T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE ARK ARIZALARININ TESPİTİ, ANALİZİ VE AZALTILMASI

Serhan BAYKUL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Oktay ARIKAN

Mayıs, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE ARK ARIZALARININ TESPİTİ, ANALİZİ VE AZALTILMASI

Serhan BAYKUL tarafından hazırlanan tez çalışması 21.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi OKTAY ARIKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğretim Üyesi OKTAY ARIKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğretim Üyesi Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğretim Üyesi Suat İLHAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi OKTAY ARIKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Ark Arızalarının Tespiti, Analizi ve Azaltılması” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Serhan BAYKUL

İmza

Aileme ve tüm sevdiklerime

TEŞEKKÜR

Tez sürecine başlamadan kendisiyle görüştüğümde sıcakkanlılığı, sevecenliği, bilgi ve tecrübesiyle beni kendi danışmanlığında bir yüksek lisans tezi yazma konusunda heyecanlandıran, ilk günden bugüne sürekli yol gösteren, her görüşmemizde güler yüzüyle karşılayıp, her sıkıntımda yanımda olan çok değerli hocam Dr. Öğretim üyesi Oktay Arıkan'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, çalışmam boyunca bana manevi desteklerini esirgemeyen ağabeyim Selim BAYKUL'a, can dostum Mehmet Baki Öztürk'e ve hayatım boyunca bana bilginin ve öğrenmenin önemini aşılayan aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Serhan BAYKUL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ VII
KISALTMA LİSTESİ IX
ŞEKİL LİSTESİ XI
TABLO LİSTESİ XIII
ÖZET XV
ABSTRACT XVII
1 Giriş 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 5
2 Ark Arızaları 6
2.1 Ark Arızası Olayı 6
2.2 Ark Arızası Çeşitleri 7
2.3 Ark Arızaları Oluşum Sebepleri 8
2.4 Ark Arızalarının Etkileri 8
2.5 Ark Arızaları İle İlgili Standartlar 10
2.5.1 OSHA Standartları 11
2.5.2 NFPA 70E Standardı 12
2.5.3 IEEE Standardı 12
2.5.4 IEC Standartları 12
3 Ark Flaş Arızası Hesaplama Yöntemleri 14
3.1 IEEE 1584-2002 Standardına Göre Hesaplama Yöntemi [9] 14
3.1.1 Analiz Süreçleri 15

3.1.2 Ark Flaş Hesaplamaları 18
3.1.3 Akım Sınırlayıcı Sigortalar ve Alçak Gerilim Kesiciler 22
3.1.4 Alçak Gerilim Kesiciler 26
3.1.5 IEEE 1584-2002'de Yapılan Analizlerin Özeti 27
3.2 Lee Metodu 27
3.3 Diğer Metotlar 30
3.3.1 600 V Altı Sistemler İçin Hesaplama Yöntemi 30
3.3.2 Doğru Akım(DC) Sistemler için Hesaplama Yöntemi 31
4 Ark Flaş Arızaları Önlemleri ve Çözüm Yöntemleri 32
4.1 Ark Önleyici ve Koruyucu Yöntemler 33
4.1.1. Eğitim 33
4.1.2 Tasarım 33
4.1.3 Büyük Değerli Bir Direnç ile Topraklama 34
4.1.4 İletkenin Yalıtılması veya Çıplak İletken 34
4.1.5 Bakım 35
4.1.6 Çalışma Mesafesinin Belirlenmesi 35
4.1.7 Uyarıcı Etiketler 41
4.1.8 Kişisel Koruyucu Ekipmanlar (PPE) 42
4.2 Ark Tahmini Yöntemleri 44
4.2.1 Akım ve Gerilim Bilgisine Göre Arkın Belirlenmesi 44
4.2.2 Ark Arızası Belirleme İçin Diğer Metotlar 45
4.2.3 Sensor Teknolojileri 47
4.3 Ark Enerjisini Azaltma ve Akım Sınırlama Yöntemleri 49
4.3.1 Ark Flaş Enerjisi Azaltılması 49
4.3.2 Ark Akımının Azaltılması 50

4.3.3 Ark Flaş Korumasında Akım Sınırlama Yaklaşımı 51
4.4 Ark Hızlı Algılama ve Ark Süresi Azaltma Yöntemleri 53
4.4.1 Bara Diferansiyel Koruma..... 54
4.4.2 Bölge Seçici Kilitleme 55
4.4.3 Ark Flaş Enerjisini Azaltan Bakım Anahtarı 56
4.4.4 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma 56
4.5 Ark Söndürme..... 60
4.5.1 Kesiciler 60
4.5.2 Ark Gidericiler..... 60
4.6 Ark Arızaları Çözüm Yöntemleri Genel Değerlendirme..... 62
5 Modelleme ve Analiz Çalışmaları..... 63
5.1 Uygulama 1..... 63
5.1.1 Çalışma Senaryolarına Göre Analizler 65
5.1.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 68
5.2 Uygulama 2..... 70
5.2.1 Çalışma Senaryolarına Göre Analizler 72
5.2.2 Uygulanan Senaryoların Karşılaştırmaları 82
5.2.3 Ark Flaş Enerjisi Azaltma Yöntemlerinin Etkisinin Incelenmesi 88
6 Sonuç ve Öneriler..... 102
Kaynakça 105
Tezden Üretilmiş Yayınlar..... 109

SİMGE LİSTESİ

C_f	Hesaplama faktörü
D	Çalışma mesafesi
D_c	2. Derece yanık uzaklığı
D_B	Ark noktasından ark flaş koruma sınırına olan uzaklık [mm]
E	Ark enerjisi
E_{MA}	Ark enerjisi
E_m	Maksimum güç noktasında tahmini DC ark flaş enerjisi
E_n	Normalize enerji yoğunluğu
F	Kısa devre akımı
G	İletkenler arası açıklık
I_a	Ark arıza akımı
I_{ark}	Ark arıza akımı
I_{bf}	Maksimum arıza akımı, 3 faz kısa devre akımı (simetrik RMS)
K	Açık veya kapalı ortamlardaki arklara göre değişen sabit sayı
MVA_{bf}	Arıza noktasındaki maksimum arıza akımındaki güç
P	Maksimum 3 fazlı arıza akımı hesabındaki güç
t	*A*rk süresi
T_{ark}	Ark süresi
U_n	Fazlar arası gerilim
V	Sistem gerilimi
V_{stm}	Sistem gerilimi
Z_k	Kısa devre empedansı
x	Mesafe faktörü

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
AG	Alçak Gerilim
DC	Direct Current (Doğru Akım)
E	Elektronik Kesme Ünitesi
ETAP	Electrical Power System Analysis & Operation Software
HF	High Frequency (Yüksek Frekans)
HFCT	Yüksek Frekanslı Akım Transformatörü
I	Instantaneous (Ani)
ICCB	Insulated-case Circuit Breaker (İzole Kasa Devre Kesicisi)
IEC	The International Electrotechnical Commission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	İzoleli Bipolar Transistör
IR	Infrared Radiation
L	Long-Time (Uzun-Zamanlı)
LVPCB	Low-voltage Power Circuit Breakers (Alçak Gerilim Devre Kesicileri)
M	Magnetic Trip Units (Manyetik Kesme Ünitesi)
MCCB	Molded-case Circuit Breaker Kalıplı (Kasa Devre Kesicisi)
NFPA	National Fire Protection Association
OG	Orta Gerilim
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PD	Partial Discharge (Kısmi Boşalma)
PPE	Personel Protective Equipment (Kişisel Koruyucu Ekipman)
RF	Radio frequency (Radio Frekansı)

S	Short-Time Kısa-Zamanlı
TM	Thermal-magnetic Trip Units (Termal Manyetik Kesme Ünitesi)
UV	Ultraviyole
UHF	Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)
VHF	Very High Frequency (Çok Yüksek Frekans)
ZSI	Zone Selective Interlocking (Bölge Seçici Kilitleme)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Ark Patlaması Oluşum Aşamaları; a:Arkın Oluşumu, b:Termal Plazma, c:Ark Flaş Patlaması [17] 7

Şekil 2.2 Seri ve Paralel Ark Arızaları [23] 7

Şekil 2.3 Ark Sırasında Enerji Transferi [23] 9

Şekil 2.4 Ark Flaş Patlaması Örneği [19] 9

Şekil 4.1 İletkenin Yalıtkansız Kısmında Erime [34] 35

Şekil 4.2 Tehlike Sınır Bölgeleri [27] 36

Şekil 4.3 Çalışan Personelin Uygun Çalışma Mesafesinde Doğru Ekipman ile Müdahele Örneği [35] 39

Şekil 4.4 Ark Flaş Uyarıcı Etiket Örneği 42

Şekil 4.5 Kişisel Koruyucu Ekipmanlı Personel Örneği [12] 42

Şekil 4.6 Muhtemel Arkları Algılama Yöntemleri [23] 44

Şekil 4.7 Kablo Bağlantı Noktalarındaki Akım Farklılıklarının Analizi [37].....45

Şekil 4.8 Örnek Bir Sistemde Kısa Devre Akımı Hesaplanması [34] 50

Şekil 4.9 Akım Sınırlayıcı Sigortaların Çalışma Prensibi [47].....52

Şekil 4.10 Ark Enerjisinin Ark Süresine Bağlı Değişimi (U:15 kV, I_k:50 kA, G:152 mm, D:910 mm) [34] 54

Şekil 4.11 Düşük Empedanslı Bara Koruma Sisteminin Tek Baralı Sistem Uygulaması [48] 55

Şekil 4.12 Bölge Seçici Kilitleme(ZSI) Uygulanmış Sistem Örneği [49] 55

Şekil 4.13 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma Temel Prensibi [34] 56

Şekil 4.14 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma Sistemi Örneği [34] 57

Şekil 4.15 500 ms Ark Süresi ile Yapılan Test [11] 58

Şekil 4.16 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma ile 6 ms Ark Süresi ile Gerçekleşen Test [11] 58

Şekil 4.17 Örnek Bir Sistemde Ark Flaş Enerjisinin Ark Süresine Göre Kıyaslanması (U:15 kV, I_k:40 kA, bara açıklığı:152 mm, çalışma mesafesi: 90 mm) [34] 59

Şekil 4.18 Farklı Koruma Metotlarına Göre Ark Flaş Enerjisi Karşılaştırılması [11] 59

