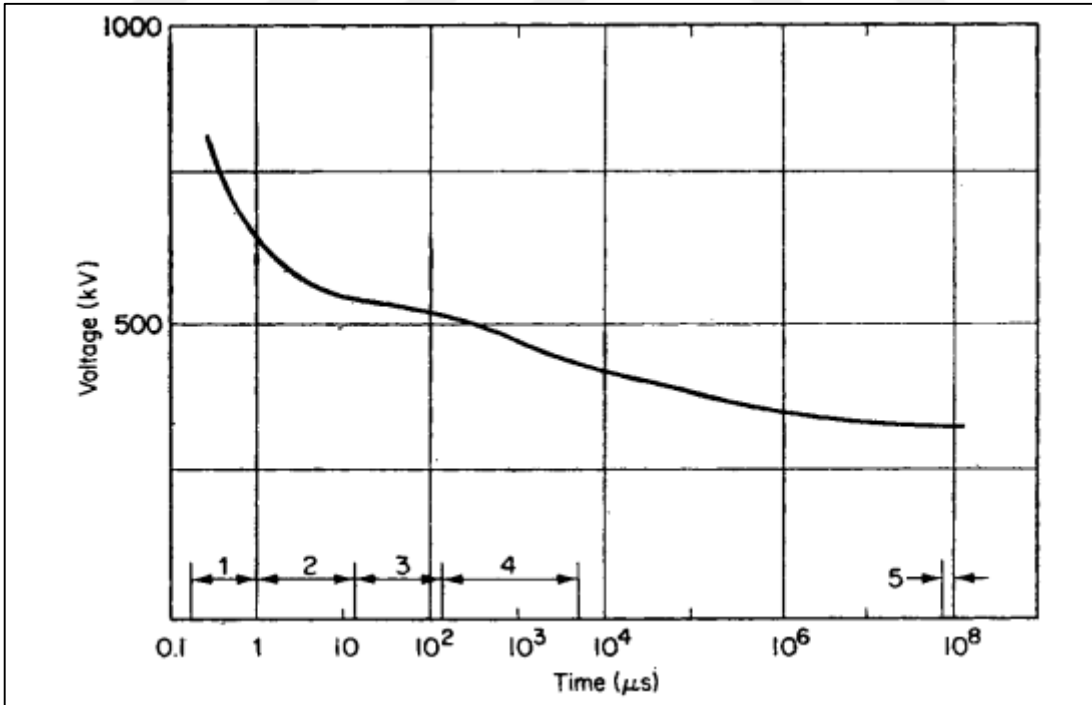
Değer olarak 300 kV altında olan sistemlerde anahtarlama dalgalanmaları iletim hatlarında olduğu gibi istasyonlarda da kritik bir faktördür. Yıldırım darbesi dayanım seviyeleri geçerli koruma düzeyine göre doğru bir şekilde seçilirse, ekipman ayrıca yeterli anahtarlama dalgalanma gücüne sahip olacaktır. Daha yüksek gerilimlerde ise farklı iki durumdan biri seçilebilir. Birincisi mümkün olduğu müddetçe koruyucunun ark gerilimi anahtarlama çalışmayacak şekilde cihaz seçilmelidir. Bu şekilde tercih yapılmasının nedeni ise nispeten uzun süreleri nedeniyle aşırı gerilimler, termal aşırı yüklenmeye ve cihazda hasara neden olur ve dolayısıyla yıldırım darbe dayanımlarını zorlamaktadır. İkinci durumda ise çok yüksek gerilimler için, bu ekonomik olarak avantajlı olan tercih edilmektedir. Öte yandan hem anahtarlama hem de yıldırım aşırı gerilimlerinin sınırlandırılması için koruyucu bir cihaz kullanmak gerekir. Dalgalanma saptırıcı yani paratoner teknolojisindeki ilerleme sayesinde bu artık mümkün hale gelmiştir. Öte yandan bu teknikle ilgili deneyim hala sınırlıdır ve birçok mühendis, ekipmana, kontrollü anahtarlama dalgalanma seviyesinin üzerinde küçük bir marjla bir anahtarlama darbe yalıtım seviyesi atamayı tercih eder.

Böylece aşırı gerilim saptırıcılar yalnızca nadiren anahtarlama dalgalanmalarında çalışır böylelikle ikincil bir savunma hattı oluştururlar [25].

5.2 AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUYUCU CİHAZLAR

Aşırı gerilime karşı koruma konusu alt yapı ile beraber ele alınmalıdır. Bütün aşırı gerilime karşı koruma ürünlerinin çalışması için doğru yapılmış bir topraklama tesisi, paratoner tesisi ve elektrik dağıtım tesisi gerekmektedir. Sonuçların istenilen düzeyde olması için topraklamanın yönetmeliklere uygun olması önemlidir. Bu kapsamda Türkiye’de standart ise TS IEC 62 305’tir. Bunlardan en önemlileri yıldırım ve aşırı gerilim koruma ekipmanlarının hangi dağıtım noktasında nasıl kullanılacağına ilgili mevzuat hükümleridir. Bu şartnamede en önemli nokta, yıldırımdan korunma tesisatının "İç ve Dış Yıldırımdan Korunma" olarak tanımlanmasıdır. Harici paratoner kurulum koşulları yapıyı korumaya yönelik ürünleri içerir. Dahili yıldırım gereksinimleri aynı zamanda cihazların ve ekipmanların korunmasına yönelik ürünleri de ön koşul olarak belirtmektedir [26].

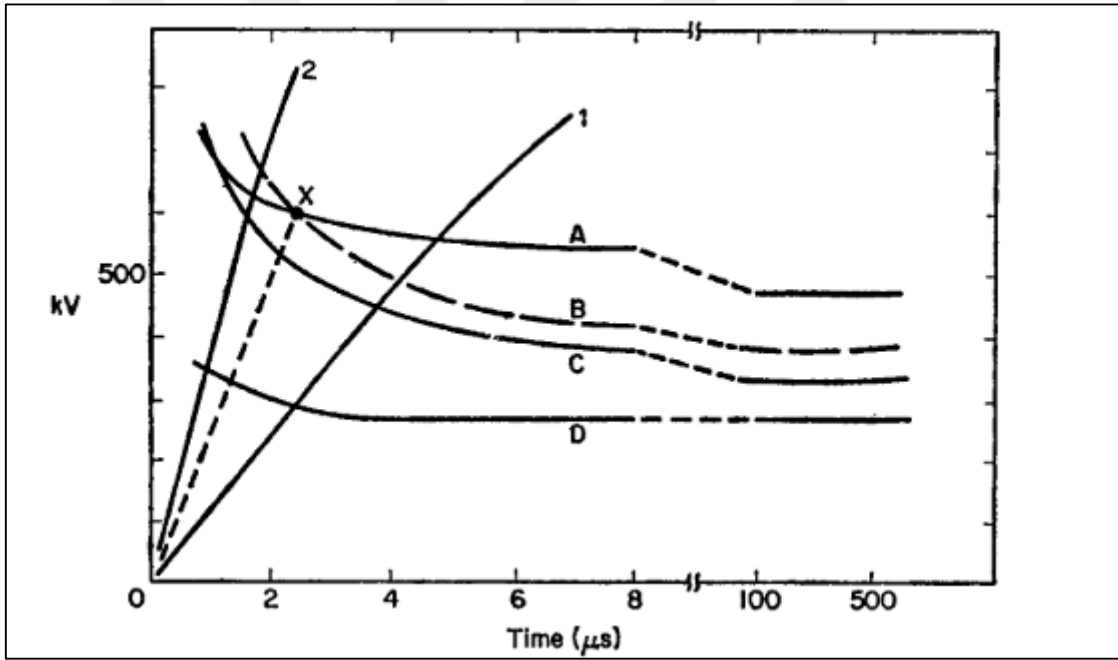
5.2.1 Şönt Bağlı Aşırı Gerilim Koruyucu Fonksiyonu



Şekil 5.1: Transformatorün Dayanım Gerilim-Zaman Karakteristiği [25].

Şekilde 5.1’de bulunan grafikte bir rakamı ile gösterilen zaman aralığı dik cepheli yıldırım dalgalanmalarını, yine aynı şekilde iki numaranın kapsadığı zaman aralığı yavaş cepheli yıldırım dalgalanmalarını, üç numaralı zaman aralığı hızlı anahtarlama dalgalanmalarını, dört numaralı zaman aralığı yavaş anahtarlama dalgalanmalarını ve beş numara ile temsil edilen zaman aralığı ise 1 dakikalık güç-frekans testi aralığını göstermektedir.

Şekil 5.1’de gösterilen, burada her biri belirli bir test gerilim tipine veya şekline atıfta bulunan çeşitli zaman dilimleri belirtilmiştir. Kendi kendini eski haline getiren yalıtım için, dayanma gerilimleri, kritik parlamaya karşı zaman karakteristiğinin altındaki standart sapmanın uygun şekilde seçilmiş bazı katlarında belirlenir; kendi kendini onarmayan yalıtım için, dayanım karakteristiğindeki noktalar, tam dalga, kesikli dalga, dalga önü, anahtarlama darbesi ve güç frekansı için belirtilen test gerilimlerine karşılık gelir.



Şekil 5.2: Çubuk Aralığı ve Aşırı Gerilim Saptırıcı ile Trafo Koruması.

Kaynak: A, 550 kV trafo dayanım eğrisi; B, 79 cm (26 inç) çubuk aralığı atlama; C, 67 cm (22 inç) çubuk aralığı atlama; D, 120 kV aşırı gerilim saptırıcı kıvılcım; 1 ve 2 numaralı eğriler ise dalgalanma cephelerini temsil etmektedir.

132 kV trafuyu eğri A’da gösterilen tüm zaman aralığında koruyacaktır; öte yandan 66 cm (26 inç) çubuk aralığı B Eğrisi, transformatörü yalnızca ön eğimleri düşük düzeyli dalgalanmalara karşı koruyacaktır. Söz konusu bu düşük seviyedeki dalgalanma örneğin; 1

numaralı eğrinin gösterdiği dalgalanmada görülmektedir. Daha dik dalgalanmalar ise hat boşluğunun çalışması için zaman bulamadan yalıtımı bozacaktır. 56 cm'lik bir çubuk aralığı (C Eğrisi) durumu iyileştirir, ancak bazı anahtarlama dalgalanmalarında kıvılcım yani ark çıkabilir. Dolayısıyla şönt bağlı koruma cihazları için ideal gereksinimler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a. En istisnai durumlar dışında, geçici gerilimler altında kıvılcım çıkarmamalıdır.
- b. *Gerilim/zaman* eğrisi, korumaya ihtiyaç duyulan herhangi bir zaman diliminde, korunan yalıtımın dayanma seviyesinin altında olmalıdır. İki eğri arasındaki marj, mesafenin, polaritenin, bağlı hava yoğunluğundaki değişikliklerin, nemin, yalıtımın eskimesinin ve koruyucu cihazın özelliklerindeki olası değişikliklerin etkilerine izin verecek kadar yeterli olmalıdır.
- c. Yüksek enerjili dalgalanmaları, koruma seviyelerinde değişiklik olmadan veya kendilerine veya bitişik ekipmanlara zarar vermeden boşaltabilmelidirler.
- d. Bir dalgalanmayı boşalttıktan sonra, geçici aşırı gerilimlerin mevcudiyetinde yeniden mühürlenmeleri (yani iletken olmayan hale gelmeleri) gerekir.

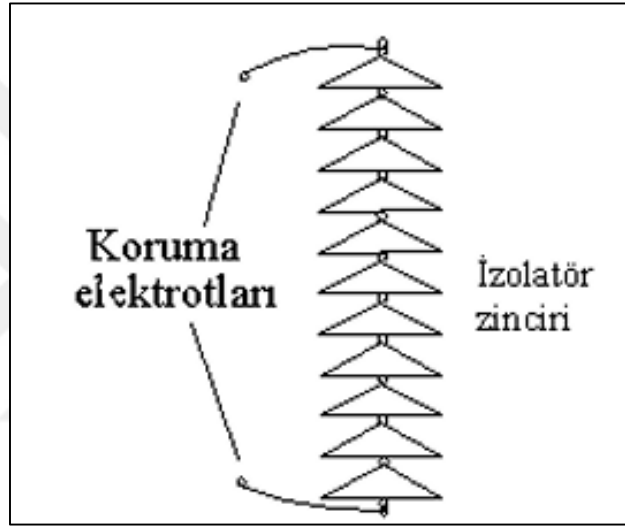
5.2.2 Hat Boşlukları

Hat boşlukları basit ve ucuzdur, ancak tüm gereklilikleri, özellikle yeniden mühürlemeyi karşılamaz. Atmosfer koşullarına tabidirler ve pozitif ve negatif kutup dalgalanmalarına farklı tepkiler verirler; bu nedenle gerilim-karakteristikleri oldukça geniş bir banttır ve kısa dalga cepheleri için keskin bir şekilde yukarı doğru kıvrılır. Ayrıca, hiçbir akım sınırlayıcı direnç kullanılmadığından, darbe gerilimi kıvılcımlanma durumunda sıfıra düşer; eğer boşluk bir transformatörün yakınına kurulursa, sargı, dönüş yalıtımı üzerinde tehlikeli gerilimler oluşturan çok büyük bir kademeli darbeye maruz kalabilir [25].

5.2.2.1 Ark boynuzları

Ark boynuzları olarak da bilinen koruma elektrotları, genel olarak karşılıklı iki metal çubuktan oluşan, basit elektrotlardır. Koruma elektrotları, basit yapıda olmaları nedeniyle zincir izolatörleri, transformatör geçit izolatörleri gibi aygıtlara kolaylıkla yerleştirilebilirler. Ark boynuzlarının olumsuz yanı ise, darbe gerilimlerinde dik cepheli olarak nitelendirilen

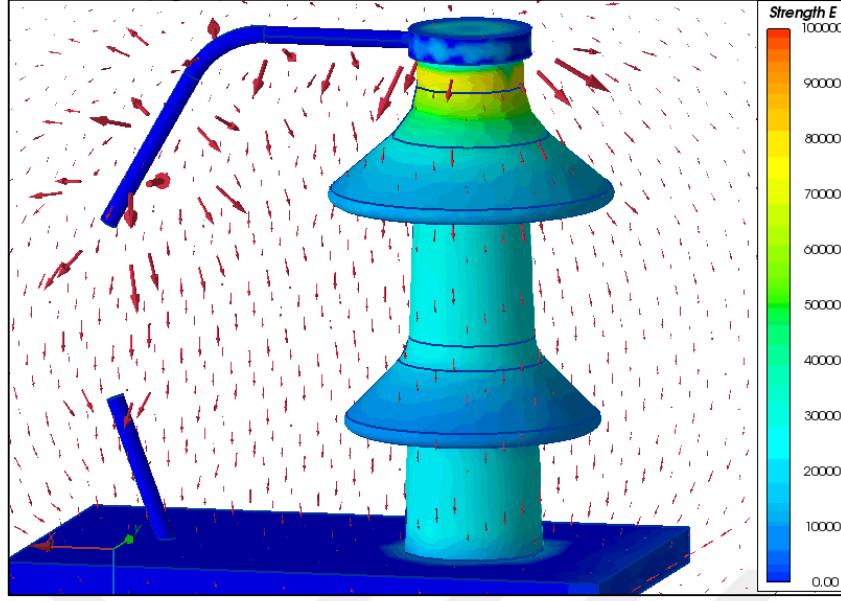
gerilim tiplerinde süre bağlamında yetersiz kalıp etkin hızlı süre koşulunu sağlayamamalarıdır. Ark boynuzunun elektrotları arasında oluşan arkın sönmesi enerjinin kesilmesi anlamına gelecek ve bundan ötür kısa devre etkisi gösterecektir. Bu faktörler göz önüne alındığında ark boynuzları uygulamada pek güvenli bir koruma aygıtı olarak değerlendirilemezler. Öte yandan yedek koruma için ark boynuzları görevi üstlenmektedirler ve sistemi koruma da yedek bir kalkan olarak görev almaktadır. Ark boynuzları aynı zamanda yedek koruma kalkanı olması özelliğini iletimde yer alan izolator yüzeylerinde meydana gelebilecek sızıntı veya arkı, izolator yüzeyinden ayırmak suretiyle izolatorün istenmeyen durumlara maruz kalmasına da engel olur.



Şekil 5.3: Ark Boynuzu.

Parafudrların çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir: Parafudrlar şebeke frekanslı gerilimlerde yüksek empedans değerlerine sahiptir. Öte yandan darbe akımlarıyla karşılaştıklarında empedans değerleri sıfıra oldukça yakındır. Yani parafudr terminalleri arasındaki gerilime göre değeri değişebilen dirençtir.

Parafudr, sistemdeki aşırı gerilimleri topraklayarak sistemde önceden planlanmış, kontrollü faz toprak arızası oluşturur. Bu hata sağlıklı çalışan bir parafudrdan oluştuğunda sistemde herhangi bir kesinti yaşanmaz [11].



Şekil 5.4: Ark Boynuzu Etrafında Oluşan Elektrik Alan Dağılımı.

5.2.2.2 Eklatörler

Orta gerilim şebekelerinde aşırı gerilimleri sınırlamak için kullanılan eklatörler üç gruba ayrılır. Bu gruplar şöyledir; koruma eklatörleri, direnç seviyesi aktivatörleri ve ark toplayıcı eklatörleridir. Eklatörler ayrıca fiziksel şekillerine göre de sınıflandırılır. Nötr topraklı ağlarda ejektörler, darbe geriliminde çalıştıktan hemen sonra oluşan endüstriyel frekans akımını çoğu zaman kesemez. Nötr noktası topraklanmayan şebekelerde bu akım büyük değerlere ulaşamayabilir ve eklatörler bu akımı söndürebilir. Eklatörler, uygun şekilde ayarlandığında trafo korumasını yeterli bir koruma sağlayabilir, eklatörler aynı zamanda parafudrlara yakın etki yaratabilir ve parafudrlara göre çok daha ucuzdur.

5.2.3 Parafudrlar

Bir aşırı gerilim saptırıcınının temel unsurları hızlı bir anahtar görevi gören kıvılcım aralığı ve doğrusal olmayan dirençtir. Parafudrlar genel olarak şuralarda kullanılır;

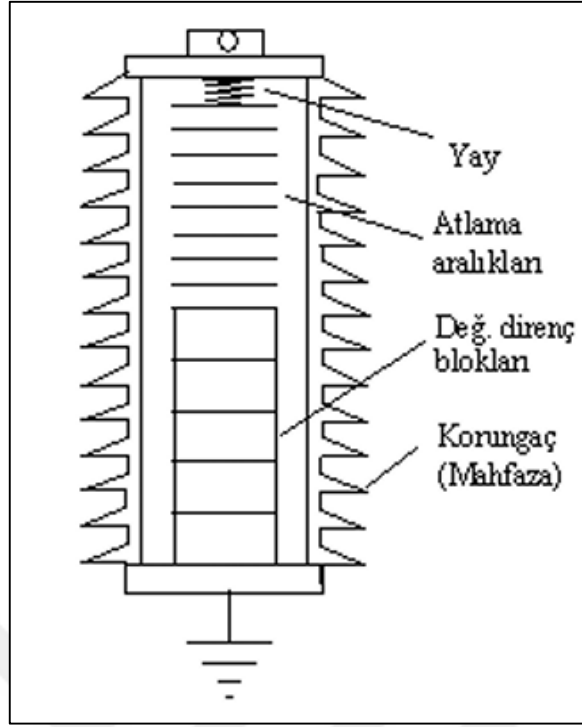
- Generatör çıkışları,
- Güç trafosu giriş çıkışları,
- Güç trafosunun tersiyer sargıları,

- d. Güç trafolarının yıldız noktaları(nötr direnci devresi),
- e. Enerji iletim hatlarının hat başı ve hat sonu,
- f. Yer altı kablo giriş çıkışları,
- g. Hat tıkaçları,

Parafudrlarda zorunlu olmamakla birlikte bazı ek fonksiyonları yerine getirmek için kullanılacak yardımcı elemanlar da bulunmaktadır. Bunlar parafudr ayırıcı, darbe sayacı, bağlantı elemanları, korona halkaları, miliampermetre gibi elemanlardır. Ayırıcı çoğunlukla dağıtım sistemi parafudrlarında (orta gerilim), toprak iletkenine seri olarak bağlanmak ve parafuduru sistemden ayırmak için kullanılabilir. Böylece arızalı parafudurun normal çalışma şartlarında kısa devre etkisi yapması engellenir. Ayırıcının toprak bağlantısı uygun uzunlukta esnek iletken ile yapılmalı ve parafudr yalıtkan bir destek ile sabitlenmelidir. Arıza durumunda ayırıcı 1 saniye veya daha kısa sürede açılacağından kesici veya sigorta açılmayacak ve bunun sonucunda tüketici enerjisiz kalmayacaktır. Bu süreçte parafudurun doğal olarak aşırı gerilimlere karşı koruma sağlaması beklenmemelidir. Bu nedenle ayırıcılı parafudrların belirli periyotlarda görsel olarak kontrol edilmesi ve ayırıcısı arızalı parafudrların değiştirilmesi gerekmektedir. Yüksek gerilim parafudrlarında korona halkalarının yanı sıra miliampermetre, darbe sayacı gibi elemanların kullanılması bazı önemli faydalar sağlar. Örneğin, 1 mA'ye ölçeklendirilmiş kararlı durum ampermetresi ile akımdaki artışın gözlemlenmesi, parafudrun termal arıza olasılığının tahmin edilmesine olanak sağlar. Ancak harmonik etkilerin ve yüzey kaçak akımlarının sorun yaratabileceği de dikkate alınmalıdır. Darbe sayacı belirli bir değerin üzerindeki akım darbelerini saymaya yani parafudrun çalışma sayısını göstermeye olanak sağlar [11].

5.2.3.1 Değişken dirençli parafudrlar

Bunlar artık üretilmeyen ve kullanılmayan parafudrlar olsa da yapılarından ve özelliklerinden kısaca bahsetmekte fayda var. Atlama aralıklı değişken dirençli parafudrlar genel olarak porselen bir kalkan (mahfaza) içine yerleştirilen seri atlama elektrotlarından ve bunlara seri olarak bağlanan değişken direnç bloklarından oluşur.



Şekil 5.5: Atlama Aralıklı Değişken Dirençli Parafudr Yapısı.

Atlama aralıklı değişken dirençli parafudrlar genel olarak porselen bir kalkan (mahfaza) içine yerleştirilen seri atlama elektrotlarından ve bunlara seri olarak bağlanan değişken direnç bloklarından oluşur.

Atlama elektrotları (seri ejektörler), katı yalıtkanlarla birbirinden yalıtılmış metal disklerdir. İşlevleri yalıtım seviyesini normal çalışma gerilimini de korumaktır; Aşırı gerilim durumunda iletimi sağlar, değişken dirençleri devreye alır. Atlama elektrotları darbe akımı üzerinden geçtikten sonra akı keser. Bu akım geçişleri sırasında elektrot yüzeylerinde ve destek izolatörlerinde herhangi bir bozulma olmamalıdır.

Değişken dirençler parafudrun aşırı gerilim sırasında küçük bir dirence, çalışma gerilimi sırasında ise büyük bir dirence sahip olmasını sağlar. Değişken dirençler öncelikle silisyum karbür (SiC) ve sodyum silikattan yapılıdır.

Kaolin gibi katkı maddeleri içeren bloklardan oluşurlar. Değişken dirençli parafudrların yapılarında bulunan atlama elektrotları aşırı gerilimlerde nispeten gecikmeli olarak çalışır. Ayrıca elektrotları (elektrotörleri) birbirinden desteklemek ve yalıtım için kullanılan katı yalıtım malzemeleri kirlenmeye karşı çok hassastır ve kolaylıkla işlevlerini

kaybedebilmektedir. Darbe akımının geçmesinden sonra art akımın kesilmesi (ark söndürme) akımın sıfırdan geçmesine bağlı olduğundan, çalışma süreleri 10 milisaniye kadar çıkabilmektedir. Buna bağlı olarak atlama boşlukları ve aralarındaki yalıtım malzemeleri hızla bozulabilir. Bu nedenlerden dolayı değişken dirençli parafudrların güvenilirliği son derece düşüktür. Metal oksit parafudr teknolojisinin gelişmesi ve maliyetlerin düşmesi nedeniyle bypass aralıklı değişken dirençli parafudrlar artık kullanılmamaktadır [11].

5.2.3.2 SiC parafudr

Bu parafudrların direnç diskleri silisyum karbür, sodyum silikat veya kaolin gibi katkı maddelerinin basınç altında sıkıştırılıp 1300 ile 14000 derece sıcaklıklarda pişirilerek elde edilir. Bu disklerin direnci gerilimle ters orantılı olarak değer değiştirirler. Parafuduru oluşturan bu elemanlar kullanılacağı gerilime bağlı olarak sayıları değişir. Bu elemanlarda normal şebeke geriliminde atlama meydana gelmez Hava aralıklı ark elemanları kullanılacağı gerilime göre sayıları değişir.

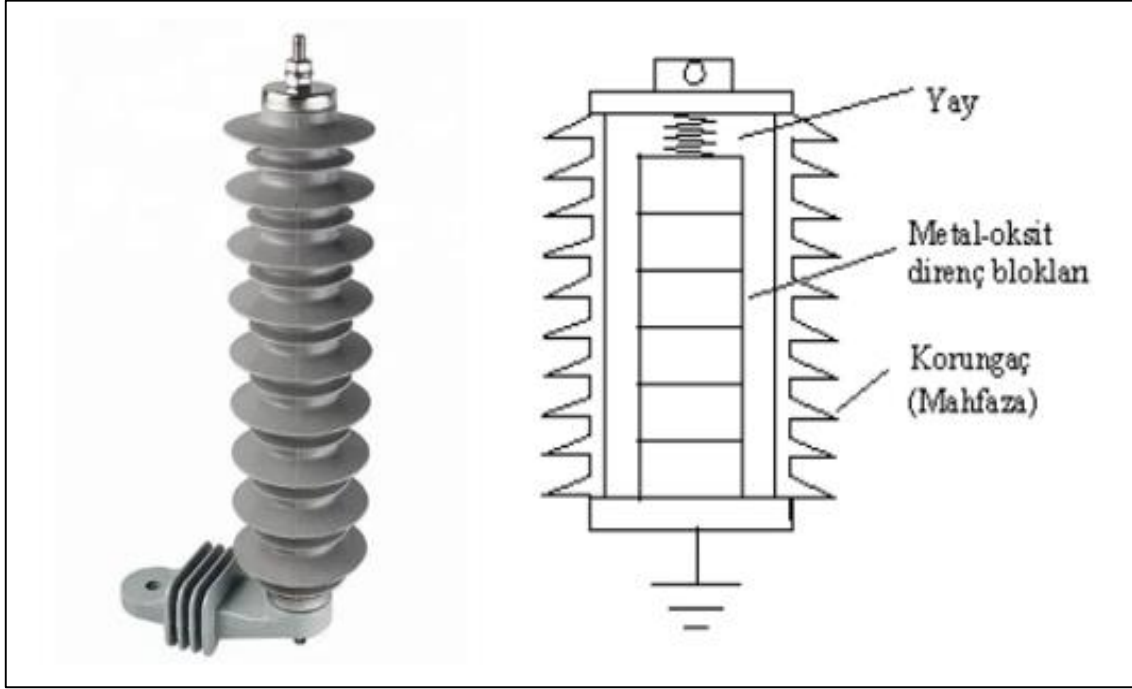
Aşırı gerilim geçişlerinden korunmak için parafudrlar bir transformatör üzerine monte edilir. Transformatöre girmeden hemen önce her faz iletkenine bir parafudr bağlanır. Parafudr topraklanmıştır, bu nedenle geçici aşırı gerilimden kaynaklanan enerji için toprağa düşük empedanslı bir yol sağlar. Normal çalışma gerilimlerinde parafudr, faz iletkenini topraktan izole ederek yalıtkan görevi görmelidir. Bu zıt özellikler tipik olarak farklı gerilimlerde farklı dirençlere sahip bir Varistör (MOV tutucu) kullanılarak elde edilir.

Parafudrların iki ana stili vardır. Günümüzde sadece metal oksit-çinko oksit (ZnO) ve varistörlü (MOV) parafudrlar kullanılmaktadır. Daha eski tip silisyum karbür boşluk tutucudur ve bugün hala hizmette olan çok sayıda tutucu bulunmaktadır. Ancak unutulmamalıdır ki, yaşları nedeniyle 25 yaşını geçmiş olan aralıklı parafudrların değiştirilmesi tavsiye edilir; öte yandan, nem girme eğilimleri nedeniyle silisyum karbür boşluk tutucularının 13 yıl sonra değiştirilmesi konusunda daha katı bir politika önerilmektedir.