Şekil 4.19 Ark Gidericiler ile Yapılan Ark Flaş Koruma [18] 61

Şekil 5.1 Uygulama 1'deki Sistemin Tek Hat Şeması.....64

Şekil 5.2 Uygulama 1 Senaryo 1'in Ark Flaş Analizi 66
Şekil 5.3 Uygulama 1 Senaryo 2'nin Ark Flaş Analizi 67
Şekil 5.4 Senaryo 1'den Senaryo 2'ye Yüzdesel Değişim 68
Şekil 5.5 Uygulama 2'deki Sistemin Tek Hat Şeması 71
Şekil 5.6 Uygulama 2'de Arıza Noktalarının Yerleri 73
Şekil 5.7 Uygulama 2 Senaryo 1'in Ark Flaş Analizi 75
Şekil 5.8 Uygulama 2 Senaryo 2'nin Ark Flaş Analizi 77
Şekil 5.9 Uygulama 2 Senaryo 3'ün Ark Flaş Analizi 79
Şekil 5.10 Uygulama 2 Senaryo 4'ün Ark Flaş Analizi 81
Şekil 5.11 Senaryo 1'den Senaryo 2'ye Yüzdesel Değişim 83
Şekil 5.12 Senaryo 3'den Senaryo 4'e Yüzdesel Değişim 85
Şekil 5.13 Senaryo 1'den Senaryo 3'e Yüzdesel Değişim 86
Şekil 5.14 Senaryo 2'den Senaryo 4'e Yüzdesel Değişim 87
Şekil 5.15 Senaryo 3'den Senaryo 1'e Yüzdesel Değişim 89
Şekil 5.16 Senaryo 2'den Senaryo 1'e Yüzdesel Değişim 89
Şekil 5.17 Senaryo 1'de; Durum 1'den Durum 2'ye Yüzdesel Değişim 92
Şekil 5.18 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de A Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi 93
Şekil 5.19 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de A Barasındaki Arızada İlk Durumda Ark Flaş Analizi 93
Şekil 5.20 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 2'de A Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi (Değişiklik Sonrası Durum) 94
Şekil 5.21 Uygulama 2 Senaryo 1'de A Barasındaki Arızada Değişiklik Sonrası Ark Flaş Analizi 94
Şekil 5.22 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de D Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi 95
Şekil 5.23 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de D Barasındaki Arızada İlk Durum 96
Şekil 5.24 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 2'de D Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi 96
Şekil 5.25 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de D Barasındaki Arızada Değişiklikten Sonraki Durum 97
Şekil 5.26 Senaryo 1-ilkdurum'dan Koşul 1'e Yüzdesel Değişim 100
Şekil 5.27 Senaryo 1-ilkdurum'dan Koşul 2'ye Yüzdesel Değişim 100

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Ark Flaş Hesaplama Yöntemleri 14
Tablo 3.2 Kesici Tipi ve Açma Süreleri [9].....16
Tablo 3.3 Ekipmanlara Göre Bara Açıklıkları [9] 17
Tablo 3.4 Ekipmanlara Göre Çalışma Mesafeleri [9].....18
Tablo 3.5 Ekipman Tipine Göre Belirlenen Mesafe Faktörü (x) [9] 21
Tablo 3.6 Alçak Gerilimde Kesici Tipi, Nominal Akım ve Gerilimlere Göre Arıza Enerjisi ve Ark Flaş Sınırı Hesaplamaları [9].....26
Tablo 4.1 Ark Önleme ve Çözüm Yöntemleri 32
Tablo 4.2 Alternatif Akım (AC) Sistemlerde Sınırlı ve Kısıtlanmış Yaklaşma Mesafesi Belirleme Tablosu [27].....37
Tablo 4.3 Alternatif Akım (AC) Sistemlerde Kişisel Koruyu Ekipmanların (PPE) ve Ark Flaş Sınırı Belirlenmesi için Tablo [27] 38
Tablo 4.4 Doğru Akım (DC) Sistemlerde Sınırlı ve Kısıtlanmış Yaklaşma Mesafesi Belirleme Tablosu [27].....40
Tablo 4.5 Doğru Akım (DC) Sistemlerde Kişisel Koruyu Ekipmanların (PPE) ve Ark Flaş Sınırı Belirlenmesi için Tablo [27].....40
Tablo 4.6 Ark Flaş Kategorisine Göre Kişisel Koruyucu Ekipmanlar [27] 43
Tablo 4.7 Sensör Teknolojileri Kullanımı [34] 48
Tablo 5.1 Uygulama 1'de Senaryolara Göre Analiz Sonuçları 65
Tablo 5.2 Uygulama 2'de Baraların Ark Flaş Analizleri için Gerekli Olan Verileri 72
Tablo 5.3 Uygulama 2 Senaryo 1'de Anahtarların Durumu.....74
Tablo 5.4 Uygulama 2 Senaryo 1'de Ark Flaş Analizi Verileri 74
Tablo 5.5 Uygulama 2 Senaryo 2'de Anahtarların Durumu.....76
Tablo 5.6 Uygulama 2 Senaryo 2'nin Ark Flaş Verileri.....76
Tablo 5.7 Uygulama 2 Senaryo 3'de Anahtarların Durumu.....78
Tablo 5.8 Uygulama 2 Senaryo 3'ün Ark Flaş Analizi Verileri 78
Tablo 5.9 Uygulama 2 Senaryo 4'de Anahtarların Durumu.....80
Tablo 5.10 Uygulama 2 Senaryo 4'ün Ark Flaş Analizi Verileri 80
Tablo 5.11 Ark Flaş Analizi Tüm Senaryo Verileri.....82
Tablo 5.12 Senaryo 1'de Durum 1 ve Durum 2 İçin Ark Flaş Analizi Verileri 91

Tablo 5.13 Senaryo 1'de İlk Durum, Koşul 1 ve Koşul 2 İçin Ark Flaş Analizi Verileri.....98

ÖZET

Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Ark Arızalarının Tespiti, Analizi ve Azaltılması

Serhan BAYKUL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi OKTAY ARIKAN

Günümüzde elektrik enerjisine duyulan talep giderek artmaktadır. Artan talep ile beraber büyük güç sistemlerine ve enerjinin sürekliliğine duyulan ihtiyaç yükselmektedir. Artan güç ihtiyacı ve büyüyen sistemler ile beraber kısa devre güçleri yükselmekte ve arıza akımı seviyeleri artmaktadır. Bu nedenle, arızaların etkileri ve zararları da daha yıkıcı olmaktadır. Elektrik enerjisine ve sürekliliğine duyulan bu ihtiyacın giderek artması, elektrik güç sistemlerinin işletilmesinde ve bakımında olası tehlikelerin analiz edilip, azaltılması ve gerekli önlemlerin alınması ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Elektrik güç sistemlerinde enerji kesintilerine sebep olan, koruma ekipmanlarına zarar veren, can ve mal kayıplarına neden olan en önemli arızalardan biri de ark arızalarıdır. Ark, hava veya gaz gibi izolasyon malzemesi içerisinde iki iletken arasında meydana gelen bir elektriksel boşalma olarak tanımlanabilir. Elektrik güç sistemlerinde çeşitli sebeplerden dolayı kısa devre sonucu meydana gelen ark arızaları esnasında kontrol edilemeyen bir enerji, basınç, ısı ve ışık ortaya çıkar. Oluşan bu olaylar dolayısıyla ark flaş patlamaları olarak da adlandırılmaktadırlar. Ark flaş patlamaları esnasında açığa çıkan ısı ve enerjiden dolayı anahtarlama elemanları

zarar görmekte, can ve mal kayıpları görülebilmektedir. Bu yüzden elektrik güç sistemlerinde ark flaş arıza akım ve enerji hesaplamaları yapılmalı, ilgili standartlara göre tehlike analizleri gerçekleştirilmeli ve ark flaş arızaları esnasında çıkan enerji azaltılmaya çalışılmalıdır. Bu çalışmada, ark flaş arızaları hakkında literatür incelemesi yapılmış, ark olayı ve potansiyel oluşma sebepleri açıklanmış, ark arızası hesaplama yöntemleri belirtilmiş ve ark flaş enerjisi azaltma yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca, örnek sistemler üzerinde ark flaş hesaplamaları ve risk analizleri Electrical Power System Analysis & Operation Software (ETAP) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: ark, ark flaş arızası, ark flaş patlamaları, ark arızası hesaplamaları, ark arızalarının etkisinin azaltılması

ABSTRACT

Detection, Analysis and Reduction of Arc Faults in Electric Distribution Systems

Serhan BAYKUL

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Asst. Prf. Dr. OKTAY ARIKAN

Nowadays, the demand of electrical energy has increased, so it has brought more high-power systems and more need for electrical energy continuity. With increased power demand and growing systems, short circuit powers and short circuit current levels are also increasing. For that reasons, faults effects and damages get more destructive. The increasing need for electrical energy and continuity has led to the analysis, reduction and take necessary precaution for potential hazards in electrical power systems operation and maintenance. One of the important faults which cause power failure, equipment damage, loss of life and property in electrical power systems is arc faults. The arc can be defined as an electrical discharge that is happened between two electrodes in insulation materials like air, gas, ex. In electrical power systems, during arc faults the short circuits which is happened due to various reasons arise uncontrollable energy, heat, pressure and light. Then it's also called arc flash faults. Because of this incident energy and heat which appear in arc faults can damage switching equipments, can cause loss of life and economic damage. Therefore, in electrical power systems arc fault current and incident energy calculations shall be done,

hazard analysis must be considered and arc incident energy should be reduced with taking related precaution. In this work, literature review about arc flash faults are presented, arc and potential causes are explained, arc flash calculations methods are shown and arc incident energy reduction methods are examined. Additionally, in sample power systems arc flash calculation and risk analyses done with using Electrical Power System Analysis & Operation Software (ETAP).

Keywords: arc, arc flash fault, arc flash explosion, arc fault calculations, reduction of arc faults effect

1
Giriş

1.1 Literatür Özeti

Gelişen teknoloji ve ihtiyaçlar sebebiyle elektrik enerjisinin kullanımının artması elektrik enerjisinin sürekliliğinin, kalitesinin ve güvenliliğinin önemini arttırmıştır. Elektrik güç sistemlerinde enerji kesintilerine sebep olan, elektriksel ekipmanlara zarar veren, can ve mal kaybına yol açan en önemli arızalardan biri de ark arızalarıdır. Ark arızası sonucu ortaya çıkan ark enerjisi, basınç, ısı ve ışık dalgasının yıkıcı etkileri olabilmektedir. Bu yüzden, ark arızası sonucu ortaya çıkabilecek enerjinin, ark akımının hesaplanabilmesi ve önlemlerin alınabilmesi için IEEE 1584, NFPA 70E gibi standartlar oluşturulmuştur. Ayrıca, literatürde bu standartlara uygun hesaplamalar, analizler yapan ve bu sonuçlar ışığında ark arızalarının etkilerini önleyecek veya azaltacak önerilerde bulunan birçok çalışma vardır. Bu çalışmalarda, ağırlıklı olarak ark enerjisi hesaplamaları ve analizleri yapıldıktan sonra arkın zararını azaltacak bir yöntem seçilmiş veya yeni bir yöntem önerilmiş ve bu yönteme odaklanılmıştır. Bunların dışında bazı çalışmalarda ise arkın dinamik modellenmesi ve karakteristiği incelenmiştir.

Elektrik arızalarından kaynaklı yaralanmalar ile alakalı ilk çalışmalar 1960'lı ve 1970'li yıllarda "Occupational Safety and Health Administration (OSHA)" ve "National Fire Protection Association (NFPA)" standartlarının oluşması ile başlamıştır [1].

1960 yılında yayınlanan [2] ve 1977 yılında yayınlanan [3] yayınlarında daha çok alçak gerilim uygulamaları incelenmiş. [2]'de arktan kaynaklı potansiyel yaralanmalardan bahsedilmiş ve koruyucu ekipmanlar ile ark etkilerinin azaltılmasına odaklanılmıştır. [3]'de ise koruma cihazlarının akım değerleri ve zamana bağlı olarak metal yüzeylerde ark kaynaklı oluşabilecek yanma derecesini

tahmin eden bir yöntem sunulmuştur. Fakat, ark arızalarının etkilerinin hesaplanabilmesi ile alakalı ilk çalışma Ralph H. Lee'nin 1982'de yayınladığı, "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns" adlı yayın olarak kabul edilmektedir [4]. Ralph Lee, bu çalışma ile literatürde ark flaş arızalarının etkilerini ve önlemlerini inceleyen ilk çalışmalardan birini sunmuştur. Ardından 1990'ların ortalarında OSHA ve NFPA standartlarında arkın termal etkisi ve arktan kaynaklı yaralanmalar da yer almaya başlamıştır. 2000 yılına kadar alternatif akım sistemlerinde oluşan yaralanmalar ve tehlikelere odaklanılmış iken, bu tarihten itibaren doğru akım sistemlerinde, bataryalarda ve kapasitörlerde oluşan ark kaynaklı yaralanmalara odaklanılmaya başlanmıştır [1].

Lee Methodu uzun yıllar literatürde ark enerjisi hesaplaması için ilk ve tek kaynak olarak yerini almıştır. Fakat, ark akımını ve kapalı ortamlardaki ark enerjisini hesaplamak için bir yöntem sunmaması sebebiyle eksik kalmıştır.

Dunki-Jacobs, 1986 yılında yaptığı çalışmasında faz toprak arızasının nasıl 3 faz arızasına dönüştüğünü göstermiştir. Ayrıca, alçak gerilim uygulamalarında maksimum ark akımının, maksimum arıza akımından küçük olduğunu gözlemlemiştir [5].

[6]'da 600 V motor kontrol merkezleri için yapılmış dahili ark testleri ile alakalı ayrıntılı rapor sunulmuştur. Petro kimya alanında yapılan diğer bir çalışmada ise arkın insana ve ekipmanlara olan etkisi dikkate alınmış, örnek bir tesis için hesaplamalar yapılmış ve kullanılan kişisel koruyucu ekipmanlar incelenmiştir [7].

2000 yılında yayınlanan, R. L. Doughty, T.E. Neal ve H.L. Floyd'un "Predicting Incident Energy to Better Manage the Electrical Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems" adlı çalışmalarında ise 600 V altı ve arıza akımı 16 kA ile 50 kA arasında olan sistemlerde kullanılabilecek hesaplama yöntemleri sunulmuştur [8].

2002 yılında ise şu ana kadar birçok çalışmada kullanılmış ve halen de kullanılan ark flaş arıza akımı ve enerjisi hesaplama yöntemlerini yapılan analiz ve testler ile ortaya koyan IEEE 1584-2002 standardı yayınlanmıştır [9]. Bu standart aynı

zamanda 15 kV üstü uygulamalar için Lee Metodunu da içermektedir. Bu tarihten itibaren yapılan birçok çalışmada bu standart referans alınmıştır.

[10]'da IEEE 1584 ve NFPA 70E standartları baz alınarak Türkiye'deki örnek bir orta ve alçak gerilim bölgesinde hesaplamalar yapılmış, farklı noktalarda yapılan hesaplamalar ile kişisel koruyucu ekipmanlar belirlenmiştir. Ark enerjisini azaltabilmek için "geçici bakım anahtarlama" önerilmiştir. Analizlerde, DigSilent PowerFactory programı kullanılmıştır. [11]'de ise arkın sebepleri, karakteristiği ve ark önleme yöntemleri açıklanmış, "bölge seçici kilitleme" yöntemi üzerinde durulmuştur. Abeera Khan ve Mohsin Aman'ın yapmış olduğu çalışmada, ilk olarak ark arızasının ne olduğu ve öneminden bahsedilmiş, IEEE 1584'deki hesaplama yöntemi özet olarak gösterilmiş ve ardından da ark flaş enerjisini değiştiren parametrelerin etkisi; birini değiştirip diğerlerini sabit tutarak ETAP programı ile analizler yapılarak gösterilmiştir. Ark enerjisini azaltabilmek için ise daha çok çalışma mesafesi ve ark süresinin azaltılması başlıklarına odaklanılmıştır [12]. R. Walsch ve M. Price tarafından gerçekleştirilen çalışmada, orta gerilimde kontrol edilebilir bir sigortanın transformatör merkezinin primer tarafına yerleştirildiğinde sekonder tarafındaki ekipmanlarda meydana gelebilecek arklarda, ark flaş enerjisinin azaltılabildiği gösterilmiştir [13]. Bob Hughes, yaptığı çalışmada optik ark flaş belirleme sensörü ile sahada yapılan örnek bir uygulamada ark flaş enerjisinin 8,88 cal/cm^2'den 0,88 cal/cm^2'ye düştüğünü yani yaklaşık %90 bir azalma sağladığını göstermiştir [14]. Robert Wilson ve Christopher Inshaw ise çalışmalarında ark flaş hesaplamalarını ve çözüm yöntemlerini özetlemiş, ağırlıklı olarak optik sensörlerle arkı çabuk tespit edip kesiciye açma sinyali gönderen röleler ile ark süresini kısaltarak ark enerjisini azaltan yöntem üzerinde durmuştur. Kesicinin 100-150 ms arasında açması sayesinde ortaya çıkabilecek enerjinin azaltılabildiğini göstermiştir [15]. Jonny Simms ve Gerald Johnson da çalışmalarında ark flaş ile alakalı tanımlamaları ve standartları belirtikten sonra farklı röle teknikleri ve koordinasyonları ile ark süresini 0,2 sn'ye düşürerek ark flaş enerjisinin azaltımını örneklerle göstermiştir [16].

[17]'de ark flaş analizi dağıtık üretim sistemi içeren bir sistemde incelenmiş ve dağıtık üretim sistemlerinin arıza akımına katkısından dolayı, eğer sistem koruma elemanları ters zaman eğrisi karakteristiğine sahip ise; arıza akımının artması, ark süresini azalttığı dolayısıyla da ark enerjisini azalttığı gözlemlenmiştir.

J.A Kay ve L. Kumpulainen'in yapmış olduğu bir diğer çalışmada, ark sonrası oluşan basınç dalgasının etkisi üzerinde durulmuş ve akım sınırlayıcı sigortalar ile ark söndürücülerin birlikte kullanılması önerdikleri çözüm yöntemi olmuştur [18]. "Arc Flash Pressure Measurement System Design" adlı çalışmada, ark arızası sonucu oluşan basınç dalgasının çalışan personele verebileceği zararlar üzerinde durulmuş ve bu basıncın şiddetini ölçebilmek için geleneksel yöntemler, basınç transdüserleri, sarkaçlı sistemler gibi farklı teknikler incelenmiştir [19].

[20]'de ark akımına katkı sağlayan motor gibi ekipmanların ark esnasında devre dışı kalarak aslında ark akımına katkısının belirli bir zaman sonra ortadan kalktığını göstererek farklı bir hesaplama yöntemi oluşturmuş. Buna göre daha düşük bir ark enerjisinin açığa çıkacağı gösterilerek, risk analizlerinin yeniden yapılması gerektiği belirtilmiştir.

[21] ve [22] yayınlarında ise arkın dinamik modellenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. [21], farklı modelleri ayrıntıları ile açıklandıktan sonra yeraltı kabloları için yapılacak uygulamalarda Kizilcay ark modellinin kullanılması önerilmiştir. [22]'de ise yenilebilir enerji sistemi bağlı bir sistemde ark arızasını belirlemek için yeni bir modelleme metotu önerilmiş ve Matlab/Simulink ile örnek sistem uygulaması gerçekleştirmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada ark arızaları ile ilgili standartlar ve yapılmış çalışmaların incelenmesi, ark arızalarının ne olduğu, sebeplerinin neler olduğu gibi temel kavramların açıklanması, ardından da ark arızaları hesaplama yöntemlerinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Ek olarak, ark sonrası meydana gelen ark flaş enerjisinin ve bunun sebep olduğu etkilerin azaltılması ile alakalı koruyucu, önleyici ve azaltıcı yöntemlerin ayrıntıları ile geniş bir çerçevede anlatılması hedeflenmiştir. Ayrıca, örnek sistemlerde modelleme ve analiz çalışmaları yapılarak ark flaş arıza akımı, ark flaş enerjisi, kişisel koruyucu ekipman seviyesi belirleme analizlerinin yapılması; ark enerjisini azaltıcı yöntemlerden bazılarının seçilerek, ark flaş arızalarının yıkıcı etkilerinin azaltılabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Elektrik güç sistemlerinde kullanılan ekipmanlar, çalışan personel, sistem güvenirliliği ve enerji sürekliliği için ark arızaları önemli bir problem oluşturmaktadır. Ark flaş hesaplamaları ve tehlike analizlerinin uygun bir şekilde yapılması ile ark flaş patlamalarının zararları azaltılabilmektedir.

Uygun koruma sistemleri, çalışma koşulları ve kişisel koruyucu ekipmanlar ile ark flaş arızalarının yıkıcı etkisi azaltılabilmekte, doğru hesaplama yönteminin kullanılması ve doğru çözüm yöntemlerinin uygulanması ile de ark arızaları önlenebilmektedir. Modelleme ve analizlerle ark flaş arızası risk analizi yapılarak, sıkıntılı bölge veya noktalar belirlenip, optimum çözümler belirlenerek, sistem daha güvenli hale getirilebilmektedir.

2
Ark Arızaları

Elektik güç sistemlerinde meydana gelen arızalar, kesintilere sebep olmakta, enerji sürekliliğine ve ekipmanlara zarar vermekte, en önemlisi de çalışan personelin can güvenliğini ciddi manada tehdit etmektedir. Ayrıca, bu arızalar ekonomik olarak da büyük kayıplara sebep olmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde meydana gelen şiddeti ve yıkıcı etkisi en yüksek olan arızalardan biri ark arızalarıdır. Bu bölümde, ark arızaları ilgili açıklamalar yapılmış, ark olayının sebepleri ve etkileri belirtilmiştir. Ek olarak da ark arızaları ile ilgili literatürde yer alan ilgili standart ve yönetmelikler hakkında genel bilgi verilmiştir.