5.2.3.3 Metal oksit parafudr

Metal oksit parafudrlar, yapısında atlama boşluğu bulunmayan bir kalkan (mahfaza) içine yerleştirilmiş, temel olarak çinko oksit (ZnO) içeren direnç bloklarından oluşur. Bazen

boşalmasız metal oksit parafudrları olarak da anılırlar. Yapılarında atlama boşluklarının bulunmaması, bunlara bağlı yapısal ve elektriksel sorunları büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Aynı zamanda kirlenmeden etkilenmezler, bu da kirli ortamlarda kullanımda avantaj sağlar. Yapısında direnç elemanı olarak metal oksit kullanılır. Söz konusu bu kimyasal bileşene Çinko Oksit (ZnO), Bizmut Oksit (Bi₂O₂), Mangan Oksit (MnO₂), Antimon Oksit (Sb₂O₃) ve benzeri gibi metal oksitleri barındırmaktadır.

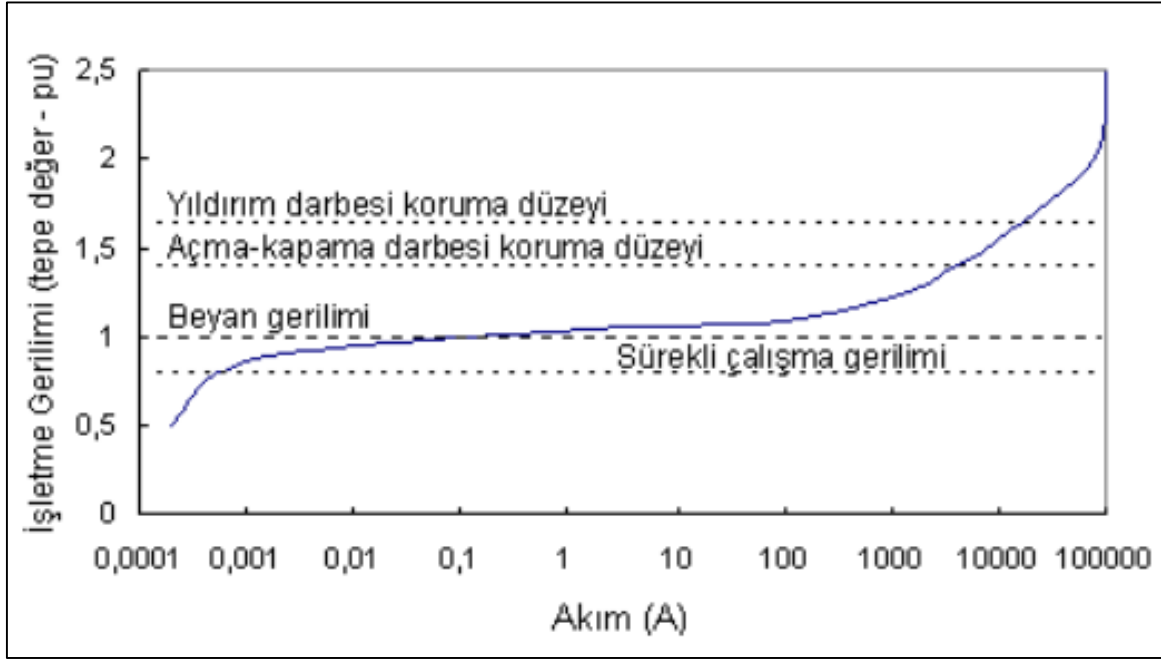


Şekil 5.6: Metal Oksit Parafudr ve Yapısı.

Metal oksit direncinin akım-gerilim karakteristiği silisyum karbür direncinin karakteristiğinden daha düzdür. Metal oksit parafudrlar sürekli devrede olduğundan normal çalışma şartlarında içlerinden yaklaşık 1 mA'den daha az küçük bir akım geçirirler. Seri toplayıcı içermediklerinden performansları ve güvenilirlikleri oldukça yüksektir. Hızlı çalışırlar ve darbe akımının geçmesinden sonra arkın sönmesi akımın sıfır geçişine bağlı değildir. Günümüzde metal oksit parafudrlarda porselen koruyucu (kasa) yerine polimer gövde kullanılması tercih edilmektedir. Polimer gövdeli parafudrlarda metal oksit rezistans blokları cam elyaf takviyeli polyster ile birleştirilir ve bu yapının üzerine polimer kılıf yerleştirilir. Ancak polimer kılıfın boşluk bırakmayacak ve sızdırmazlığı sağlayacak şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Polimer gövde parafudrların hafif olmasını, mekanik

darbelere karşı dayanıklı olmasını ve boyutlarının küçülmesini sağlar. Bu özellikleri ve kurulum kolaylığı önemli bir avantajdır[11].

Metal oksit parafudr, 30/80 μ s özellikleri IEC 60060 – 1 standartları kullanılarak doğrusal olmayan bir direnç olarak temsil edilir. Parafudrun kriterleri 0,5 kA, 1 kA ve 2 kA'dır [27].



Şekil 5.7: Metal Oksit Parafudrda Sembolik Akım- Gerilim Karakteristiği.

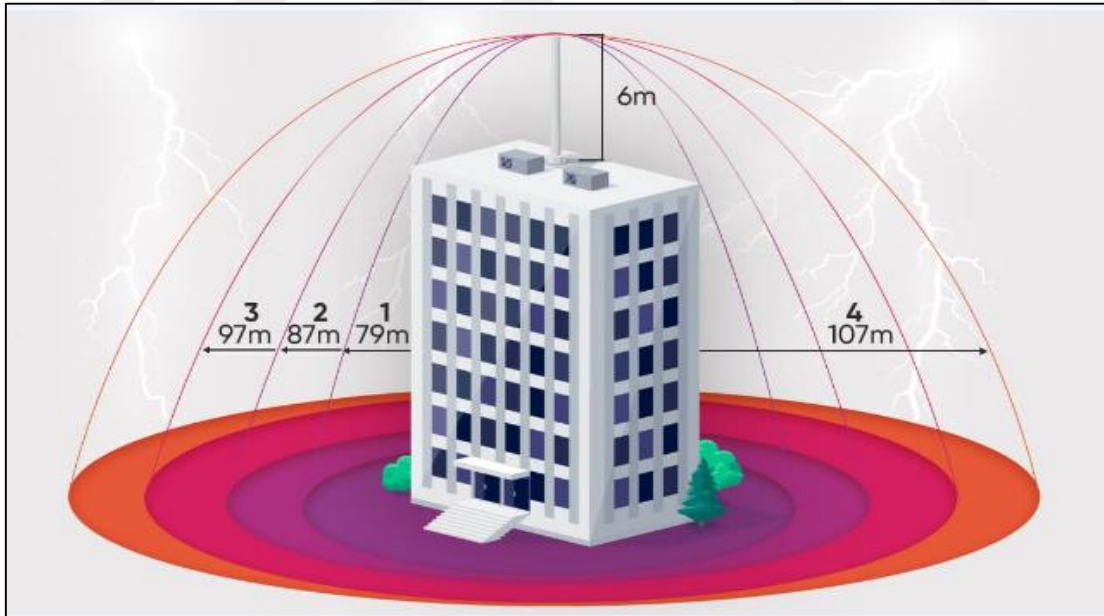
Güç sistemlerinde kullanılan cihazların sistemde oluşabilecek tüm aşırı gerilimlere dayanacak şekilde tasarlanıp uygulanması teknik ve ekonomik açıdan mümkün değildir. Günümüzde yüksek gerilim sistemlerinde oluşan açma-kapama aşırı gerilimlerini sınırlamak amacıyla metal oksit parafudrların kullanılması tercih edilmektedir. Orta gerilim sistemlerinde yıldırımdan kaynaklanan dış aşırı gerilimlere karşı koruma sağlamak için metal oksit parafudrların kullanılması uygun görünmektedir. Dağıtım transformatörlerinin alçak gerilim tarafından gelebilecek aşırı gerilimlere karşı da korunması gerektiği dikkate alınmalıdır.

5.2.4 Paratonerler

Paratonerler, elektrik güç sistemlerindeki aşırı gerilimlere karşı korumada kullanılan cihazlardır. Paratonerler, aktif paratonerler ve pasif paratonerler olmak üzere ikiye

ayrılmaktadır. Paratoner, yıldırım düşme risklerini önleyen bir çeşit topraklama sistemidir. İstenmeyen elektrik yüklerini hem kontrollü hem de güvenli bir sistem içerisinde toprağa doğru gönderen bir ekipmandır. Başta yüksek yapılar olmak üzere; gemilerde, sanayi tesislerinde ve hava elektrik akımı tarafından hasar alma ihtimali bulunan yükseltilerde kullanılır. Paratoner, atmosferin şartlarına bağlı olarak manyetik alanda açığa çıkan yüksek akımlı elektrik enerjisinden kaynaklanabilecek tehlikeleri minimize edererek bu konuda yüksek güvenlik sağlar. Akım yakalayıcı ekipmanlar; yıldırım düşmesi ya da çarpması şeklinde ifade edilen kuvvetli elektrik akımının, güvenli koşullarda yeryüzüne inmesini sağlar. Yıldırım düşmesi sonucu binalarda, tesislerde ya da fabrikalarda bulunan çeşitli elektrikli eşyaların, elektrik panolarının veya santrallerin kısa devre yapma olasılığı oldukça fazladır. Söz konusu olumsuzluklar yaşanmadan önce devreye giren topraklama sistemi yangın, hasar, ölüm risklerine karşı hem insanları hem de ekipmanları, yıldırımın zararlarından korumaya yarar.

Ülkemizde içinde bulunduğu Avrupa-Asya kuşağında akım değeri, 5 kA ile 25 kA arasında amper mertebelerine ulaşan seviyelerde yıldırımlar oluşmaktadır. Yıldırımların kentsel bölgelerde oldukça yıkıcı zararları olur [28].



Şekil 5.8: Paratoner Entegreli Yapı [29].

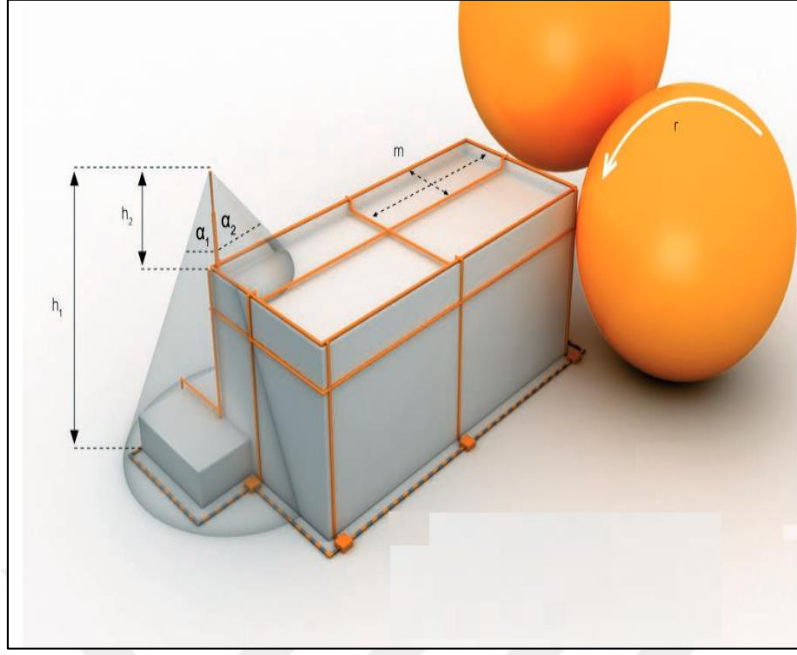
5.2.5 Aktif Paratonerler

Aktif paratonerlerin kullanım amacı yıldırımı çekerek daha güvenli koruma sağlamaktır. Koruma tekniğinde hava iletken hale getirilerek paratonerin sivri ucundan yıldırım yakalanır.



Şekil 5.9: Aktif Paratoner Tipleri [30].

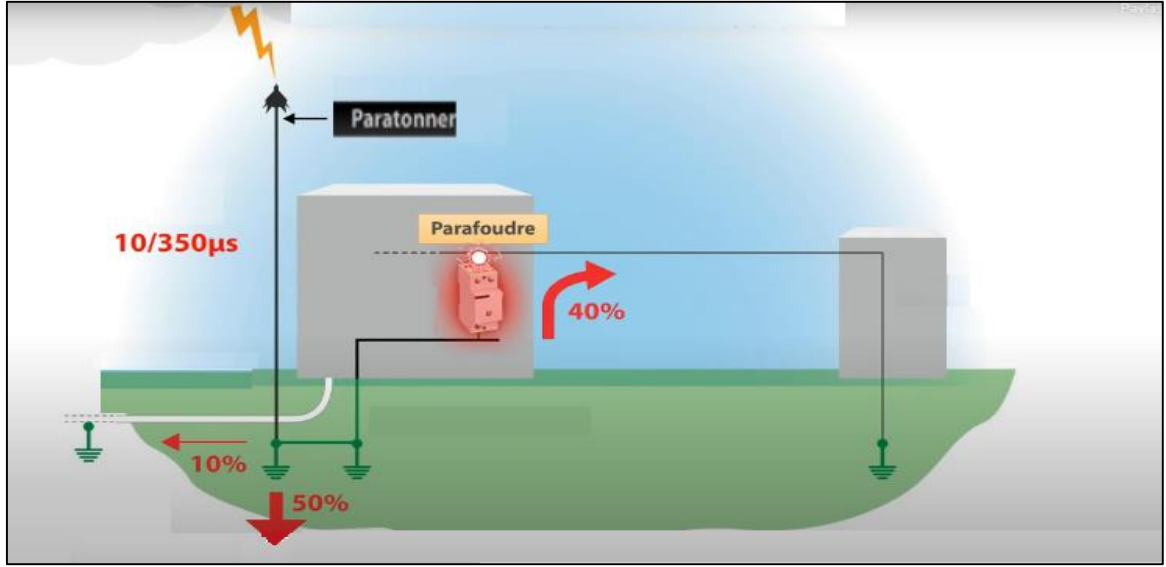
Aktif paratonerler takıldıkları yerden belli bir koruma çapı sağlarlar. Aktif paratonerler IEC 62305 standardında yer almamakla birlikte yerel bir standart olan NFC 17 – 102 Fransız yıldırımdan korunma standardında yer almaktadır. Aktif paratonerler iyon yayarak yıldırımı çekerek çalışma performansı sergilerler. Aktif paratonerler dairesel koruma sağlar. Aktif paratoner tesisatı temel olarak üç yapıdan oluşmaktadır. Bu üç temel yapı aktif paratoner başlığı, iniş iletkeni ve topraklamadır. Aktif paratoner yerleştirirken koruyacağı tesisin en üst kısmına yerleştirilir. Yine paratoner tesisatının çok iyi topraklanması gerekmektedir. Genellikle dikkate alınmayan şey paratoner iniş iletkenidir. Paratoner iniş iletkeni en kısa mesafeden S mesafesini bırakarak indirilmelidir. Bu tarz bir önlem alınmadığı takdirde yapılar için yangın riski oluşabilir [8].