2.1 Ark Arızası Olayı

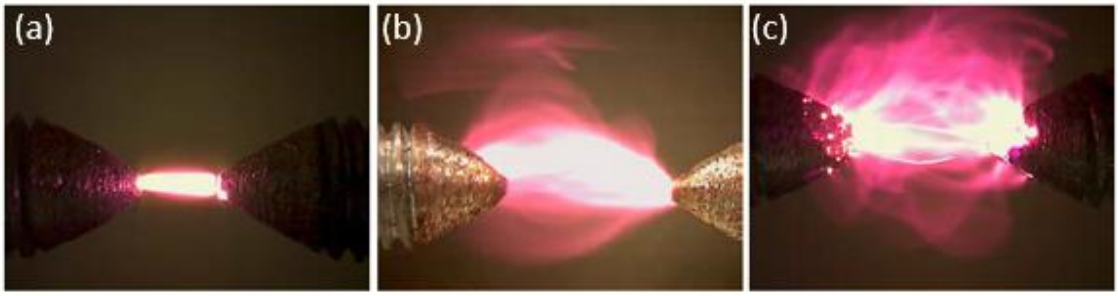
Ark olayı, hava veya gaz gibi izolasyon malzemesi içerisinde iki iletken arasında meydana gelen bir elektriksel boşalma olarak tanımlanabilir. Elektrik güç sistemlerinde çeşitli sebeplerden dolayı meydana gelen ark arızaları esnasında kontrol edilemeyen büyük bir enerji, tehlikeli bir basınç dalgası, uçuşan parçacıklar, termal enerji, ısı ve parlak ışık ortaya çıkar. Ark arızalarının bu etkilerinden dolayı literatürde “ark flaş” terimi sıklıkla kullanılmakta hatta bu etkileri daha iyi ifade edebilmek için “ark flaş patlaması” da denilmektedir [23].

Ark, normalde katodun hemen yakınında gazın iyonlaşma potansiyeline eşit bir gerilim düşüşü ile karakterize edilen, bir gazın içindeki elektriksel boşalma olarak tanımlanmaktadır. Çok fazla sayıda serbest elektron ve iyon nedeniyle iletken bir ortama dönüşen bir yalıtkan ortam boyunca sürekli olarak elektrik enerjisi akması şeklinde gerçekleşir. Ark, çeşitli biçimlerde, kompleks ve hareketli bir yapıdadır [21].

Kesici tasarımları ve dinamik analizler için ark olayı farklı şekillerde modellenmekte ve dinamik analizler için matematiksel denklemler

oluşturulmaktadır. Literatürde Cassie, Mayr, Lawrence, Matthews ve Kizilcay gibi birçok ark modeli vardır.

Şekil 2.1'de ark flaş patlamasının oluşum aşamaları gösterilmiştir.

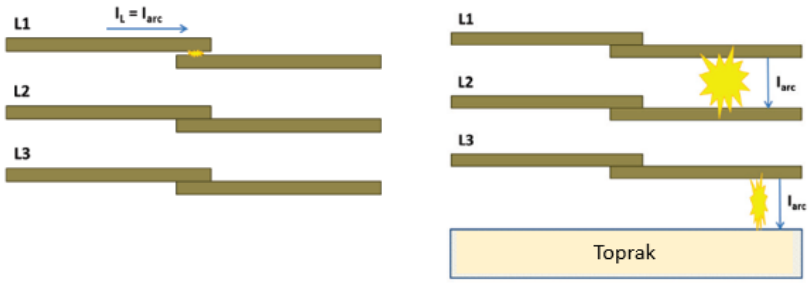


Şekil 2.1 Ark Patlaması Oluşum Aşamaları; a:Arkın Oluşumu, b:Termal Plazma, c:Ark Flaş Patlaması [17]

2.2 Ark Arızası Çeşitleri

Ark arızalarını sınıflandırmak oldukça zordur. Bazı yayınlarda alçak gerilim(<1kV) ve yüksek gerilim(>1kV) uygulamalarında meydana gelen arklar olarak incelenmektedir. Bazı çalışmalarda ise matematiksel olarak farklı denklemlerle dinamik olarak modellemektedirler. Ayrıca, seri ve paralel ark arızaları olarak da sınıflandırmak mümkündür.

Her ne kadar seri arklar tam olarak bir ark arızası olmasada, gevşek kontaklar arasında meydana gelen düşük enerjili ve yük akımına bağlı olan arklar olarak da tanımlanabilir. Seri arklar düşük akımından dolayı algılaması çok zor olan arızalardır. Güç sistemlerindeki arızalar denilince akla 2 veya daha fazla iletken arasında ya da faz toprak arasında gerçekleşen paralel ark arızaları gelir. Şekil 2.2'de seri ve paralel ark arızaları şematik olarak gösterilmiştir [23].



Şekil 2.2 Seri ve Paralel Ark Arızaları [23]

2.3 Ark Arızaları Oluşum Sebepleri

Ark arızalarının oluşmasına sebep olan birçok etken vardır. Arkın oluşmasında insan direk ya da dolaylı olarak en büyük etken iken oluşabilecek bazı arklardan doğru operasyon, planlama, bakım ve temizlik gibi önlemlerle kaçınılabilir. Ark arızalarına sebep olabilecek etkenlerin bir kısmı,

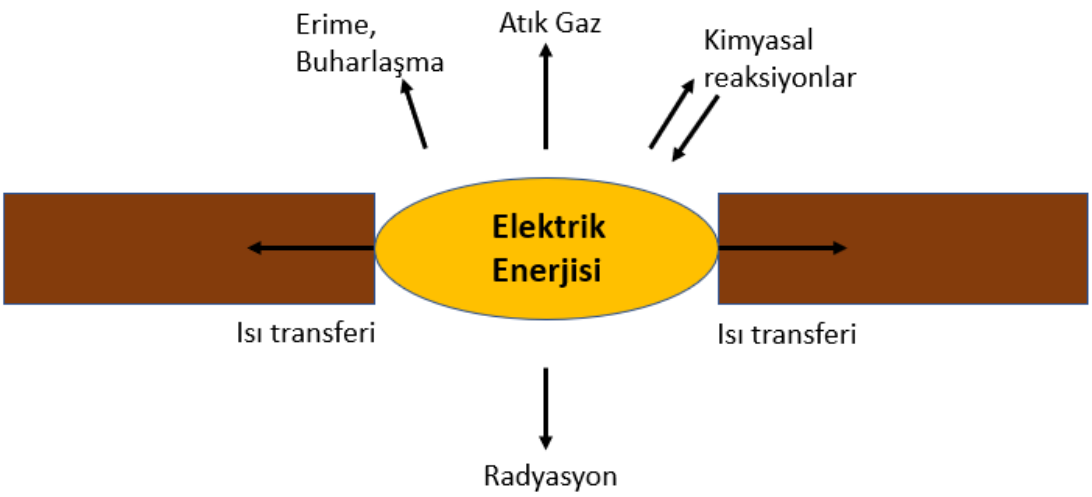
- İnsan etkisi,
- Unutulmuş aletler ve topraklamalar,
- Enerjili ekipmanlara ya da iletkene dokunulması,
- Yanlış tasarım veya kurulum,
- Yanlış ölçülendirme veya mesafe belirleme,
- Bağlantı kopması veya gevşek kontaklar,
- Yanlış ya da eksik anahtarlama ve manevralar,
- Titreşim, deprem,
- Aşırı gerilim,
- Kirlenme,
- Nem,
- Ekipmanların eskimesi ,
- Korozyon,
- Hayvanlar,
- Mekanik arızalar,

olarak ifade edilebilir.

2.4 Ark Arızalarının Etkileri

Ark flaş patlamaları esnasında büyük bir enerji ortaya çıkar. Bu enerji birçok olaya neden olup ark flaş patlamalarının zararlarını arttırmaktadır. Açığa çıkan enerji sebebiyle oluşabilecek olaylar Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Arkın meydana geldiği esnada ortaya çıkan ark flaş enerjisinden dolayı çok kısa bir sürede ciddi bir ısı ve radyasyon oluşmaktadır. Bu ısının etkisiyle de alüminyum veya bakır olan

iletkenler erimekte, parçalar kopmakta, kimyasal reaksiyon oluşmakta ve zararlı gazlar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.3 Ark Sırasında Enerji Transferi [23]

Ark flaş patlamalarının etkisi enerji transferi ile sınırlı kalmamakta ve daha büyük zararlara yol açmaktadır. Oluşan termal enerji sebebiyle sıcaklık 20000 Kelvin'e kadar yükselebilmekte, yangınlar çıkabilmekte, basınç etkisiyle kopan parçacıklar şarapnel etkisi oluşturabilmekte ve meydana gelen yüksek gerilim sebebiyle bu etkiler birbirini tetikleyerek artarak devam etmektedir [23].



Şekil 2.4 Ark Flaş Patlaması Örneği [19]

Ark flaş patlamaları ile ilgili vurgulanması gereken en önemli etkilerden biri de basınçtır. Basınçtaki artış, elektrotların buharlaşmasını tetikler. Örneğin, bakır

katıdan gaza dönüşürken hacmini 67000 kat arttırır [24]. Basınç etkisi aynı zamanda akciğerlerin zarar görmesine, işitme kaybına, beyinde travma oluşmasına ve kemiklerin kırılmasına neden olabilir. Ayrıca, uçuşan şarapnel parçalarının hızı da 1120 km/saat'e kadar çıkabilmektedir [25].

Ark flaş patlamalarının muhtemel olumsuz etkileri;

- Sıcak gaz, şarapnel ve radyasyon dolayısıyla oluşan ark yanıkları,
- Parlak ışıktan dolayı gözde hasar,
- Basınç dalgasından dolayı kulakta hasar,
- Basınç dalgasından dolayı akciğer çökmesi,
- Basınç dalgasından dolayı eklemler ve kemiklerde kırılma,
- Şarapnel parçalarından dolayı oluşan yaralar,
- Toksik gazların neden olduğu zehirlenme,
- Elektriksel şok,
- Psikolojik travma,
- Cihazlardaki ve yalıtkan malzemelerdeki hasar,
- Baraların tamamen buharlaşması,
- Sıcaklıktan ve basınçtan dolayı anahtarlama elemanlarının ve muhafazlarının zarar görmesi,
- Yangından dolayı oluşan zarar,
- Elektrik enerjisi kesintisinden kaynaklanan zarar,
- Üretim süreci kesintisinden kaynaklı ekonomik kayıp,
- Sağlık ve yasal harcamalar kaynaklı ekonomik zararlar,

olarak sıralanabilir.

2.5 Ark Arızaları İle İlgili Standartlar

Ark arızaları, etkileri ve korunma yöntemleri ile ilgili çalışmalar uzun yıllardır yapılmakta ve artarak devam etmektedir. İhtiyaçlara bağlı olarak farklı kurumlar tarafından farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde ark arızaları ile alakalı literatürdeki standartlar ve yönetmelikler açıklanmıştır.

Günümüzde ark arızaları ile ilgili olarak yürürlülükte olan uluslararası standartlar aşağıda sıralanmıştır;

- Occupational Safety and Health Administration (OSHA), (2004), "Personal Protective Equipment", OSHA.
- NFPA 70E®, Standard for Electrical Safety in the Workplace, 2015 Edition, NFPA (National Fire Protection Association).
- IEEE Std 1584™-2002, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.
- IEC 62271-200, High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV (2011).
- IEC TR 61641:2014, Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault.

Bu standartlar ile ilgili özet bilgi, bölümün devamındaki alt başlıklarda sunulmuştur.