Şekil 5.10: Dairesel Koruma Alanı [5].

Koruma alanlarında aktif paratoner kullanımı yanında elektriksel sistemleri korumak için parafudr kullanılması daha etkin bir koruma kalkanı oluşturmaktadır. Genel anlamda paratoner sadece fiziksel koruma yapar. Elektronik sistemlerin, panoların, kamera güvenlik sistemlerin, LED ve aydınlatma sistemlerinin vb. korunmasında parafudr kullanılmalıdır.

Yıldırım düşmesi ile birlikte 2 km'lik bir alanda etki eder ve yürüyen yıldırım darbeleri tesislere önelebilir. Öncelikle yıldırım ve yıldırım darbelerinden korunabilmek için B sınıfı parafudrlar kullanılması tavsiye edilmektedir.



Şekil 5.11: Paratonner ve Parafoudre Entegrasyonu.

Yapı içerisinde ana panoya yerleştirilecek uygun ürün yıldırım kaynaklı darbelerden yapıdaki elektronik donanımları ve sistemleri koruyacaktır. Genel olarak tesislerin en çok zarar gördüğü darbe yıldırım darbeleri değil; tesis içi oluşan ani aşırı gerilimlerdir.

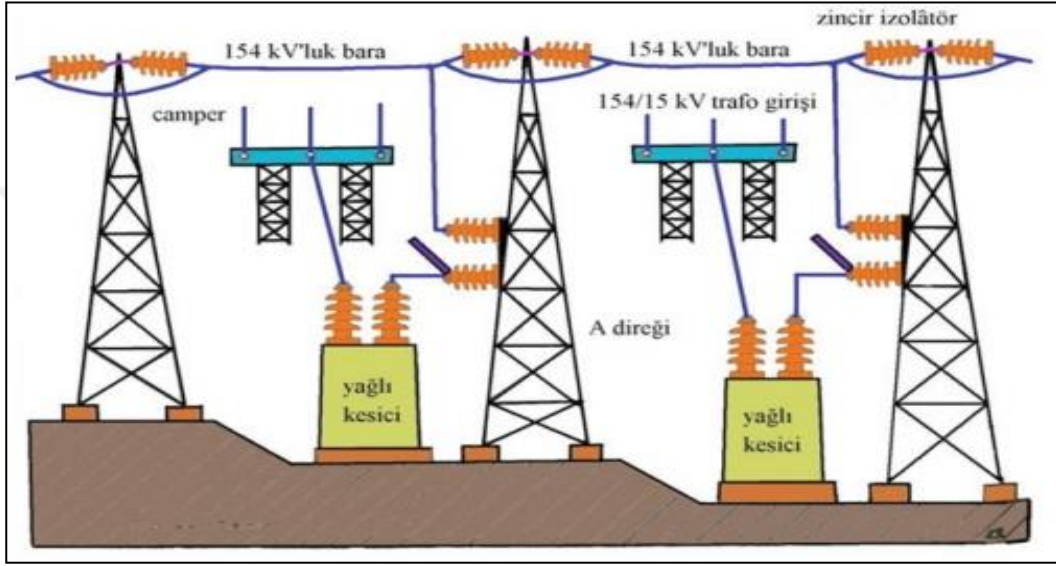
	Alman Standardı	Uluslararası Standart	Avrupa Standardı
Yıldırıma karşı koruyucu parafudur	B Sınıfı	Sınıf I	Tip 1
Aşırı gerilim sınırlayıcısı parafudur (Dağıtım panoları için)	C Sınıfı	Sınıf II	Tip 2
Aşırı gerilim sınırlayıcısı parafudur (Dağıtım kutuları için)	D Sınıfı	Sınıf III	Tip 3

Şekil 5.12: Parafudur Standartları[31].

Bu nedenle C sınıfı parafudrlar ile dahili aşırı gerilimlere karşı koruma sağlanmalıdır. Aynı şekilde otomasyon, PLC vb. hassas sistemler D sınıfı parafudrlarla korunmalıdır. B, C ve D sınıfı ürünler kullanılırken kademeli koruma sağlanmasına dikkat edilmelidir [32].

5.3 KORUNMUŞ BÖLGELERDEKİ İSTASYONLAR

Parafudr yakınındaki faz iletkenlerine doğrudan darbeler; saptırıcıda çok yüksek akımların akmasına neden olur ve boşalma gerilim ekonomik bir yalıtım tasarımına izin vermeyecek kadar yüksek olur. Hat empedans dalgalanmasının akım sınırlayıcı etkisini avantaja dönüştürmek için, önemli istasyonları direkler veya koruyucu tellerle dalgalanma darbelerine karşı korumak mecburidir.



Şekil 5.13: Ayırıcılar [33].

Dolayısıyla bahsedilen korunan bölge ile trafo merkezine gelen dalgalanmaların çoğu bu bölgenin dışından kaynaklanacaktır.

5.3.1 Gelen Gerilim Dalgalanmalarının Büyüklüğü ve Şekli

Atlamanın meydana geldiği kulede iletken üzerindeki gerilim darbe (strok) akımı ve topraklama kablolarının birleşik empedansı, iletken ve kule temel direnci ile belirlenir. İletim hattı üzerinden trafo merkezine doğru ilerleyen bu gerilim (V_T) hızla $(1 - K) V_T$ 'ye zayıflatılır, koruyucu tel veya topraklama döngüsüyle bağlantı nedeniyle, daha fazla zayıflama distorsiyonuna maruz kalır. Bu maruz kalma durumu korunmuş bölgenin uzunluğuyla doğru orantılıdır. İstasyon girişindeki aşırı gerilim dalgası, bir gerilim değeri büyüklüğü varsayılarak tahmin edilebilir.

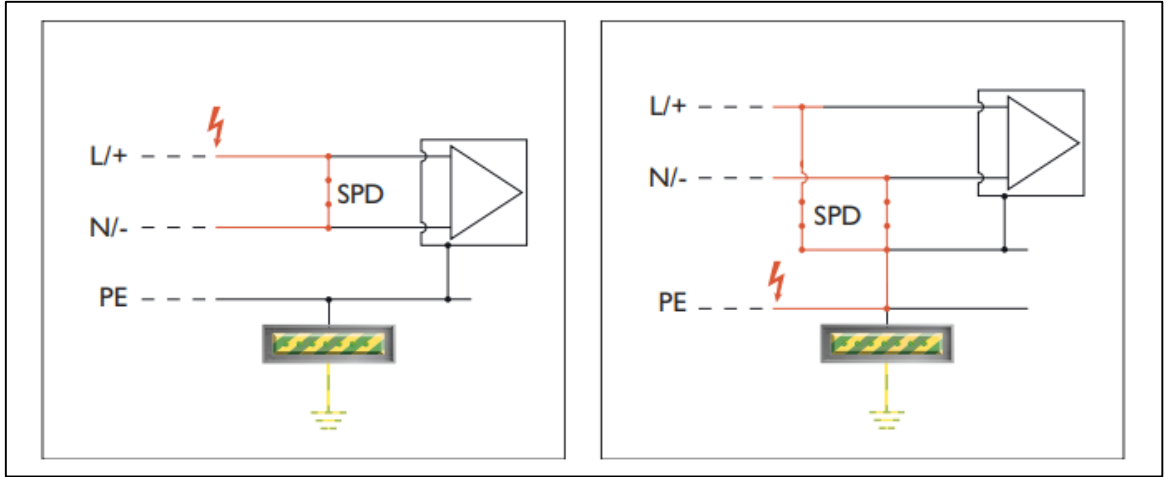
Atlamanın gerçekte olduğu kulede; iletken üzerindeki gerilim strok akımı ve topraklama kablolarının birleşik empedansı, iletken ve kule temel direnci ile belirlenir.

Korunan bölge içerisinde herhangi bir geri tepme olasılığının meydana gelebileceği göz ardı edilemez. Böyle nadir bir durum için daha şiddetli bir dalgalanma riski ve güvenlik sınırını bir miktar aşan durumun tolere edilebilirliğinin kabul edilmesi gerekir. Bunun meydana gelme olasılığı, korunan bölgenin geri tepme oranına ve uzunluğuna bağlıdır. Örneğin n adet hatlı bir istasyon için bu olasılık, her hattın korunan bölgesinin bir n'e düşürülmesiyle sabit tutulabilir. Gelen dalganın maksimum dikliği, daha kısa hareket nedeniyle artar, ancak burada diklik ve büyüklük, (n-1) paralel çizgilerin daha düşük dalgalanma empedansı ile azaltılır [25].

5.3.2 Parafudr Gerilimi ve Koruma Seviyesi

Nominal saptırıcı gerilim normalde daha az olmayacak şekilde seçilir, kurulum noktasında toprağa geçici aşırı gerilimden daha fazla nominal saptırıcı gerilimi normalde, belirli bir tip ve seçilen nominal gerilim sahip aşırı gerilim saptırıcı markası için makul derecede muhtemel herhangi bir hatalı veya anormal çalışma koşulu altında kurulum noktasında toprağa geçici aşırı gerilimden daha az olmayacak şekilde seçilir. Basitleştirilmiş hesaplamalar için, koruyucu seviye aşağıdaki gerilimlerin en yükseği olarak alınır.

Parafudr koruma seviyesinde önemli bir nokta nötr koruması olmayan parafudrlarda faz hattında meydana gelen bir darbe akımı parafudrun içerdiği teknoloji ile faz-nötr arasının kısa devre gibi davranması ile nötr üzerinden şebekeye geri döner, fakat nötr toprak korumasına sahip parafudrlarda ise aşırı akım toprağa akarak daha güvenli bir koruma sağlanmış olur.



Şekil 5.14: Nötr Korumalı ve Korumasız Parafudr Bağlantısı [34].

MOV (metal oksit varistör), doğrusal olmayan direnç özelliğine sahip varistör olarak doğrusal olmayan bir devre elemanıdır. Sistemin gerilimi değiştikçe varistörün direnci de değişir ve içinden geçen akımı kontrol etme görevini yerine getirir. Yani varistörün gerilim kontrollü devre elemanı olarak tanımı da zaman zaman kullanılmaktadır. Varistör gerilimi olarak belirtilen gerilim; gerilim seviyesinin altında yüksek direnç göstererek açık devre gibi davranır ve içinden akımın geçmesine izin vermez ancak sistem gerilimi varistör gerilimini aştığında kısa devre gibi davranır ve tüm akımı içinden geçirir.

TİP B	Sp1-b100,sp4-b100
Maks. Çalışma gerilimi (Uc)	255V
Yıldırım darbe akımı (10/350µs) (Iimp)	50kA
Yıldırım darbe akımı (10/350µs) [L1+L2+L3+N-PE] (I _{test})	200kA
Nominal deşarj akımı (8/20µs)(I _n)	100kA
Gerilim koruma seviyesi [L-N]/[N-PE] (Up)	2,5kV
Kutup sayısı	1-4
Tepki süresi	25ns
Çalışma sıcaklığı(paralel/seri)	-40...+80°C / -40...+60°C
Koruma sınıfı	IP20
Teknoloji	Spark Gap (Grafit)

TİP C	Sp1-c040,sp2-c040,sp3-c040,sp4-c040
Maks. Çalışma gerilimi (Uc)	275
Gerilim koruma seviyesi (Up)	1,4kV
Nominal deşarj akımı (8/20µs)(I _n)	20kA
Maksimum deşarj akımı(8/20µs)(I _{max})	40kA
Kutup Sayısı	1-2-3-4
Tepki süresi	25ns
Çalışma sıcaklığı(paralel/seri)	-40...+80°C
Koruma sınıfı	IP20
Teknoloji	MOV(faz-toprak) GDT(toprak-nötr)

TİP B+C	Sp4-BC050
Maks. Çalışma gerilimi (Uc)	385
Gerilim koruma seviyesi (Up)	1,6kV
Nominal deşarj akımı (8/20µs)(I _n)	50kA
Maksimum deşarj akımı(8/20µs)(I _{max})	50kA
Yıldırım darbe akımı(10/350µs) (Iimp)	12,5kA
Tepki süresi	25ns
Çalışma sıcaklığı(paralel/seri)	-40...+80°C
Koruma sınıfı	IP20
Teknoloji	MOV(faz-toprak) GDT(toprak-nötr)

TİP D	Sp1-D005
Maks. Çalışma gerilimi (Uc)	275
Gerilim koruma seviyesi (Up)	1kV
Nominal deşarj akımı (8/20µs)(I _n)	3kA
Maksimum deşarj akımı(8/20µs)(I _{max})	5kA
Tepki süresi	25ns
Çalışma sıcaklığı(paralel/seri)	-40...+80°C
Koruma sınıfı	IP20
Teknoloji	

Şekil 5.15: Parafudr Tipleri [34].

5.3.3 Ekipman Yalıtım Seviyesi

Dik cepheli dalgalar için trafo merkezinin farklı noktalarındaki gerilimler, saptırıcı konumuna olan mesafeye, dalga cephesinin dikliğine ve istasyonun elektriksel parametrelerine bağlı olarak koruma seviyesini belirli miktarlarda aşmaktadır. Bu nedenle bir sonraki aşamada, toplam maliyeti optimize edecek yönlendiricilerin sayısına ve konumlarına karar vermektir.

Orta düzeyde fiziksel boyutlara sahip trafo merkezlerinde, makul bir konum seçimi, yönlendiricilerin sayısını minimumda tutabilir. Daha yüksek gerilim aralığında, transformatörü akım kesintisinden kaynaklanan aşırı gerilimlerden korumak için transformatör ile devre kesici arasında saptırıcıların takılması olağandır. Transformatöre en yakın konum, transformatör yalıtımının yüksek maliyeti nedeniyle en iyi ekonomi olanağını sunar.

Temel yıldırım yalıtım seviyesi (BIL-The basic lightning insulation level) genellikle şu şekilde belirlenir. Gerilim saptırıcı parafudr ve ardından standart değerler listesinden bir

sonraki en yüksek değeri seçilerek koruma seviyesine sadece %25 – 30 gibi bir marj eklemek yeterlidir. Bu kaba ve hazır yaklaşım, küçük öneme sahip istasyonlar için kabul edilebilir fakat daha büyük ve önemli istasyonlarda mesafe etkisinin daha doğru bir şekilde sağlanması gerekir.

Ekstra yüksek gerilim tesisatları, izolasyon seviyelerinin seçiminde optimum çözüm aranıyorsa, özel bilgisayar çalışmaları gerektirir. Elde edilen doğruluk derecesine bağlı olarak daha küçük veya daha büyük bir güvenlik marjı eklenmelidir. Ekipmanın yalıtım kalitesinin ve/veya parafudr özelliğinin zamanla bozulma olasılığı için minimum %10'dur.

Gerilim saptırıcı parafudr; bir anahtarlama dalgalanma koruma seviyesi oluşturmak için kullanıldığında, marj genellikle yalnızca %15 'tir. Ön dikliğin düşük olması nedeniyle mesafe etkisi ihmal edilebilir. Sadece 50 µs'lik bir cephe 15 km uzunluğundadır.

5.3.4 Mesafe Etkisi

İlk yaklaşım olarak, daha karmaşık bir trafo merkezinin acil durumunu temsil edebilecek devre kesici, parafudr ve transformatörden oluşan basit bir hat içi düzenlemenin çeşitli noktalarındaki gerilimlerin incelenmesi ilk etapta kolaylık sağlayacaktır. Söz konusu transformatör için bir açık devre modellemesi tasarlanır. Tüm kapasitanslar ihmal edilir, parafudr ise aşırı gerilim önleyici dalganın kaynağı olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılır.

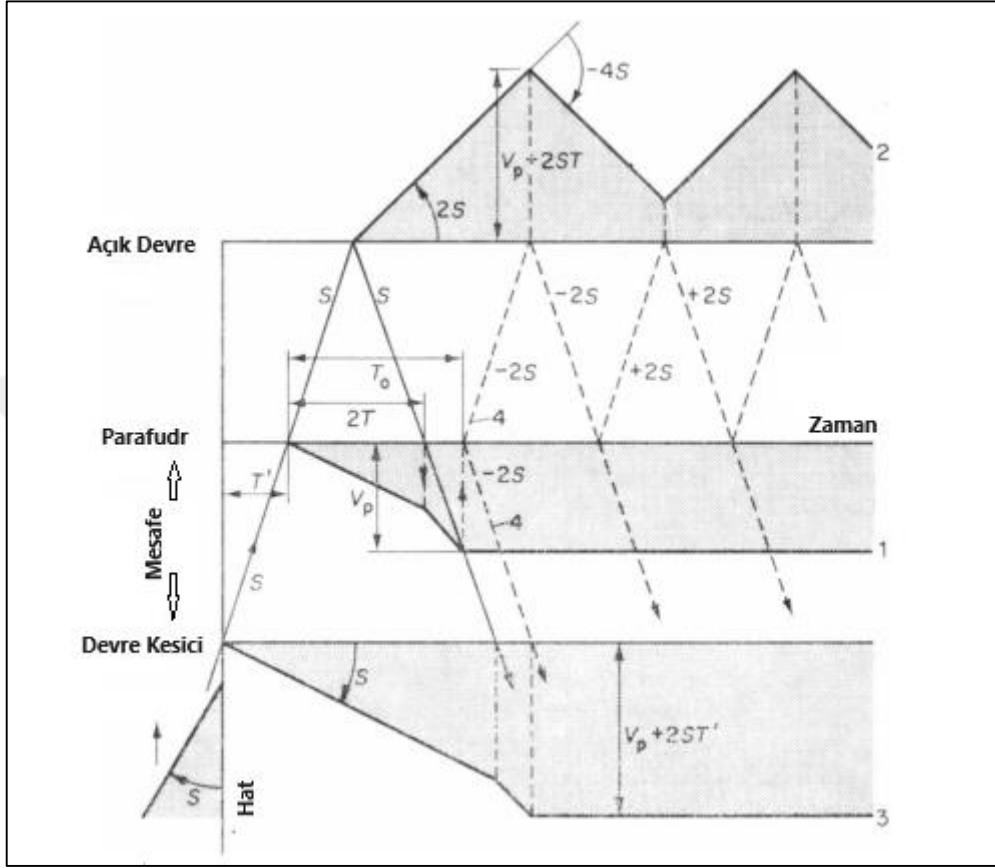
Hat üzerinde herhangi bir konumda ve parafudurdan herhangi bir mesafe uzaklıkta bulunan nesne üzerinde oluşan maksimum gerilim

$$V(D) = V_p + 2ST \quad (5.1)$$

Burada;

$$T = \frac{D}{u} \quad (5.2)$$

olup parafudr ve nesne arasında gerilimin varış süresidir. V_p ise dayanım katsayısını temsil etmektedir. Gelen gerilimin dalgasının tepe noktasından bağımsız olarak $V(D)$ değeri ise $2V_p$ değerini geçmemektedir.



Şekil 5.16: Kafes Diyagramı Aracılığıyla Tek hatlı, Tek Trafolu İstasyonlarda Aşırı Gerilim.

Şekil 5.13'te yer alan diyagramda 1,2,3 ve 4 olarak numaralandırılıp gösterilen şekillerin tanımları şu şekildedir;

Bir numaralı eğri parafudr gerilimini; iki numaralı eğri açık devre olarak gösterilen transformatördeki gerilim, üç numaralı eğri devre kesicideki gerilimi, dört numaralı eğri ise parafudr tarafından gönderilen gerilim önleyici dalgayı temsil etmektedir.

Zaman sabiti olarak karşımıza çıkan $C_{eff}Z_0$ değeri ise $0.2 \mu s$ ile $2 \mu s$ arasında değer alabilir [25].

5.4 ANORMAL ANAHTARLAMA AŞIRI GERİLİMLERİ

Güç sistemlerinde normal işletme prosedürünün bir parçası olarak devrelerin anahtarlama ve arızaların temizlenmesi işlemi kesiciler vasıtasıyla yapılır. Daha önceki araştırmalar ve bir IEE çalışması kesiciler konusunu genişçe ele almıştır. Bir kesici vasıtasıyla bir devredeki akımın kesilmesi, normalde AC dalganın bir akım sıfırı noktasında (current zero) olur ve kesicinin kontakları arasında bir gerilim görülmesiyle sonuçlanır. Bu gerilim bir geçici bileşeni içerir. Bu geçici bileşen geçici toparlanma gerilimi (Transient Recovery Voltage, TRV) olarak bilinir ve düşük güç faktörlü devreler için bu geçici bileşen, sistem nominal geriliminden daha yüksek değerlere ulaşabilir. Geçici toparlanma geriliminin pik değeri ve bu pikin artış oranı kesici performansına tesir eder.

5.4.1 Kapasitif Anahtarlama

Kapasitif akımın kesilmesi bir iletim hattını veya bir kapasitör bankının bir bölümünü ilgilendirdiğinde, ark söndürülmesi olayı akım sıfırında meydana gelir ve tek fazlı bir durum için Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, kapasitör ve hat üzerinde tutulan bir şarj gerilimi (trapped charge voltage) kalır. Bu tutulan şarj gerilimi genlik olarak kaynak geriliminin V pik değerine eşittir. Bundan dolayı kesici üzerinde ilk anda görülecek gerilim nispeten küçüktür. Bu sebeple kesilmenin gerçekleşmesi için şartlar müsait olduğundan, ark söndürülmesi kontakların ayrılmasından sonraki ilk akım sıfırında meydana gelir. Kaynak tarafındaki gerilim güç frekansında değişim göstermektedir. Bu sebeple, kesici üzerindeki gerilim, kesilme işleminden sonraki ilk yarım periyoda kadar sinüsoidal olarak oluşur (Bu gerilim $2V$ değerine ulaşır). Başarılı bir kesilmenin oluşması için, kontaklar arasındaki aralığın $2V$ 'ye dayanması gereklidir. Bu gerilim, kaynak geriliminin pik değerinin iki katı olan, ark söndürülmesinden sonraki ilk yarım periyotluk gerilimdir. Eğer kontaklar arasındaki mesafe kontaklar arasındaki gerilime dayanmazsa bir tekrar tutuşma (restrike) oluşacaktır. Bunun ark söndürülmesinden bir yarım periyot sonra olduğu varsayılırsa, kontaklar arasındaki gerilim $2V$ 'lik bir değerden hemen sonra sıfıra düşecektir. Bu durum, sistem endüktansı içindeki kapasitörde tutulan şarj geriliminin boşalması ile olmaktadır. Kapasitördeki gerilim, sistemin kapasitesi ve endüktansı ile frekansı belirlenen bir osilasyon oluşturarak kaynak tarafındaki gerilime ulaşmaya çalışır [17].

5.4.2 Akım Koparma

Kesici arkının yeniden tutuşması, güç frekanslı akım üzerine bindirilen bir geçici akımın akmasına ve böylece kesiciden geçen toplam akımın sıfıra düşmesine sebep olabilir. Sonuç olarak kesici, güç frekanslı akım sıfırından önce kesme yapabilir ve eğer yük devresi endüktif karakterli ise, yükte kesme olayı sanki güç frekanslı akım koparılmış gibi meydana gelir. Bu olay akım kopması olarak bilinir. Daha çok orta gerilim motorları ve ark fırını transformatörlerinin anahtarlanması için sıklıkla kullanılan vakum kesicilerin bulunduğu endüstriyel tip sistemlerde meydana gelir. Vakum kesiciler bakım gerektirmeksizin pek çok sayıda kesmeye maruz kalma kabiliyetlerinden dolayı bu tür uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Fakat yüksek kesme kapasitelerinden dolayı bir yüksek frekanslı akım sıfırında yeniden bir tutuşmanın sonucu olarak, akan akımı kesebilirler.

Bu olay tam anlamıyla bir akım kopması değildir ve terminallerinde toprağa göre bazı kapasitelerin mevcut olduğu, endüktif yükün kesildiği bir devrede meydana gelebilir. Bu kapasite, kısa uzunluktaki bir kablonun kapasitesi veya bir darbe kapasitesi olabilir. Eğer yük akımı kesiliyorsa, anahtarın her üç fazının kontakları da ayrıldığında ark meydana gelir. Akım sıfırı ilk olarak bir fazda oluşacak ve kesme işlemi yapılacaktır. Eğer bu faz, meydana gelen toparlanma gerilimine karşı dayanamazsa, kontak aralığının küçük olmasından dolayı tekrar tutuşma olayı oluşacak ve yüksek frekanslı bir geçici akım meydana gelecektir. Bu akım, yeniden tutuşmuş olan fazda güç frekanslı akıma bildirilir ve nötr bağlantısı ile diğer iki faz üzerinden devresini tamamlar. Sonuç olarak, yüksek frekanslı akım sıfırları her üç fazda da görülebilir. Bundan dolayı hakiki akım kopması sadece yeniden tutuşmanın olduğu faz ile sınırlı değildir, diğer iki fazda da meydana gelebilir. Bu tür kesmeler, tekrarlı yeniden tutuşmalara ve gerilim yükselmesine sebep olabilir. Literatürde tartışıldığı üzere akım kopması, devre parametrelerinin değerlerine ve devrenin konfigürasyonuna bağlıdır [35].

5.4.3 Küçük Endüktif Akımların Kesilmesi

Bir kesicide akım kesilmesi olayı daima bir tabii akım sıfırında meydana gelmez. Kesici; transformatörleri, şönt reaktörleri ve motorları tekrar enerjilendirmek için kullanıldığında kesilen akım, kesicinin kesmeye muktedir olduğu arıza akımıyla karşılaştırıldığında çok

küçük olabilir. Arkın sönmesi ve akımın hemen sıfıra dönmesi muhtemel sonucu ile kesici arkında kararsızlık meydana gelebilir. Akım kopması (current chopping) olarak bilinen bu olay, ani olarak azalan bir akımda doğal olarak oluşacaktır. Akım kopmasının tabii akım sıfırından önce oluşması ihtimali, tabii akım sıfırından sonra oluşması ihtimaline göre çok daha yüksektir.

Kesicideki akım, akım kopması ile sıfıra zorlanmasına rağmen, endüktif yükteki akım hemen değişmez ve yükün terminallerinde mevcut olan herhangi bir kapasite. (kaçak kapasite veya başka türlü bir kapasite) içinden akmaya devam eder. Endüktif yükteki bu akım, terminallerde (kapasiteden dolayı) elektrostatik enerjiye dönüştürülen manyetik enerjiyi temsil eder. Eğer kapasite küçükse bu dönüştürme tarzı, terminallerde görülen bir aşırı gerilimle sonuçlanır. Olay bütün endüktanslı yükler, özellikle boşta çalışan transformatörler için önemlidir. Şebekelerde yalıtım düzenlemesi ve işletme güvenliği bakımından geçici aşırı gerilimlerin çok iyi bilinmesi gerektiğinden, küçük endüktanslı akımları açmada oluşan geçici aşırı gerilimler kuramsal ve deneysel olarak eskiden beri incelenmiştir. Bu incelemeleri kolaylaştırmak için özel bilgisayar programları da geliştirilmiştir. Küçük endüktanslı akımları açmada geçici aşırı gerilimler aşağıda önce teorik açıklamaya elverişli basit bir yaklaşımla, sonra uygulamaya yönelik yaklaşımlarla incelenmektedir.

6. BÖLÜM

6.1 HABERLEŞME MERKEZ İSTASYONU İÇİN YILDIRIMA KARŞI KORUMA TASARIMI ÇALIŞMASI

Bu bölümde aşağıdaki prosedür özetlenmektedir: Bir yıldırım çalışması, kullanılan yöntemler ve pratik sonuçları içermektedir. Genel hesaplama yöntemleriyle, gerekli metod ve analizler kullanılarak sistem modellemesi hesaplama varsayımları, deterministik simülasyonlar, istatistiksel yönler ve sonuçları içermektedir.

6.1.1 Koruma Taslağının Hazırlanması

Bir dizi ardışık ve tamamlayıcı hesaplama yapılır. İlk olarak deterministik hesaplamalar, tesisatın türü gibi bir dizi farklı parametreye bağlı olarak tesisatta mevcut gerilimleri değerlendirir. Haberleşme istasyonunun 1000'den fazla abonesi olup, 3 m yanında 30 m'lik anten kulesi bulunmaktadır. Öte yandan söz konusu haberleşme merkezinin yanında yapıyı ve diğer komşu oluşumları besleyen 1600 kVA gücünde 34,5/0,4 kV' luk trafo bulunmaktadır.

NFC 17 – 102 nolu standarda göre; yıldırımdan korunma tesislerinin topraklama direnç değeri tüm yönetmelik ve şartnamelerde maksimum 10 Ω ' dur. Aktif paratonerler koruyacağı alandan en az 2 metre kadar, yüksekte olmalıdır.

Paratoner topraklaması elektrik kablolarından en az 5 metre, ana topraklama sisteminden en az 20 metre, gaz borularından en az 5 metre uzakta olmalıdır yine NFC 17 – 102 nolu standarda göre belirlenmektedir.

TS EN 62305 nolu standardına uygun çerçevede; çabuk alev alıcı tesislerin üzerine yıldırımdan korunma tesisatı yapılmaz.