2.5.1 OSHA Standartları

OSHA (U.S. Occupational Safety and Health Administration), hem işverenler hem de işçiler için çalışma alanındaki uygulamaları düzenlemektir. Bu uygulamalara elektrik çarpması ve doğrudan veya dolaylı olarak enerjili parçalara temas etmekten kaynaklanabilecek yaralanmaların önlenmesi dahildir. OSHA, enerjili sistemler üzerinde yapılacak işlerde, özel durumlar haricinde, enerjisinin kesilmesi, bölgenin ya da yerin kilitlenmesi ve uyarıcı işaretlerle etiketlenmesi gerektiğini belirtir [16].

1991'de elektriksel şok tehlikesine ek olarak ark flaş tehlikeside eklenmiştir, 1994'te çalışan personel tarafında giyilen kıyafetlerin ark flaş arızasının etkisini arttırmaması gerektiği belirtilmiştir [9].

2004 yılında yayınlanmış "OSHA-Personal Protective Equipment" standardı, kişisel koruyucu ekipmanlar; göz, yüz, baş ve ayak koruma ile ilgili ayrı ayrı geniş bilgiler içermektedir [26].

2.5.2 NFPA 70E Standardı

NFPA 70E (Standard for Electrical Safety in the Workplace by National Fire Protection Association) standardı enerjili ekipmanlarla çalışma konusunda ayrıntılı bilgiler sağlar. Enerjili sistemlerde çalışacak kalifiye kişinin tanımını, elektriksel güvenlik prosedürlerini ve risk değerlendirmelerini açıklar. Ayrıca, ark flaş sınırı gibi temel tanımlamaları içerir. Enerji seviyelerine göre kullanılması gereken kişisel koruyucu ekipmanları açıklar [27].

Bu standart ark flaş sınırı ve koruyucu ekipman seçimi için belirli değerler ışığında bir tablo yöntemi önerir. Fakat, bu yöntem tüm uygulamalar için yeterli değildir. Bu yüzden standart, ark flaş hesaplamaları için IEEE 1584'ü önerir. Bu tez çalışmasında NFPA 70E 2015 standardından faydalanılmıştır.

2.5.3 IEEE Standardı

IEEE Std 1584™-2002 (IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations) standardı ark flaş enerjisi ve ark flaş sınırı hesaplamaları için yöntem sunar. Bu yöntem 208 V ile 15 kV arasındaki sistemleri kapsar, 15 kV üstü sistemler için ise Lee Metotunu içerir [9].

Bu standart, yapılan test ve analizlere göre adım adım ark flaş analizi sürecini açıklar. Analizler ark flaş enerji seviyesi ve ark flaş sınırının (insanda 2.derece yanık oluştarabilecek 5 j/cm^2 enerji seviyesindeki sınır) belirlenmesi ile sona erer. Bu analiz, sadece ark arızasının termal etkisini ele alıp, basınç etkisini ele almamaktadır. Arkın termal etkisinin 4 temel parametreye bağlı olduğunu belirtmektedir; ark akımı, gerilim, çalışma mesafesi ve ark süresi [23].

3. Bölümde IEEE 1584-2002'de yer alan ark flaş hesaplama yöntemleri ayrıntıları ile açıklanmıştır.

2.5.4 IEC Standartları

IEC standartları, IEEE 1584 gibi ayrıntılı bir ark flaş enerji ve tehlike hesaplamaları içermemektedir. IEC 62271-200, 1-52 kV arası alternatif gerilimli sistemlerdeki kesicilerin gerekliliklerini belirten bu standart, kesiciler içerisinde dahili arkların

nerede oluşabileceği ve nasıl önlenebileceğini açıklar. Ayrıca, ark koruması ile ilgili önlemler ve önerileri de içerir. Işığa duyarlı sensörlerle koruma, diferansiyel bara koruma, akım sınırlama yaklaşımı ile koruma, hızlı algılama ve hızlı anahtarlama cihazları ile koruma ve anahtarlama tesisinde uzaktan çalışma gibi çözüm yöntemleri sunulmuştur [23].

Konu ile ilgili diğer IEC standartları ise;

- IEC TR 61641:2014 (Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies–Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault): Bu standart, dahili arklar için kesicilerdeki test koşullarını ayrıntıları ile belirleyen bir standarttır.
- IEC 62606:2013 (General requirements for arc fault detection devices): Ark arızalarını algıyan cihazlar için genel gereklilikleri açıklayan standarttır.
- IEC 61482:2009 (Live working – Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc): Arkın termal etkisine karşı koruyucu ekipmanları açıklayan standarttır.

olarak sıralanabilir.

3
Ark Flaş Arızası Hesaplama Yöntemleri

Bu bölümde öncelikli olarak IEEE'nin 1584-2002 standardında yer alan hesaplamalar ayrıntılı olarak açıklanmış, ardından standartta da yer alan Lee Metodu ayrı olarak belirtilmiştir [9]. Ayrıca, farklı yayınlarda yer alan diğer hesaplama yöntemlerinden de söz edilmiştir.

Tablo 3.1 Ark Flaş Hesaplama Yöntemleri

Ark Flaş Hesaplama Yöntemleri	Temel Özellikleri
IEEE 1584-2002 (Guide for Performing Arc Flash Calculations) [9]	208 V-15 kV; 3 faz; 50 Hz-60 Hz; 700 A-106 kA kısa devre akımı; 13 mm - 152 mm iletkenler arası mesafe olan sistemlerde ark flaş enerjisi ve ark flaş sınırı hesaplarında kullanılabilir.
Lee, (The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Flash Burns) [9]-[4]	600 V üzeri 3 fazlı sistemlerde açık ortamda(hava) gerçekleşen arklarda, ark flaş enerjisi ve ark flaş sınırı hesaplarında kullanılabilir. Daha çok 15 kV üstü uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

3.1 IEEE 1584-2002 Standardına Göre Hesaplama Yöntemi [9]

IEEE 1584-2002 standardı, ark flaş arıza akımı, açığa çıkan enerji ve bu enerji seviyelerine göre çalışma mesafelerinin hesaplama yöntemlerini belirleyen temel nitelikte bir standarttır.

Bu standart arıza akımı, gerilim seviyesi, arıza temizleme süresi, ekipman tipi, topraklama biçimi ve çalışma mesafesi verilerini esas alarak ark flaş hesaplamalarına olanak sağlar.

Standardın amacı 3 faz alternatif akım (AC) sistemlerinde ark flaş olayı enerjisinin ve ark flaş sınırlarının belirlenmesidir. Aynı zamanda, hesaplamaların yapılabilmesi için gerekli olan saha verilerinin analiz sürecini de kapsar. Tek faz alternatif akım sistemleri (AC) ve doğru akım (DC) sistemler bu standartta yer almamaktadır.

3.1.1 Analiz Süreçleri

Ark flaş tehlike analizi yapılırken, kısa devre hesaplamaları ve koruma ekipmanları koordinasyonu ile ilgili standartlar (IEEE 141-1993-Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Std 242-2001-Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems) da dikkate alınmalıdır.

3.1.1.2 Sistem Bilgilerinin Toplanması

Ark flaş hesaplamalarında en büyük iş yükü sistem verilerının toplanmasıdır. Öncelikle, sistemin tek hat şeması oluşturulmalı ve kısa devre hesaplarının yapılabilmesi için ihtiyaç duyulan tüm bilgiler bu şemaya işlenmelidir.

Kısa devre arızasına katkıda bulunan 37 kW üstü tüm motor ve jeneratörler, tüm transformatörler, iletim hatları, kablo bağlantıları, topraklama sistemleri, akım sınırlayıcı aletler, kondansatörler, tüm anahtarlama elemanları, motor kontrol merkezleri, panolar, koruma ekipmanları, sigortalar, fiderler vb. bilgiler şemada olmalıdır.

240 V gerilim altında çalışan aletler eğer 125 kVA gücünün üstünde değilse, hesaplamalarda dikkate alınmasına gerek yoktur.

Transformatör, jeneratör, kesici ve motorların etiketleri hesaplamalar için gerekli olan gerilim, akım, empedans, reaktans gibi bilgileri içermelidir. Yoksa teknik dokümanlardan ya da eski bakım-test raporlarından bu bilgiler elde edinilebilir.

3.1.1.3 Sistem Çalışma Modunun Belirlenmesi

Basit bir radyal dağıtım sisteminin sadece bir çalışma modu vardır. Fakat, daha kompleks sistemlerin birden fazla çalışma modu olabilir. Örnek olarak; bir veya birden fazla fiderin sistemde aktif olması, bir ünitenin veya motor kontrol merkezinin bir veya birden fazla fider ile beslenmesi, generatörün şebekeye paralel durumda çalışması ya da bekleme durumunda olması gibi birçok farklı çalışma durumu olabilir. Bu durumlar, kısa devre hesapları için büyük önem taşır.

3.1.1.4 Maksimum Arıza Akımının Belirlenmesi

İngilizce'de "bolted fault current" diye adlandıran akım bir noktada meydana gelebilecek maksimum arıza akımıdır. Yani, empedans veya direncin "0" olduğu andaki akımdır. Bu terimin kullanılmasının sebebi herhangi bir noktada meydana gelen arızada o noktadaki bir empedansın arıza akımını düşürücü etkisi olmasıdır.

3.1.1.5 Ark Arıza Akımının Belirlenmesi

Ark arıza akımı elektriksel plazmadan akan arıza akımı olarak tanımlanabilir. Ark arıza akımı, 1 kV altı sistemlerde ark empedansından dolayı maksimum arıza akımından daha düşüktür. Orta gerilim sistemlerinde de bu durum mevcuttur. Fakat, 15 kV üstü sistemlerdeki hesaplamalarda ark arıza akımı, maksimum arıza akımına eşit olarak alınabilir.

3.1.1.6 Koruma Ekipmanlarının Karakteristiğinin ve Ark Süresinin Bulunması

Ark flaş enerjisi hesaplamalarında ark süresi çok kritiktir. Bu yüzden, sistemdeki kesici veya sigortaların açma ve arıza temizleme süreleri çok önemlidir. Standartta verilen farklı gerilim seviyelerinde kesici açma süreleri Tablo 3.2'de sunulmuştur. Fakat, 2011 yılında yapılan değişiklik ile Tablo 3.2 standarttan kaldırılmıştır [28].

Tablo 3.2 Kesici Tipi ve Açma Süreleri [9]

Kesici Tipi	60 Hz de Açma Süresi(cycles)	Açma Süresi (sn)
Alçak Gerilim (<1 kV) [molded case (kalıp halinde)]	1,5	0,025
Alçak Gerilim (<1 kV) [insulated case (yalıtılmış halde)]	3,0	0,050
Orta Gerilim (1-35 kV)	5,0	0,080
Yüksek Gerilim (>35 kV)	8,0	0,130
*Bu tablo harici rölelerin operasyon zamanını içermez		

Günümüzde, ark flaş hesaplamaları için kullanılan programlarda aşırı akım koruma ekipmanlarının birçoğunun akım-zaman eğrileri mevcuttur. Eğer, bu eğri aralık bir değer gösteriyorsa en uzun süre ark süresi olarak kullanılmalıdır. Genel olarak hesaplamalarda 2 sn. maksimum ark süresi olarak düşünülebilir [28]. Bazı akım sınırlayıcı sigortaların ve alçak gerilim kesicilerin testleri bu standart çerçevesinde yapılmış ve basit hesaplama yöntemleri gösterilmiştir. Eğer, kullanılan aşırı akım koruma ekipmanları bunlardan biri ise bu basitleştirilmiş hesaplama yöntemleri direkt olarak kullanılabilir.