Binanın hacimsel ölçülerinden yola çıkarak, genişlik, boy ve yükseklik ölçülerinden eşdeğer toplam alanı şöyledir;

$$Ae = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \quad (6.1)$$

Formülüne göre; yapının boyutları şu şekilde olup;

$a = 35 \text{ m}$, $b = 25 \text{ m}$, $h = 20 \text{ m}$ yükseklik değerlerine sahip olduğundan 6.1'deki formül yardımıyla toplam alan;

$$A_e = (35 \times 25) + 6 \times 20(25 + 35) + (9 \times (3.14) \times 20^2) \\ = 19.379,00 \text{ m}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

Yapıya doğrudan yıldırım boşalmalarının sıklığı ise (6.2) deki denklemden yola çıkılarak hesaplandığında;

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_e \cdot 10^{-6} \quad (6.2)$$

N_d = Yılda yapıya doğrudan yıldırım boşalma sıklığı, (adet/yıl)

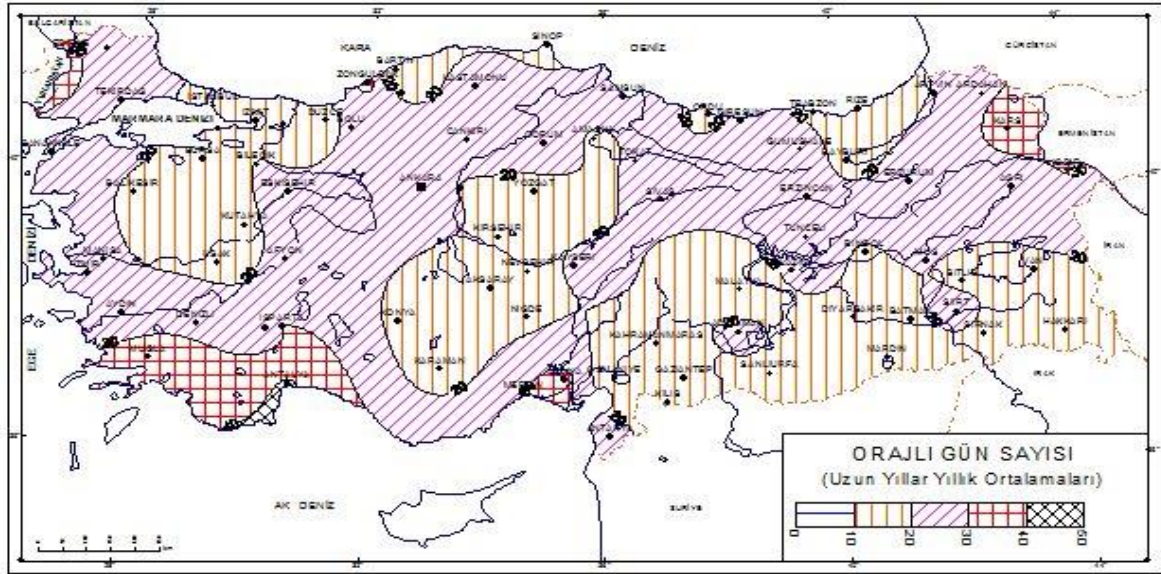
N_g = Toprağa yıldırım boşalma sıklığı,

C_e = Çevre faktörü,

A_e = Yapının m^2 bazında eşdeğer toplama alanı

Çevre Durumu	C_e = Çevre Faktörü
Yapının bulunduğu geniş bir alan içerisinde aynı veya daha yüksek yapıların veya cisimlerin bulunması Ör: Direk, kule, orman	0.25
Çevresinde küçük binalar bulunan yapı	0.5
Bağımsız (izole) yapılar, yapının 3h mesafedeki çevresi içinde herhangi bir yapının veya cisim bulunmaması durumu	1
Tepe üstlerinde bulunan yapı	2

Şekil 6.1: Çevre Durumu Faktörü.



Şekil 6.2: Türkiye Orajlı Gün Sayısı[36].

Çevre faktörü C_e haberleşme merkez istasyonu binası yanında anten kulesi bulunduğundan 0,25 ve T_d değeri meteoroloji haritasına göre 11 alındığında, sonuçlar şu şekilde hesaplanır;

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_e \cdot 10^{-6} \text{ bağıntısından;}$$

$$Nd = 11 \times 19.379 \times 0.25 \times 10^{-6} = 0,053 \text{ adet olarak bulunur.}$$

$$Nd = 0,053 \text{ adet/yıl olarak bulunur.}$$

Tablo 6.1 : Yapının İnşa Özellikleri ve Bağlı Özellikleri.

Duvarlarına yapılaşım tarzına ilişkin bileşeni	A_1
İletkenlikten süreklilikte halin barındırmanı prefabrikte yapı kısımlarına, çelik iskeleti veya elektriksel sürekliliği olan beton	14
Çatının yapılaşım tarzına ait bileşeni	A_2
Ahşapta	10.1
Çatının kaplamasının türüne ilişkin bileşeni	A_3
Kiremitte	11

Tablo 6.1: Yapının İnşa Özellikleri ve Bağlı Özellikleri (Devamı).

Çatıcı üzerindeki yapılara (baca vb.) ilişkin bileşeni	A ₄
Çatıcı üzerindeki elektrikli cihazların	10.2



Şekil 6.3: Yıldırımın İsabet Ettiği Varsayılan Yapı.

İnsanların kullanımı ile ilgili katsayı	B₁
Panik tehlikesi yok	1.0
Binanın içinin türü ile ilgili katsayı	B₂
Tutuşabilir.	0.2
Binanın içindeki eşyaların değerleri ile ilgili katsayı	B₃
Çok değerli donanım	0.01
Hasarın azaltılması için alınacak önlemlerle ilgili katsayı	B₄
Yangından korunma donanımı	5

Şekil 6.4: Yapının İşlevselliği veya Donatıları ile Alakalı Bileşenler.

Yapının içindekiler nedeniyle çevreye verilebilecek zararlar	C₁
<u>Orta</u>	0.5
Yapının içindekiler nedeniyle yapının önemli altyapı hizmetlerinin yok olması	C₂
Tamamen Kesilme	0.01
Diğer Zararlar	C₃
Yüksek	0.1

Şekil 6.5: Zararlar Sebebiyle Oluşan Bileşenler.

Ayrıca yapıya ait diğer detaylı teknik bileşenler faktörleri, yapının niteliği ve demirbaşları ilgili bileşenler ve zarar faktörlerinin bulunduğu detaylar Ek B’de verilmiştir.

Bir yapıya yıldırım boşalmalarının kabul edilen sıklığı N_c ; aşağıda verilen 6.3 numaralı formülle hesaplanır. İlgili değerler ise şöyledir;

A: Yapının yapılış tarzına (yapı türü, kullanılan malzeme) ilişkin bir bileşen

B: Yapının kullanımı ve içindeki eşyalarla ilgili bileşen

C: Zararlardan ileri gelen bileşen

İken;

$$N_c = A \cdot B \cdot C \quad (6.3)$$

ve

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \quad (6.4)$$

$$B = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot B_4 \quad (6.5)$$

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \quad (6.6)$$

- a. Bir yapıya doğrudan yıldırım boşalmalarının beklenen sıklığı N_d
- b. İncelenen yapı için kabul edilen boşalmaların yıllık ortalama sıklığı N_c

Hesaplamalar sonucu N_c değeri ile N_d değeri ile karşılaştırılmalıdır.

Bulunan değer neticesinde, Yıldırımdan koruma sistemi kısa adıyla YKS'nin gerekli olup olmadığı ve şayet zorunluluk arz etmekte ise yapılacak yapı koruma sisteminin özelliklerini detaylandırır.

$N_d \leq N_c$ ise; YKS zorunluluk arz etmez.

$N_d > N_c$ ise; etkinliği $E \geq 1 - (N_c / N_d)$ değer aralığını sağlayan bir YKS inşa edilip kurulup ve kurulan bu YKS, uygun muhafaza seviyesi YKS etkinlik değerlerine göre seçilmelidir. Yıldırım koruma sistemini tasarladığımız haberleşme merkezi istasyonun binanın genel durumuna bakıldığında ise yapınının

- a. Yapı betonarmedir dolayısıyla $A_1 = 4$ olur.
- b. İnşaat hasır demirleri ile elektriksel sürekliliği sağlanmış dolayısıyla $A_2 = 0,1$ değerine eşit olur;
- c. Yapının çatısı ahşap ve ilgili çatının üzeri ise alaturka tipli kiremitten oluşmaktadır, dolayısıyla $A_3 = 1$ değerine eşit olur.

d. Yapının yine çatısında çatı ile bütünleşik baca sistemi, yine aynı çatıda yapının soğutma cihazlarına ait olan ünitelerin haiz olduğu alt uzantıları bulunmaktadır, bu yüzden $A_4 = 0,2$ değerine eşit olur.

$$A = A_1 . A_2 . A_3 . A_4 \text{ ise } A = 4 . (0,1) . (0,2) . 1 = 0,08$$

e. Binanın kullanım tipi binanın barındırdığı demirbaşları seçerken ise; söz konusu betonarme konstrüksiyonda yangın algılama sisteminin bulunması $B_1 = 1,0$ değerini alır.

f. Merkezde personel sayısının kaosa sebep olacak sayıda olmaması; $B_2=0,2$ değerini alır.

g. Haberleşme teknik ekipman donanım ve yazılımların değeri baz alınır. Dolayısıyla $B_3=0,01$ değerini alır.

h. Bölgede yıldırımın merkezde bir zarar meydana getirmesi durumunda iletişim altyapısı devre dışı kalacağından dolayı hizmet tamamen ya da en iyi ihtimal ile kısmen sekteye uğrayabileceği için $B_4=5$ değerini alır. Sonuç itibarıyla

$$B = B_1 . B_2 . B_3 . B_4 \Rightarrow 1 . (0,01) . (0,2) . (5) = 0,01 \text{ değerini alır.}$$

Yapının içindekilerin çevreye verebileceği zararlar orta derecede kategorize edilmiş olması nedeniyle; $C_1= 0,5$ değerini alır

Yapının önem arz etmesi ve akabinde hizmette genel aksama ve kesinti $C_2 = 0,01$ değerini alır.

Kategorize edilmemiş diğer zararların oluşması $C_3 = 0,1$ değerini alır.

$$C = C_1 . C_2 . C_3 \Rightarrow (0,5) . (0,01) . (0,1) = 0,0005 \text{ olarak ayrı ayrı A, B ve C değerleri bulunur.}$$

Buradan N_c yani bir yapıya yıldırım isabet etmesi yani boşalmalarının kabul edilen sıklığı ise

$N_c = A.B.C$ ise buradan $N_c = (0,08).(0,01).(0,0005) = 4,0.10^{-7}$ adet / yıl olarak bulunur. Bir önceki hesaplamada N_d değerini yani yıllık yapıya doğrudan yıldırım boşalma sıklığını ise;

$$N_d = 11.(19.379).(0,25).(10^{-6}) = 5,3.10^{-7} \text{ olarak bulunur. Buradan;}$$

$N_d > N_c$ değer aralığında bulunması sebebiyle ayrıca;

$E \geq 1 - (N_c / N_d)$ olması gerektiği için bir yıldırımında koruma sistemi kurulması gerekmektedir.

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (6.7)$$

$E = 1 - (N_c / N_d)$ formülünden

$E = 1 - \left(\frac{4,0.10^{-7}}{5,3.10^{-7}}\right) = 0,245$ Etkinlik değeri, olarak bulunur. Aşağıda yer alan Şekil 6.6'da yer alan tabloda sistem için seviye 3 olarak belirlenen aralıktaki korumanın uygun olduğu görülmektedir.

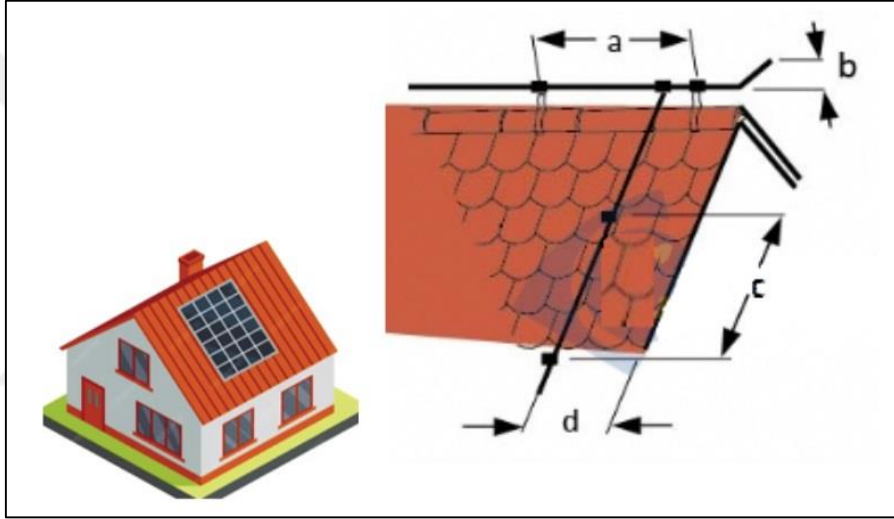
Etkinlik Değeri, E	Etkinlik Değeri, E
$E > 0,98$	Seviye1+Ek önlem
$0,95 < E \leq 0,98$	Seviye 1
$0,80 < E \leq 0,95$	Seviye 2
$0 < E \leq 0,80$	Seviye 3
$E \leq 0$	Koruma İsteğe Bağlı

Şekil 6.6: Yıldırım Koruma Sistemleri İçin Etkinlik Değer Seviyeleri [37].

Değer aralığında yer aldığı $E = 0,245$ etkinlik değeri neticesinde bir YKS koruma sistemi gerektiği görülmektedir.

6.1.2 Yapının Tepe Noktasından Başlayarak Korumanın Tasarlanması

Haberleşme merkezinin binasında santral sistemleri soğutma cihazları gibi kapsamlı elektronik cihazlar ve bu cihazlara yardımcı birçok ek cihaz ve soğutma sistemleri yer almaktadır. Bu ek cihaz ünitelerini muhtemel meydana gelebilecek herhangi bir yıldırım durumunda yapıyı yıldırımın olumsuz akım etkilerinden korumak temel hedefine ek olarak, aynı zamanda bina koruması haricinde ek olarak koruma yapılması gerekmektedir. Çatı kısmında bulunan binanın dış duvarlarından iletilecek şekilde 50 mm^2 örgülü bakır iletken ve uygun kroşe elemanları kullanılarak koruma hedeflenen cihazlar için bir koruma bölgesi oluşturulur.