Ayrıca, sigortaların eğrisinde toplam arıza temizleme süresi için en kötü senaryo dikkate alınmalı, eğer toplam arıza temizleme süresi 10 ms altında gösteriliyorsa, ark süresi 10 ms olarak alınmalıdır. Kesici eğrilerinde kesici operasyon zamanı eklenmemişse, 5 ms kesici operasyon zamanı eklenmelidir [28].

3.1.1.7 Sistem Gerilim ve Ekipmanlarına Göre Bara Açıklığının Belirlenmesi

Sistem gerilim ve ekipmanlarına göre aşağıdaki tabloya istinaden bara açıklıkları belirlenmeli ve hesaplamalarda kullanılmalıdır.

Tablo 3.3 Ekipmanlara Göre Bara Açıklıkları [9]

Ekipman Sınıfları	Tipik Bara Mesafeleri [mm]
15 kV anahtarlama ekipmanı	152
5 kV anahtarlama ekipmanı	104
Alçak gerilim anahtarlama ekipmanı	32
Alçak gerilim motor kontrol merkezleri ve kumanda panoları	25
Kablo	13
Diğer ekipmanlar	Gerekli değil

3.1.1.8 Çalışma Mesafesinin Belirlenmesi

Ark flaş koruması, sürekli çalışan personelin başındaki ve gövdesindeki olay enerjisine göre belirlenir. El ve kollardaki enerji düzeyi dikkate alınmaz. Bu yüzden, çalışma mesafesi ark flaş enerjisinden yaralanmaları önlemek veya etkisini azaltmak için aşağıdaki tabloya göre belirlenmelidir [28].

Tablo 3.4 Ekipmanlara Göre Çalışma Mesafeleri [9]

Ekipman Sınıfları	Tipik Çalışma Mesafeleri [mm]
15 kV anahtarlama ekipmanı	910
5 kV anahtarlama ekipmanı	910
Alçak gerilim anahtarlama ekipmanı	610
Alçak gerilim motor kontrol merkezleri ve kumanda panoları	455
Kablo	455
Diğer ekipmanlar	Alana göre belirlenir
Tipik çalışma mesafesi, ekipmanın önünde duran çalışan ile ekipmanın önünden ekipman içindeki potansiyel ark kaynağına olan uzaklığın toplamıdır.	

3.1.1.9 Ark Flaş Olay Enerjinin Tüm Ekipmanlar İçin Belirlenmesi

Ark flaş analizi gerçekleştirebilmek, çalışma mesafelerini belirlemek, uygun koruma ekipmanlarını seçmek için ark flaş olay enerjisi standartta belirtilen ve ileriki bölümlerde anlatılan hesaplamalar ile veya bu hesaplamaları baz alan bilgisayar programlarından destek alınarak belirlenmelidir.

3.1.1.10 Ark Flaş Koruma Sınırlarının Belirlenmesi

Ark flaş koruma sınırlarını belirlemek için standartta verilen denklemlerle hesaplamalar yapılmalıdır. İnsanda 2. derece yanık oluşturabilecek ark flaş enerjisi 5 J/cm^2 (1,2 cal/cm^2) sınırı değeri baz alınarak ark flaş koruma sınırları belirlenmelidir.

3.1.2 Ark Flaş Hesaplamaları

IEEE 1584-2002 standardında belirtilen hesaplamalar aşağıdaki sistemler için tasarlanmıştır;

- 208 V-15000 V aralığındaki gerilim düzeyleri (3 faz),
- 50 veya 60 Hz frekanslar,
- 700 A-106000 A aralığındaki maksimum arıza akımları,
- Topraklanan bütün tipler veya topraklanmayan sistemler,

- Yaygın olarak bulunan ekipman muhafazaları,
- İletkenler arasındaki mesafenin 13 mm-152 mm olduğu sistemler,
- 3 fazlı arıza içeren sistemler.

3.1.2.1 Ark Arıza Akımının Hesaplanması

Ark arıza akımı, sistemin gerilim seviyesine göre aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

1 kV altı sistemler için ark arıza akımı;

$$\log I_a = K + 0.662 \log I_{bf} + 0.0966V + 0.000526G + 0.5588V \log I_{bf} - 0.00304G \log I_{bf} \quad (3.1)$$

ifadesi kullanılarak belirlenir.

1 kV ve üstü sistemler için ark arıza akımı;

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \log I_{bf} \quad (3.2)$$

yardımıyla belirlenir.

Baraların açıkta veya kapalı bir ortamda konumlanması 1 kV üstü sistemlerde hesaplamalarda bir fark yaratmamaktadır. Bu denklemlerde,

I_a: ark arıza akımı [kA],

K: -0,153 (açık ortamda oluşan arklar için) veya -0,097 (kapalı ortamda oluşan arklar için),

I_{bf} : maksimum arıza akımı, 3 faz kısa devre akımı (simetrik RMS) [kA],

V: sistem gerilimi [kV],

G: iletkenler arası açıklık [mm],

olarak tanımlanmıştır.

3.1.2.2 Ark Olay Enerjisinin Hesaplanması

Denklem 3.1 ve 3.2 yardımıyla I_a hesaplandıktan sonra ark olay enerjisinin hesaplanabilmesi için;

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \log I_a + 0.0011\ G \quad (3.3)$$

denklemi normalize edilmiş enerji içindir. Bu denklemde,

E_n: normalize edilmiş enerji [J/cm^2] (0,2 saniye ark zamanı ve ark noktasından kişiye uzaklığın 610 mm olduğu anda normalize edilmiş olan enerji),

K_1: -0,792 (açık ortamda oluşan arklar için) veya -0,555 (kapalı ortamda oluşan arklar için),

K_2: 0 (topraklanmamış veya yüksek dirençli toprak sistemler) veya -0,113 (topraklı sistemler),

G: İletkenler arası açıklık [mm],

olarak ifade edilmiştir.

$E_n = 10^{\log En}$ olduğundan ark olay enerjisi için denklem;

$$E = 4{,}184 \times C_f \times E_n \times \frac{t}{0{,}2} \times \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (3.4)$$

olarak verilmiştir. Burada,

E: ark enerjisi [J/cm^2],

C_f: hesaplama faktörü (V> 1 kV için 1, V<1 kV için 1,5),

E_n: normalize enerji yoğunluğu [J/cm^2],

t: ark süresi,

D: olası ark noktasından kişiye olan uzaklık [mm],

x: mesafe faktörü (Tablo 3.5),

olarak tanımlanmıştır.

Mesafe faktörü “x”, gerilim seviyesi, ekipman tipi ve iletkenler arası mesafeye bağlı olarak Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5 Ekipman Tipine Göre Belirlenen Mesafe Faktörü (x) [9]

Sistem Gerilimi [kV]	Ekipman tipi	İletkenler arası mesafe [mm]	Mesafe faktörü (x)
0,208-1	Açık hava	10-40	2,000
	Anahtarlama ekipmanı	32	1,473
	Motor Kontrol Merkezi ve paneller	25	1,641
	Kablo	13	2,000
>1-5	Açık hava	102	2,000
	Anahtarlama ekipmanı	13-102	0,973
	Kablo	13	2,000
>5-15	Açık hava	13-153	2,000
	Anahtarlama ekipmanı	153	0,973
	Kablo	13	2,000

3.1.2.3 Ark Flaş Koruma Sınırının Hesaplanması

Ark flaş koruma sınırı, ark flaş enerjisinin insanda 2. Derece yanık oluşturabilecek 5 J/cm^2 (1,2 cal/cm^2) değerine eşit olduğu mesafedir. Mesafe,

$$D_B = \left[4{,}184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0{,}2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)\right]^{\frac{1}{x}} \quad (3.5)$$

yardımıyla hesaplanır. Bu denklemde,

D_B: ark noktasından ark flaş koruma sınırına olan uzaklık [mm],

C_f: hesaplama faktörü (V> 1 kV için 1, V<1 kV için 1,5),

E_n: normalize enerji yoğunluğu [J/cm^2],

V: sistem gerilimi [kV],

E_B: ark flaş koruma sınırındaki olay enerjisi[J/cm^2] (5 J/cm^2),

t: ark süresi,

x: mesafe faktörü (Tablo 3.5),

I_{bf}: maksimum arıza akımı, 3 faz kısa devre akımı (simetrik RMS) [kA],

olarak ifade edilmektedir.

3.1.3 Akım Sınırlayıcı Sigortalar ve Alçak Gerilim Kesiciler

IEEE 1584 standardında ark flaş enerji hesaplamaları için Class L ve Class RK1 tipi akım sınırlayıcı sigortalar için 600 V ve 455 mm çalışma mesafesinde yapılan testler ile çeşitli formüller geliştirilmiş, farklı sigorta tipi ve akım sınırlarına göre ark flaş enerji hesaplamaları gösterilmiştir. Farklı tip sigortalar için aşağıda verilen denklemlerde;

I_{bf}: 3 faz için maksimum arıza akımı (Bolted Fault Current) [kA],

E: ark enerjisi [J/cm^2],

olarak kullanılmıştır.