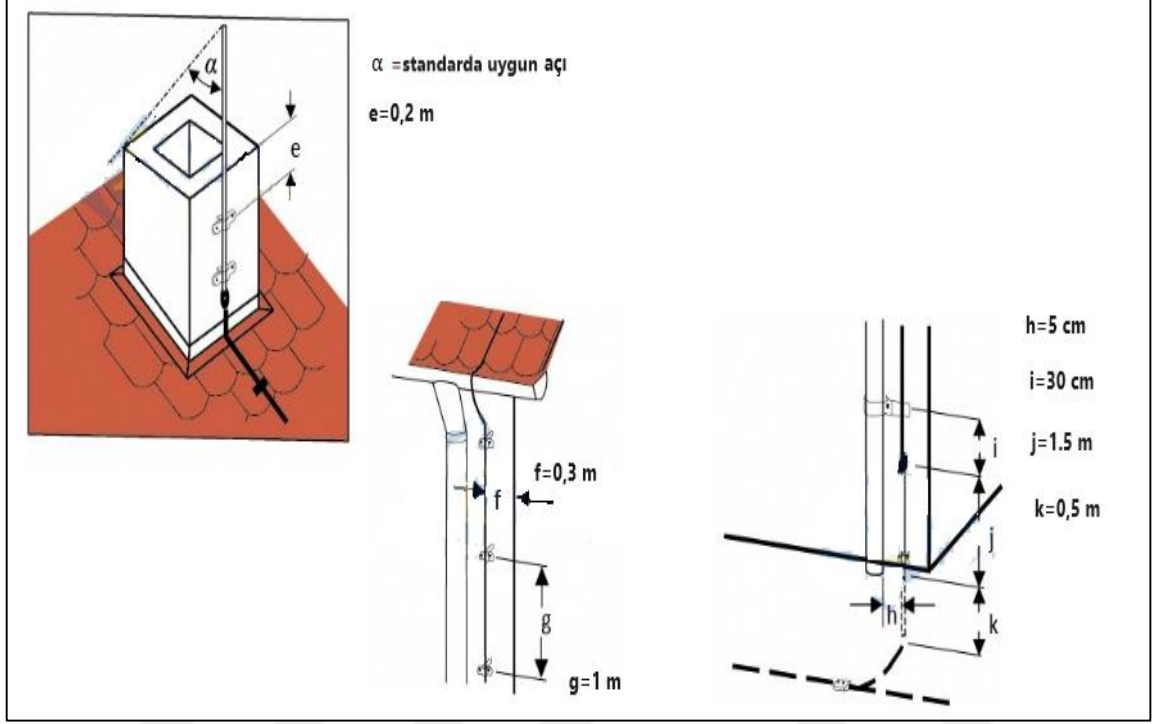


Şekil 6.7: Yakalama Ucu iletkeni ve İndirme İletkeni Entegrasyonu.

Burada a mesafesi 1 metre, yakalama ucu olan b mesafesi 15 cm olarak, c mesafesi 1 metre ve d mesafesi ise 40 cm olarak alınır.

Paratoner tasarımı olmayan yapıların yüksek kısımlarının yıldırım çekme ihtimali yüksektir. Özellikle bacalar bunun en iyi örneğidir. Bacaları bu denli önemli kılan etken ise içerde yer alan yüzeyinin, yağmursuz günlerde dahi akımın uzun bir akıntı yolundan geçmesine izin verecek kadar iletkenliği yüksek olan kurumla kaplılığıdır. Bacada bulunan kurumun bu tarz bir tehlikeye sebebiyet vermesi toprak ve koruma kısmını önemli kılmaktadır. Bacanın korunması için ağzının üst kısmı galvaniz sac kaplanacak ve sac çapı 20 mm ve uzunluğu 50 cm uzunluğunda krom ile kaplanmış olan bakır tutma çubuğu ile bağlanacaktır. Şekil

6.4'te iletkenin çatıya montaj yöntemini göstermektedir. Şekil 6.5'te baca korunurken baca üst seviyesi ile kanca arasındaki "e" harfi ile temsil edilen mesafenin değeri 20 cm olmalıdır. Şekil 6.5'te gösterildiği gibi iniş iletkenleri su oluklarından belli bir mesafeye yerleştirilir.



Şekil 6.8: Zemine Entegre Kısımına Kadar Teknik Detay [5].

6.1.3 Topraklamanın Yapının Temeline ve Çevresine Uygulanması

Topraklamanın kapsayacağı dairesel alanın çapı şu şekilde hesaplanır.

$$D = \left(\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.8)$$

ise 6.1.3 eşitliğindeki denklemden;

$$D = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 35 \cdot 25}{3.14} \right)} = 33,38 \text{ metredir}$$

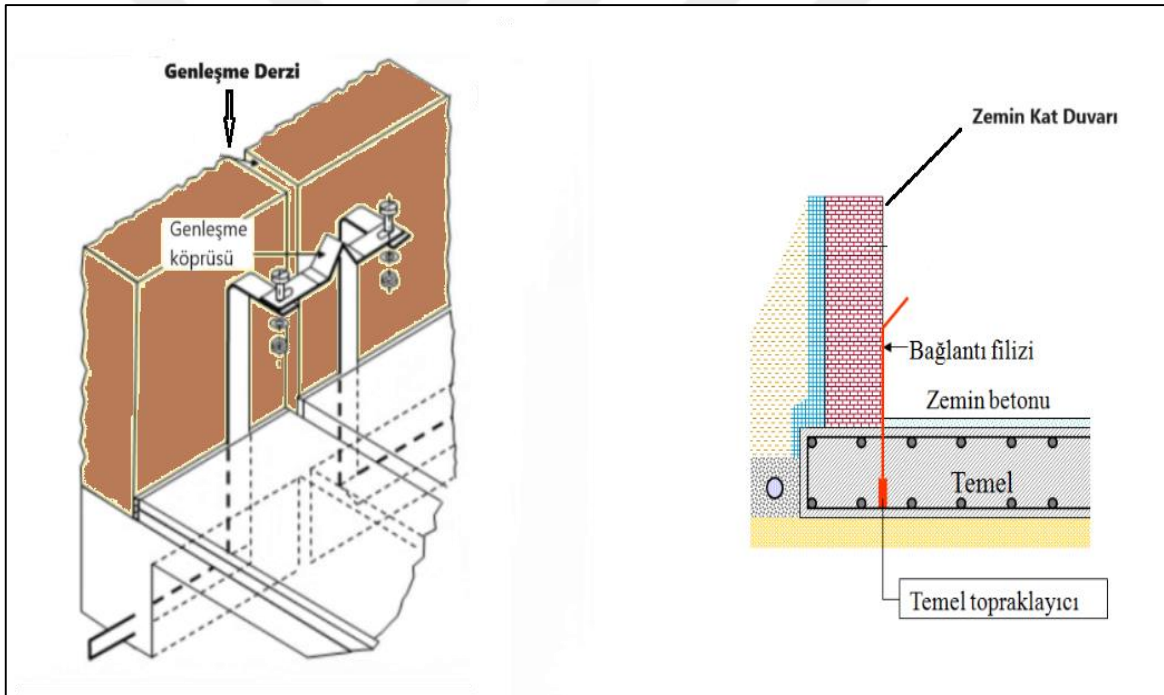
Temel topraklama iletkeni için kalınlığı 3,5 mm ve genişliği 30 mm olacak şekilde şerit levha halinde galvaniz çelik şerit kullanılacaktır. Bu işlem için en az eni 20 metre genişliği ise 20

m olan kare şekil baz alındığında harcanacak olan şerit levhanın toplam uzunluğu 178 metre olacaktır ve R_y yayılma direnci;

$$R_y = \frac{\rho E}{2D} + \frac{\rho E}{L} \quad (6.9)$$

$$R_y = \frac{100}{2(33,38)} + \frac{100}{178} = 2,095\Omega \text{ olarak bulunur.}$$

Temel için yapılan topraklama dilatasyon derzinin bulunduğu kısımda bitirilecek olup bu kısım temel topraklaması için son nokta olacaktır. Şekil 6.6 'da gösterildiği üzere bu işlem esnekliği tolere edebilecek seviyede gerektirdiği kadar tasarlanır. Öte yandan söz konusu bu bağlantı noktaları bakımlar, ölçümler, revizyonlar için her zaman kontrol edilebilir şekilde olmalıdır.



Şekil 6.9: Esnek Bağlantı ve Temel Topraklayıcının Entegrasyonu.

Ana potansiyelin belirli bir düzeyde denge oluşturması hedefiyle, potansiyel dengeleme barasına bağlanması gereken bağlantı filizi Şekil 6.6'da şematize edildiği biçimdeki gibi yapı içerisine girdiği yüzeyden en düşük 150 santimetre uzunlukta olacak şekilde tasarlanacaktır.

Toprağın Türü	Toprak Özdirenci $\rho E(\text{ohm.m})$
Bataklık	5-40
Çamur,kil,humus	20-200
Kum	200-2500
Çakıl	2000-3000
Havanın etkisiyle dağılmış taş	Genelde <1000
Kumtaşı	2000-3000
Buzultaş(morenin)	>30000
Granit	>50000

Şekil 6.10: Toprak Türüne Göre Özdirençler.

Bunun dışında yıldırım dolayısıyla ortaya çıkan yüksek gerilimler nedeniyle karşı koruma kalkanına ihtiyaç duyulur. Bu topraklayıcı olarak ifade edilir. Bu nedenle topraklayıcı ile bağlantının sağlanabilmesi için iniş iletkenlerinin bağlı olduğu noktalara ihtiyaç duyulur. Tasarımı yapılan çevre topraklamaları bina çevresine yaklaşık olarak binanın ortalama 1 metre dışından geçirilen ve derinliği 80 santimetre olan ve genişliği 40 santimetre olan kanallar açılmak suretiyle tasarım gerçekleştirilir. Koruma çubuklarının yerleştirilmesi amacıyla açılan kanal içerisine kesit çapı 8 milimetre olan kaplamasız bakır iletkeni entegre edilerek kanal tamamlanacaktır. Tasarımı u şekline benzer olan kanal içerisine, yine bu kanal boyunca kesiti 20 milimetre olacak şekilde boyu ise 3 metre olacak ölçülerde bakır iletkenler sırasıyla dizilir şekilde toprağa çakılmak suretiyle entegre edilecektir. Yapının teknik altyapısına göre planlanan 11 adet bakır iletkenin meydana getireceği direnç değeri $R_{\check{c}}$ (Dikey Topraklama Eşdeğer Direnci) ise;

$$R_{\check{c}} = \frac{\rho E}{n \cdot L} \quad (6.10)$$

$$R_{\check{c}} = \frac{100}{11.3} = 3,03 \Omega \text{ olarak bulunur.}$$

İletken çubuklar arasındaki aralık bir çubuğun uzunluğunun en düşük iki katı olacaktır. Kanal içerisine döşenen çubuklar ile iletken ve topraklama çubuklarının bağlantıları güvenilir, sürekli ve iyi elektrik iletkenliği verebilecek biçimde yapılarak, ayrıca kanal alanı iletkenliği en iyi şekilde sağlayacak parametre aralığında seçilen toprak doldurmak suretiyle tamamlanacaktır.

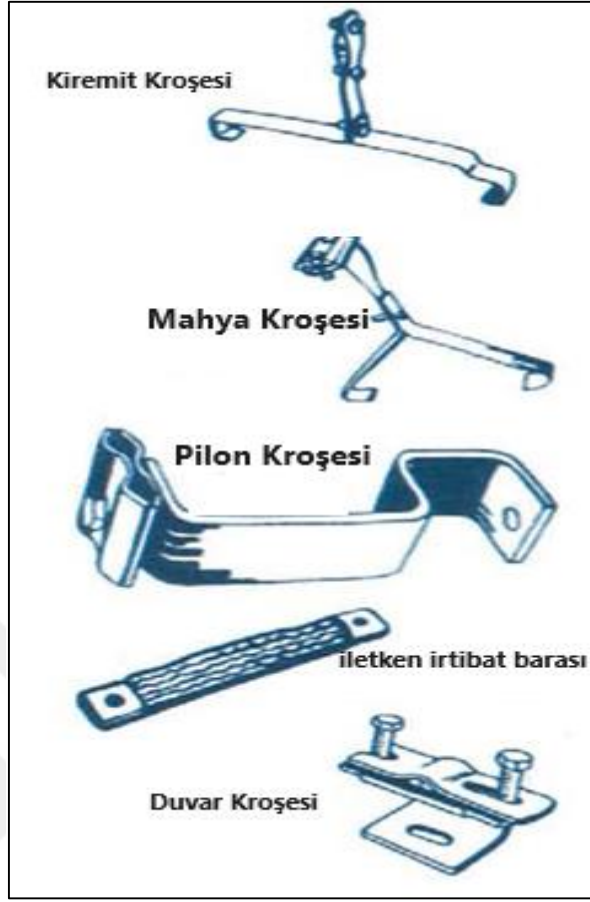
Analiz yapılabilmesi için topraklama elektrotları kurularak elde edilecek RT direnç değeri yani alandaki toplam direnç;

$$RT = \frac{Ry \cdot Rç}{Ry + Rç} \quad (6.11)$$

$$RT = \frac{(2,095) \cdot (3,03)}{(2,095) + (3,03)} = 1,24 \Omega \text{ olarak bulunur.}$$

1,24 Ω < 2 Ω direnç değeri 2 ohm direnç değerinden az olduğu için istenen aralık değerine uygundur.

Diğer taraftan saha panolarında topraklama ağında kullanılan 2400 adet standart saha panosunun, tabanındaki topraklama bağlantısına çapı 16 mm² (milimetrekare) topraklama bakır iletkeni cıvata bağlantı sistemi yardımıyla teknik olarak bağlanmaktadır. İletkenin öteki tarafında yer alan uç noktasına yukarıda anlatıldığı gibi takılan topraklama çubuğu veya plakasına bağlanır. Topraklama tesisatı tertibatı yardımıyla sonuçta ulaşılabilecek topraklama direnç değeri en yüksek 10 Ω (ohm) değerini aşmamalıdır. Aksi takdirde yapılan işlemlerin tesisatı koruma aralığında olmayacağı için etkin korumayı sağlayamayacaktır.