3.1.3.1 1601 A – 2000 A Klas L Sigortalar İçin

Klass L tipi 1601 A-2000 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <22.6 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir. İlgili eşitlikler,

$$22.6\ \text{kA} \leq I_{bf} \leq 65.9\ \text{kA için } E = 4.184(-0.1284\ I_{bf} + 32.262) \quad (3.6)$$

$$65.9\ \text{kA} < I_{bf} \leq 106\ \text{kA için } E = 4.184(-0.5177\ I_{bf} + 57.917) \quad (3.7)$$

(I_{bf} >106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.3.2 1201 A – 1600A Klas L Sigortalar İçin

Klass L tipi 1201 A-1600 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <15.7 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir. İlgili eşitlikler,

$$15.7\ \text{kA} \leq I_{bf} \leq 31.8\ \text{kA için } E = 4.184(-0.1863\ I_{bf} + 27.926) \quad (3.8)$$

$$31.8\ \text{kA} < I_{bf} < 44.1\ \text{kA için } E = 4.184(-1.5504\ I_{bf} + 71.303) \quad (3.9)$$

$$44.1\ kA \leq I_{bf} \leq 65.9\ kA \text{ için } E = 12.3\ j/cm^2 \quad (3.10)$$

$$65.9\ kA < I_{bf} \leq 106\ kA \text{ için } E = 4.184(-0.0631\ I_{bf} + 7.0878) \quad (3.11)$$

(I_{bf}>106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.3.3 801 A – 1200 A Klas L Sigortalar İçin

Klass L tipi 801 A-1200 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <15.7 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir, . İlgili eşitlikler,

$$15.7\ kA \leq I_{bf} \leq 22.6\ kA \text{ için } E = 4.184(-0.1928\ I_{bf} + 14.226) \quad (3.12)$$

$$22.6\ kA < I_{bf} \leq 44.1\ kA \text{ için } E = 4.184(0.0143\ I_{bf}^2 - 1.3919\ I_{bf} + 34.045) \quad (3.13)$$

$$44.1kA < I_{bf} \leq 106\ kA \text{ için } E = 1.63\ j/cm^2 \quad (3.14)$$

(I_{bf}>106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.3.4 601 A – 800 A Klas L Sigortalar İçin

Klass L tipi 601 A-800 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <15.7 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir. İlgili eşitlikler,

$$15.7\ kA \leq I_{bf} \leq 44.1\ kA \text{ için } E = 4.184(-0.0601\ I_{bf} + 2.8992) \quad (3.15)$$

$$44.1\ kA < I_{bf} \leq 106\ kA \text{ için } E = 1.046\ j/cm^2 \quad (3.16)$$

(I_{bf}>106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.3.5 401 A – 600 A Klas RK1 Sigortalar İçin

Klass RK1 tipi 401 A-600 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <8.5 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir. İlgili eşitlikler,

$$8.5\ kA \leq I_{bf} \leq 14\ kA \text{ için } E = 4.184(-3.0545\ I_{bf} + 43.364) \quad (3.17)$$

$$14\ kA < I_{bf} \leq 15.7\ kA \text{ için } E = 2.510\ j/cm^2 \quad (3.18)$$

$$15.7\ kA < I_{bf} \leq 22.6\ kA \text{ için } E = 4.184(-0.0507\ I_{bf} + 1.3964) \quad (3.19)$$

$$22.6\ kA < I_{bf} \leq 106\ kA \text{ için } E = 1.046\ j/cm^2 \quad (3.20)$$

(I_{bf}>106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.3.6 201 A – 400 A Klas RK1 Sigortalar İçin

Klass RK1 tipi 201 A-400 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <3.16 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir. İlgili eşitlikler,

$$3.16\ kA \leq I_{bf} \leq 5.04\ kA \text{ için } E = 4.184(-19.053\ I_{bf} + 96.808) \quad (3.21)$$

$$5.04\ kA < I_{bf} \leq 22.6\ kA \text{ için } E = 4.184(-0.0302\ I_{bf} + 0.9321) \quad (3.22)$$

$$22.6\ kA < I_{bf} \leq 106\ kA \text{ için } E = 1.046\ j/cm^2 \quad (3.23)$$

(I_{bf}>106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.3.7 101 A – 200 A Klas RK1 Sigortalar İçin

Klass RK1 tipi 201 A-400 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <1.16 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir. İlgili eşitlikler,

$$1.16\ kA \leq I_{bf} \leq 1.6\ kA \text{ için } E = 4.184(-18.409\ I_{bf} + 36.355) \quad (3.24)$$

$$1.6\ kA < I_{bf} \leq 3.16\ kA \text{ için } E = 4.184(-4.2628\ I_{bf} + 13.721) \quad (3.25)$$

$$3.16\ kA < I_{bf} \leq 106\ kA \text{ için } E = 1.046\ j/cm^2 \quad (3.26)$$

(I_{bf}>106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.3.8 0 A – 100 A Klas RK1 Sigortalar İçin

Klass RK1 tipi 0 A-100 A aralığındaki akım sınırlayıcı sigortalar için maksimum arıza akımı değerlerine göre ark flaş enerjisi hesaplama formülleri;

I_{bf} <0.65 kA için zaman – akım eğrisi kullanılarak IEEE 1584'deki formüllere göre hesaplanabilir. İlgili eşitlikler,

$$0.65\ kA \leq I_{bf} \leq 1.16\ kA \text{ için } E = 4.184(-11.176\ I_{bf} + 13.565) \quad (3.27)$$

$$1.16\ kA < I_{bf} \leq 1.4\ kA \text{ için } E = 4.184(-1.4583\ I_{bf} + 2.2917) \quad (3.28)$$

$$1.4\ kA < I_{bf} \leq 106\ Ka \text{ için } E = 1.046\ j/cm^2 \quad (3.29)$$

(I_{bf}>106 kA ise bilgi için üreticiye başvurulması gereklidir.)

olarak standartta belirtilmiştir.

3.1.4 Alçak Gerilim Kesiciler

IEEE 1584 içerisinde, farklı tip alçak gerilim kesicileri için de hesaplama formülleri tablo halinde gösterilmiştir. Alçak gerilimde; kesici tipi, nominal akım ve gerilim seviyelerine göre hesaplama formülleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Alçak Gerilimde Kesici Tipi, Nominal Akım ve Gerilimlere Göre Arıza Enerjisi ve Ark Flaş Sınırı Hesaplamaları [9]

			<480 V		575-690 V	
Nominal Akım (A)	Kesici Tipi	Kesme Ünitesi Tipi	Arıza Enerjisi (J/cm2)	Ark Flaş Sınırı (mm)	Arıza Enerjisi (J/cm2)	Ark Flaş Sınırı (mm)
100-400	MCCB	TM veya M	$0.189I_{bf}$ + 0.548	9.16 I_{bf} + 194	0.271 I_{bf} + 0.180	11.8 I_{bf} + 196
600-1200	MCCB	TM veya M	0.223 I_{bf} + 1.590	8.45 I_{bf} + 364	0.335 I_{bf} + 0.380	11.4 I_{bf} + 369
600-1200	MCCB	E, LI	0.377 I_{bf} + 1.360	12.50 I_{bf} + 428	0.468 I_{bf} + 4.600	14.3 I_{bf} + 568
1600-6000	MCCB veya ICCB	TM veya E, LI	0.448 I_{bf} + 3.000	11.10 I_{bf} +696	0.686 I_{bf} + 0.165	16.7 I_{bf} + 606
800-6300	LVPCB	E, LI	0.636 I_{bf} + 3.670	14.50 I_{bf} +786	0.958 I_{bf} + 0.292	19.1 I_{bf} + 864
800-6300	LVPCB	E, LS	4.560 I_{bf} + 27.230	47.20 I_{bf} +2660	6.860 I_{bf} + 2.170	62.4 I_{bf} + 2930
MCCB: Kalıplı Kasa Devre Kesicisi (Molded-case circuit breaker) , ICCB: İzole Kasa Devre Kesicisi (Insulated-case circuit breaker) , LVPCB: Alçak gerilim devre kesicileri (low-voltage power circuit breakers)						
TM: Termal Manyetik Kesme Ünitesi (Thermal-magnetic trip units), M: Manyetik Kesme Ünitesi (Magnetic Trip Units), E: Elektronik Kesme Ünitelerinin 3 tip karekteristiği vardır (Electronic Trip Units) , L: Uzun-zamanlı (Long-Time), S: Kısa-Zamanlı (Short-Time), I: Ani(Instantaneous)						
I_{bf} : 455 mm çalışma mesafesindeki mak. arıza akımı [kA]						

3.1.5 IEEE 1584-2002'de Yapılan Analizlerin Özeti

IEEE 1584 standardında yapılan test çalışmaları ve anlatılan hesaplama yöntemi ile ilgili analizlerde yapılmıştır. Sonuçları kısaca özetlemek gerekirse;

- Ark akımı ilk olarak arıza akımına bağlıdır. Arıza noktasındaki iletkenler arası mesafe, sistem gerilimi ve topraklama çeşitlerinin etkisi oldukça küçüktür.
- Ark sonucu çıkan olay enerjisi, temel olarak ark akımına bağlıdır. İletkenler arasındaki mesafenin çok küçük bir etkisi vardır.
- Ark zamanının açığa çıkan olay enerjisi üzerinde doğrusal bir etkisi vardır.
- Sistem X/R oranı, frekans, elektrot materyali ve diğer değişkenlerin ark akımına, ark flaş enerjisine çok az bir etkisi vardır ve ihmal edilebilir.
- Ark ile ısı ölçer(kalorimetre) arasındaki mesafe, kutu boyutuna bağlı olarak üstel olarak ters bir etki gösterir.
- Sistem topraklamasının, ark sonucu açığa çıkan enerjinin hesaplamasında R-square(belirleme katsayısı)'na %1 oranında olumlu etkisi vardır.

3.2 Lee Metodu

Lee Metodu uzun yıllar boyunca ark flaş hesaplamaları konusundaki tek metod olarak literatürdeki yerini korumuştur. En büyük handikabı, özellikle 1 kV altı sistemler için önemli olan ark akımı hesaplama yöntemi sunmamasıdır. Ayrıca, kapalı ortamda oluşan arklar içinde bir hesaplama yöntemi sunmaması, özellikle 1 kV üstü sistemlerdeki hesaplamalar için diğer bir dezavantajıdır. Bu metot, IEEE 1584 standardında da belirtildiği gibi daha çok 15 kV üstü, açık ortamlardaki sistemlerde ve iletkenler (baralar) arası mesafenin IEEE 1584'te belirtilen mesafeden büyük olduğu durumlarda(G>152mm) kullanılır. IEEE 1584'te belirtilen Lee Method'una göre hesaplama bağlantıları aşağıda verilmiştir.

Ark olay enerjisi,

$$E = 2{,}142 \times 10^{6} \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^{2}}\right) \tag{3.30}$$

ile hesaplanır. Burada;

E: ark enerjisi [J/cm^2],

V: sistem gerilimi [kV],

t: ark süresi,

D: olası ark noktasından kişiye olan uzaklık [mm],

I_{bf}: maksimum arıza akımı, 3 faz kısa devre akımı (simetrik RMS) [kA],

olarak ifade edilmektedir.

Ark flaş koruma sınırının hesaplanması için;

$$D_B = \sqrt{2{,}142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)} \quad (3.31)$$

denklemi kullanılır. Burada;

D_B: ark noktasından ark flaş koruma sınırına olan uzaklık [mm],

V: sistem gerilimi [kV],

E_B: ark flaş koruma sınırındaki olay enerjisi[J/cm^2] (5 J/cm^2),

t: ark süresi,

I_{bf}: maksimum arıza akımı, 3 faz kısa devre akımı (simetrik RMS) (kA),

olarak kullanılmıştır.

IEEE 1584 de 15 kV üstü uygulamalarda ark flaş hesaplamaları için verilen denklemlere ek olarak Raph Lee'nin "The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Flash Burns" adlı bu alanda yapılmış ilk çalışmalardan olan yayınında yer alan diğer bağlantılarda aşağıda verilmiştir [4].

I_{bf} maksimum arıza akımı, 3 faz kısa devre akımı [A], V [Volt] , $\%Z$ transformatörün MVA'sı baz alınarak Denklem 3.32 ile hesaplanabilir [27].

$$I_{bf} = [\ \text{MVA Base} \times 10^6 \div 1{,}732 \times V\ ] \times (100 \div \%Z\ ) \quad (3.32)$$

3 faz arıza akımlarındaki güç ise,

$$P = 1.732 \times V \times I_{bf} \times 10^{-6} \times 0.707^2 \quad (3.33)$$

denklemi ile hesaplanır. Burada;

P: mak. 3 fazlı arıza akımı hesabındaki güç [MW]
olarak ifade edilmiştir.