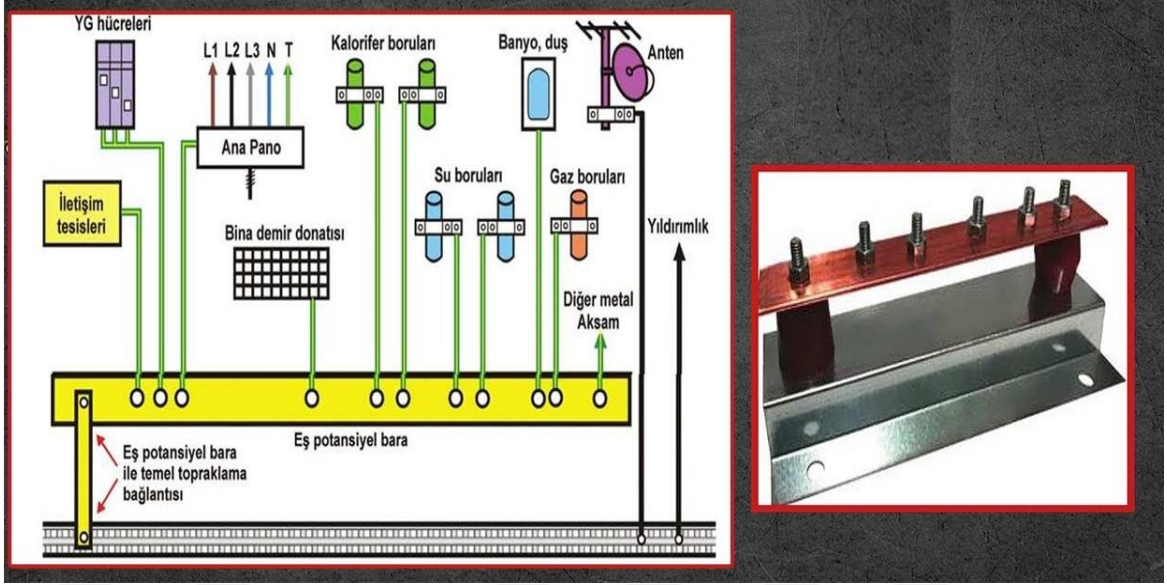


Şekil 6.11: Kullanılan Kroşeler.

Pilon topraklaması için planan çalışmanın teknik detayları şu şekildedir;

Çatı üzerinde yer alan anten direğinin etrafından çapı iki adet sekiz milimetre çapında (2*Ø 8 mm) üzerinde kaplama bulunmayan çıplak bir bakır iletken dolaştırılacaktır. Anten direğinin her bir ayağı da yine topraklama işlemi kapsamında bu topraklama tertibatı ile bağlantı suretiyle tertibatlandırılacaktır. Antenin uzak ucuna diğer cihazların koruma açısı içerisinde yer alacak biçimde çapı 20 santimetre ile 175 santimetre ölçüsünde krom kaplama ile tasarlanmış bakır yakalama çubuğu konumlandırılacak ve direğe montajı gerekli kelepçe ve bağlantı ekipmanları ile gerçekleştirilecektir. Halihazırda var olan anten direğinin direnci monte edilecek iniş iletkeninden daha düşük olduğundan iniş iletkeni kullanılmayacaktır.

Santral salonunda topraklama için;



Şekil 6.12: Eş Potansiyel Bara Bağlantısı.

Doğru akım telefon santral odasında cihazların beslendiği panonun topraklaması kablo odasındaki eşpotansiyel baraya bağlanır. Ayrıca yükseltilmiş döşemenin ayakları çıplak bakır iletkenlerle topraklanarak eş potansiyel yaratılmıştır.

7. BÖLÜM

7.1 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Söz konusu bu tez çalışmasında öncelikle enerji güç sistemlerinde genel olarak karşılaşılan aşırı gerilimler ve bu aşırı gerilimlerin meydana gelme sebeplerine bağlı olarak ayrı ayrı tanımlanmıştır. Gündelik yaşamda sektörel bazda bakıldığında, bu tür aşırı gerilimlerle ilgili problemlerin hepsinin aynı anda ortaya çıkmasının söz konusu olması pek mümkün değildir. Söz konusu bu sorunlar, yıllar boyunca güç sistem şebekelerinin artan yüke bağlı olarak gelişmesi ve buna bağlı olarak iletim gerilimlerinin yükseltilmesi sonucu artarak güncelliğini yenileyerek günümüze kadar gelmiştir. Yine çeşitli dönemlerde söz konusu bu sorunlar irdelenmiş, araştırılmış ciddi çalışmalar yapılarak kümülatif bir ilerleme kaydedilmiştir. Dolayısıyla değerli bir bilgi yığını meydana gelmiştir. Öte yandan yük artışına paralel olarak gelişen güç sistemlerinin karmaşık yapısı, söz konusu bu araştırmaların bugünde olduğu gibi gelecekte de güncelliğini koruyacağını göstermektedir. Bu yüzden güncel bazı problemlerin de öncekiler gibi ortaya çıkması olasıdır dolayısıyla, söz konusu bu sorunlar gelecekte inceleme, araştırma ve çözüm için temel bir konu olarak ele alınacaktır.

Bu çalışmada, ayrıca güç sitemlerinde endüklenen gerilimlerin frekans ve genlik olarak ne kadar tehlikeli boyutlara ulaşabileceği, kapasitif bir devrenin anahtarlanmasında hat üzerinde oluşan aşın gerilimlerin tekrar tutuşmalar neticesinde güç sistem geriliminin 5 katı gibi yüksek değerler kadar çıkabildiği, açık devre edilmiş bir iletim hattının bir kablo bölümünden enerjilendirilmesi durumunda 2 p.u. 'lik bir yürüyen gerilim dalgasının hat üzerinden ilettildiği ve hat sonu açık ucunda gerilimin ikiye katlanmasıyla 4 p.u. gibi çok aşırı gerilimlere ulaşıldığı görülmektedir. Sistemi bu tür aşırı gerilimlerden korumanın ne kadar önemli bir problem teşkil ettiği böylece anlaşılmış, hattın söndürme etkisinin, kapama dirençlerinin, basamak dirençlerinin ve parafudrların söndürme etkilerinin de dikkate alınmasıyla bu geçici olayların en düşük seviyelere indirgenmesi hakkında genel bilgi verilmiştir.

Elektrik güç sistemlerinde geçici olaylardan dolayı ortaya çıkan problemlerin sürekli artması, özellikle çok hızlı hesaplama kolaylıklarının ortaya çıkışından beri analiz ve çözüm metodlarının artmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, gelecekte kurulması mümkün olan

sistemler, dizayn çalışması aşamasında analiz edilebilir ve böylece, işletme esnasında ortaya çıkacak olan problemlerden ve daha sonra sistem tam işletme aşamasında ortaya çıkabilecek olan problemlerden sistemin korunması sağlanabilir. Sistem elemanlarının performansını ilgilendiren mevcut bütün verileri dikkate alarak sonuç daha başarılı olarak elde edilebilir.

Tezde ağırlıklı olarak yıldırımdan kaynaklanan aşırı gerilimlere karşı korunma yöntemlerine değinilmiş olup, bir iletim hattının faz iletkeni, koruma hattı ve direğine yıldırım düşmesi sonucu direk üzerinde oluşabilecek gerilim değerlerinde değişiklikler; direkt ile topraklama dirençleri ve darbe akımı değerlerine göre grafiksel biçimde ortaya konmuştur. Bu sonuçlar direğin topraklama direnci azaldıkça olası doğru gerilim değerlerinin de düştüğü, en fazla gerilim değerinin direğe yıldırım düştüğünde oluştuğu gözlemlenmiştir. Söz konusu ortamda elde edilen bulgular aşırı gerilimlere karşı korumada topraklama direncinin önemini ifade etmektedir. Ortaya konulan bulgular ışığında bir telekom santral binası için korunma sistemi tasarlanmıştır. İlgili mevzuatlar ışığında yıldırımdan korunma sistemi ile entegre topraklama sistemi oluşturulmuş, AG sistemlerde binanın ve santralin korunmasını sağlayacak darbe koruma şemaları seçilmiştir. Söz konusu tez, literatürde bugüne kadar yapılmış çalışmaların detaylı bir incelemesi ve özetidir.

REFERANSLAR

- [1] Kırklareli Üniversitesi, “Akım ve gerilim ölçme”, Kırklareli, 2007.
- [2] N. Charalambous, “Coordination of time-overcurrent relays for high-speed power line protection”, New Jersey Institute of Technology, 1994.
- [3] W. DIESENDORF, “Overvoltages”, içinde *Insulation Co-Ordination in High-Voltage Electric Power Systems*, 1974, ss. 3–26. doi: 10.1016/b978-0-408-70464-9.50006-x.
- [4] N. Gençer, “Yıldırım Ve Aşırı Gerilimlerin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkileri-Direklerin Topraklama Direnci İle izolatörlerin Atlama Gerilimi İlişkisi”, *Tmmob Emo Ankara Şubesi Haber Bülteni*, c. 1, sayı 1, ss. 15–20, 2015.
- [5] A. Bettermann, *Lightning Protection Guide*, 2. baskı. Germany, 2019. [Çevrimiçi]. Available at: www.obo.de
- [6] N.Cahit GENÇER, “Yıldırım Ve Aşırı Gerilimlerin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkileri-Direklerin Topraklama Direnci İle izolatörlerin Atlama Gerilimi İlişkisi – Parafudrlar-Transformatör Eklatörlerinin Etkinliği”, *Tmmob*, c. 1, Ankara, ss. 15–20, 2015.
- [7] S. Mamiş, E. Akın, ve A. Kaygusuz, “Yıldırım Düşmesi Nedeniyle İzolatörler Üzerinde Oluşan Aşırı Gerilimler”, içinde *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal Kongresi*, Malatya, 2003, ss. 17–19.
- [8] S. Rüstemli ve B. Kocaman, *Elektrik Şebekelerinde Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma Tekniği*. Ankara: İksad, 2022. [Çevrimiçi]. Available at: www.iksadyayinevi.com
- [9] B. de Metz-Noblat, “Lightning and HV electrical installations”, *Cah. Tech. Merlin Gerin*, sayı 1, ss. 770–790, 1994.
- [10] A. Kaygusuz, S. Mamiş, ve E. Akın, “İletim Hatlarında Yıldırım Nedeniyle İndüklenen Gerilimler”, içinde *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal Kongresi*, Malatya, ss. 13–16.

- [11] H. İsmailoğlu, “Aşiri Gerilimler, Oluşumları, Etkileri Ve Aşiri Gerilimlere Karşı Koruma”, sayı 1960. İzmit, ss. 1–9, 1968.
- [12] L. Vinet ve A. Zhedanov, “A ‘missing’ family of classical orthogonal polynomials”, Kocaeli Üniversitesi, 2011. doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- [13] Ö. Kara ve M. Bağriyanik, “Ferrorezonansın Anlaşılması Ve Transformatör Merkezlerinde Yapılan Kompanzasyonun Ferrerezonan Üzerindeki Etkileri”, ss. 218–222.
- [14] H. Glavitsch, “1404C2624Fa7F25_Ek”, ss. 33–46, 1966.
- [15] N. Özay, “Direnc Kullanılan Kapamalarda Optimum Direncin Hesaplanması”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ss. 83–86. doi: 621.
- [16] R. W. Alexander, D. Dufournet, ve T. Alstom, “Transient recovery voltage (TRV) for high-voltage circuit breakers”. ss. 1–41, 2000.
- [17] M. Güllüdereli, “Enerji İletim Sistemlerinde Arıza Analizinin Otomasyonel Çözümleri”, 2007.
- [18] Milli Eğitim Bakanlığı, *YG tesisleri onarım tekniği*. Ankara, 2011. doi: 522EE0141.
- [19] “Elektrik elektronik teknolojisi YG tesisleri onarım tekniği”, 2011.
- [20] A. Özdeş, “Güç Sistemlerinde Geçici Aşırı Gerilimler”, Yıldız Teknik Üniversitesi, 1997.
- [21] M. Bekir ve M. Hakan, “Topraklama Türlerine Göre Radyal Dağıtım Sistemlerinde Tek Faz Toprak Arızası için Yönlü Koruma Gerekliliğinin İncelenmesi”, Kocaeli, 2015.
- [22] C. Büyüksaraç, “Simetrik Bileşenler”, *Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi*, sayı ağustos, İzmir, ss. 27–28, 2007.
- [23] G. Günpolat, “Özel Bir Hamiltonian Denklemi için λ -Simetri ve Prolle-Singer Metodu”, *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.*, c. 31, sayı 1, ss. 62–69, Mar. 2019, doi:

10.7240/jeps.474362.

- [24] M. M. Doğanay, “Güç sistemlerinde simetrik ve simetrik olmayan arıza analizleri ve uygulamaları”, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 2022. doi: 10465995.
- [25] W. DIESENDORF, “The insulation co-ordination of high-voltage stations”, içinde *Insulation Co-Ordination in High-Voltage Electric Power Systems*, 1974, ss. 95–117. doi: 10.1016/b978-0-408-70464-9.50011-3.
- [26] Ö. Divaracı, “Aşırı Gerilime Karşı Korumanın Gerekliliği”, sayı 38. ss. 1–5.
- [27] E. Uhlmann ve G. Flisberg, *H.V.D.C. Insulation coordination- 2*, c. 2, sayı 3. 1971, ss. 104–111.
- [28] Ö. Kalenderli ve S. Çabuk, “Bir Yıldırımılıktan Akan Akımın Yarattığı Manyetik Alanın Bina İçi Kablolarla Etkileşimi”.
- [29] “What Is a Lightning Rod? How Does It Work? Vitality of a Lightning Rod - Aydem Perakende”. <https://www.aydemperakende.com.tr/en/blog/what-is-a-lightning-rod-how-does-it-work-vitality-of-a-lightning-rod> (erişim 19 Kasım 2023).
- [30] A. Çakırcı, “Aktif Paratoner”, 2019. <https://www.topraklamaolcumu.net/aktif-paratoner/> (erişim 19 Kasım 2023).
- [31] S. Seçkin, “Parafudr nedir?”, 2021. <https://greenenerji.com.tr/pages/akademidetay/65> (erişim 20 Kasım 2023).
- [32] R. Türkiye, “Katalog ve Teknik Dökümanlar - Raycap Türkiye”. <https://yilkomerparafudr.com/katalog-ve-teknik-dokumanlar/> (erişim 20 Kasım 2023).
- [33] “Şalt Sahası Nedir? Şalt Sahası Elemanları”. <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-trafolari/salt-sahasi-nedir-14838/> (erişim 10 Eylül 2023).
- [34] “Sigma Akademi – SİGMA ELEKTRİK”. <https://sigmaelektrik.com/sigmaakademi/>

(erişim 22 Kasım 2023).

- [35] Milli Eğitim Bakanlığı, *Kesiciler*. Ankara, 2012.
- [36] “<https://www.mgm.gov.tr/kurumsal/haberler.aspx?y=2012&f=yildirim>”.
<https://www.mgm.gov.tr/kurumsal/haberler.aspx?y=2012&f=yildirim>
- [37] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Yıldırımdan Korunma Yönetmeliği”.