Mesafeler için ise,

$$D_c = [2{,}65 \times MVA_{bf} \times t\ ]^{1/2} \quad (3.34)$$

$$D_c = [53 \times MVA \times t\ ]^{1/2} \quad (3.35)$$

denklemeleri kullanılır. Burada,

D_c: personelin ayak hizasının ark kaynağından iyileştirebilir yanık seviyesi için (insan derisinin 80°C altında olması) uzaklığı (2. Derece yanık uzaklığı),

MVA_{bf}: Arıza noktasındaki maksimum arıza akımındaki güç [MVA],

MVA: transformatörün MVA değeri (0,75 MVA altındaki transformatörler için MVA cinsinde güç değeri 1,25 ile çarpılarak denkleme yerleştirilmelidir),

t: ark süresi (maksimum 2sn),

olarak kullanılmıştır.

3.3 Diğer Metotlar

3.3.1 600 V Altı Sistemler İçin Hesaplama Yöntemi

R. L. Doughty, T.E. Neal ve H.L. Floyd'un "Predicting Incident Energy to Better Manage the Electrical Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems" adlı çalışmalarında 600 V altı ve arıza akımı 16 kA ile 50 kA arasında olan sistemlerde kullanılabilecek hesaplama yöntemleri sunulmuştur [8].

Ark flaş enerji hesaplamaları için tipik çalışma mesafeleri;

- 600V ve altı motor kontrol merkezlerinde ve panolarda 455mm (18 in.)

- 600V ve altı kesicilerde 610 mm (24 in.)

- 600 V üstü orta gerilim kesicilerde 910 mm (36 in.)

olarak verilmiştir.

Açık ortamda meydana gelen ark için olay enerjisi;

$$E_{MA} = 5271 \text{ x } D^{-1,9593} \text{ x } t_A \text{ x } [0,0016\ F^2 - 0,0076\ F + 0,8938] \quad (3.36)$$

denklemi yardımıyla hesaplanır.

Kapalı ortamda meydana gelen ark için olay enerjisi (tek taraftan açık, her noktaya uzaklığı 20 in. olan kübik bir ortam için);

$$E_{MA} = 1038,7 \text{ x } D^{-1,4738} \text{ x } t_A \text{ x } [0,0093\ F^2 - 0,3453\ F + 5,9675] \quad (3.37)$$

denklemi yardımıyla hesaplanır. Bu denklemlerde;

E_{MA}: ark enerjisi [cal/cm^2],

D: ark elektrotlarından uzaklık (18 in. veya daha fazla),

F: kısa devre akımı [kA] (16 kA-50 kA arası),

olarak kullanılmıştır.

3.3.2 Doğru Akım(DC) Sistemler için Hesaplama Yöntemi

D.Doan'ın yapmış olduğu" Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems" adlı çalışmaya göre DC sistemler için ark flaş enerji hesaplamaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir. Bu metot 1000 V'a kadar olan sistemler için geçerlidir [29].

Ark akımı ve ark enerjisi;

$$I_{ark} = 0{,}5 \text{ x } I_{bf} \tag{3.38}$$

$$E_m = 0{,}01 \text{ x } V_{stm} \text{ x } I_{ark} \text{ x } T_{ark} / D^2 \tag{3.39}$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada,

I_{ark}: ark akımı [A],

I_{bf}: sistemin mak. arıza akımı [A],

E_m: mak güç noktasında tahmini dc ark flaş enerjisi [cal/cm^2],

V_{stm}: sistem gerilimi [V],

T_{ark}: ark süresi [s],

D: çalışma mesafesi [cm],

olarak ifade edilmiştir.

Eğer ark, kutu gibi kapalı bir sistemde gerçekleşirse, oluşabilecek ark enerjisini 3 ile çarpmak bize tahmini bir sonuç verebilir.

Ayrıca, DC sitemlerde oluşan ark modellenmesi ve ark enerjisini ile ilgili diğer bir çalışmada [30]'da yapılmıştır. Bu çalışmada doğru akımlı sistemlerde meydana gelen arkı farklı şekillerde modellenerek yapılan test sonuçları ayrıntıları ile gösterilmiştir.

4
Ark Flaş Arızaları Önlemleri ve Çözüm Yöntemleri

Elektrik güç sistemlerinde çeşitli sebeplerden dolayı kısa devre sonucu meydana gelen ark arızaları esnasında kontrol edilemeyen bir enerji, ısı, basınç, ışık oluşur. Bazı durumlarda arıza sonucu yanan, kopan şarapnel parçalarının uçuşması ve toksik gaz oluşumu ark flaş arızaları etkilerini arttırmaktadır.

Ark arızalarının bu zararlı etkileri ile risklerini azaltmak ve ark arızalarını önlemek için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler, aktif-pasif ve ark öncesi-sonrası uygulanabilecek yöntemler olarak ayrıştırılabilmektedir.

Tablo 4.1 Ark Önleme ve Çözüm Yöntemleri

	Ark Öncesi	**Ark Sonrası**
Aktif	Ark Tahmini Yöntemleri	Ark Hızlı Algılama ve Ark Süresi Azaltma Yöntemleri
Pasif	Ark Önleyici ve Koruyucu Yöntemler	Ark Enerjisini Azaltma ve Akım Sınırlama Yöntemleri

Ark flaş arızaları önleme, çözüm ve söndürme yöntemleri;

- Ark önleyici ve koruyucu yöntemler,
- Ark tahmini yöntemleri,
- Ark enerjisini azaltma ve akım sınırlama yöntemleri,
- Ark hızlı algılama ve ark süresi azaltma yöntemleri,
- Ark söndürme,
- Ark arızaları çözüm yöntemleri genel değerlendirme,

olarak alt başlıklarda açıklanmıştır.

Ark öncesi aktif algılama algılama ve ark tahmini yöntemleri, ark oluştuktan sonra arkın hızlı algılanıp arkın çabuk söndürülmesi için de kullanılmaktadır.

4.1 Ark Önleyici ve Koruyucu Yöntemler

4.1.1. Eğitim

Birçok arızada insanoğlu direk ya da dolaylı olarak en büyük etkendir. Bu yüzden elektrik güç sistemlerinde çalışan personelin eğitimi ve uyması gereken kuralların ilgili standartlara göre belirtilmiş olması alınabilecek en temel önlemlerdendir. Ayrıca, bir önceki bölümde belirtilmiş olan ark flaş enerji ve çalışma mesafesi hesaplamaları göz önüne alınarak çalışanlar bilinçlendirilmeli, NFPA 70E standardında yer alan işletme ve bakım kriterleri ve süreçleri hakkında çalışanlar eğitilmelidir.

Genel olarak ekonomik kaygılarla eğitim konusu geri plana atılıyor olsa da ark flaş arızaları sonucunda ortaya çıkan zararın etkisi daha yıkıcı olmaktadır. Bu yüzden eğitime gerekli önem verilmelidir.

4.1.2 Tasarım

Bir sistemde oluşabilecek ark arızalarının önlenmesindeki en önemli aşama tasarım esnasında doğru ekipman seçimi ve sistem tasarımıdır. Bağlantı noktaları, konnektör gibi anahtarlama elemanları, transformatörler ve kesiciler gibi metal muhafazalı cihazlardaki parçalar dahili ark oluşmasına çok müsait elemanlardır. Bu yüzden, tasarım ve doğru eleman seçimi ark arızalarının önlenmesinde çok etkindir. Örneğin, ilgili standartlara uygun olarak tasarlanmış bir anahtarlama elemanının kullanılmasıyla mekaniksel olarak henüz tasarım aşamasındayken bile ark flaş patlamalarının olası etkilerini önleyici ve koruyucu önlemler alınabilir.

Bir anahtarlama tesisin ark dayanıklı olabilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması beklenmektedir [31];

- Kapılarının veya kapaklarının kapalı olması ve kolay açılmaması gereklidir.
- Ark flaş patlaması esnasında parçaların tehlike oluşturabilecek şekilde kopup savrulmaması ve tüm topraklama bağlantılarının aktif kalması gereklidir.
- Herhangi bir delik, temassızlık, gevşek kontak, vs. olmamalıdır ve kolay yanıcı parça içermemelidir.

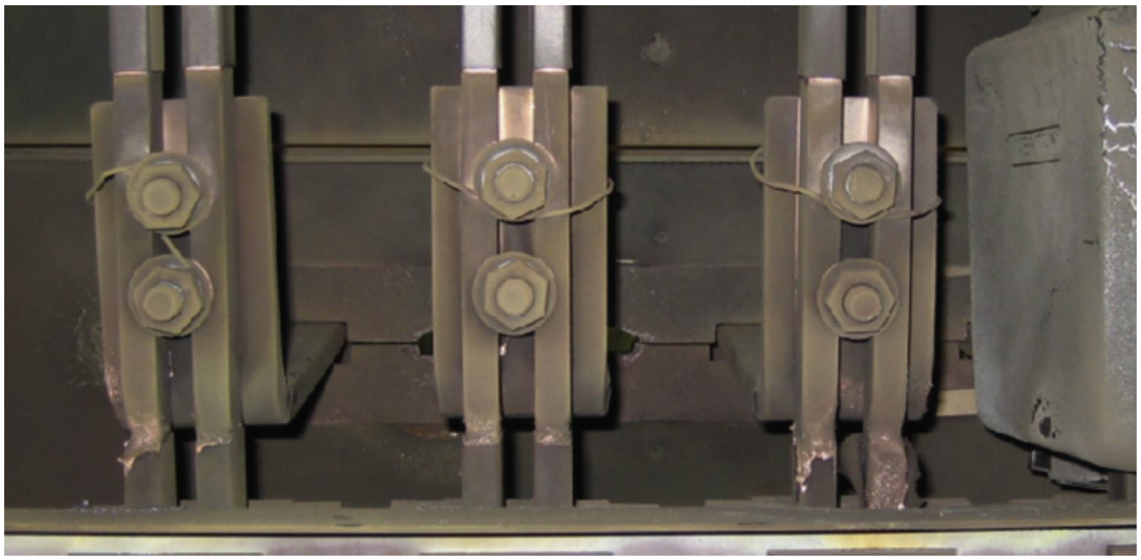
4.1.3 Büyük Değerli Bir Direnç ile Topraklama

Sistemi yüksek değerli bir direnç ile topraklamak, faz toprak arızalarında ark arızasını önleyici bir teknik olarak kullanılabilir. Özellikle alçak gerilim sistemlerinde kullanılan bu direnç sayesinde faz toprak arızası esnasında çıkan enerji bu direnç üstünde harcanarak azaltılır. Bu yöntem, sadece faz toprak arızalarında işe yarar ve bir sonraki faz toprak arızası oluşmadan bu arızanın temizlenmesi gerekir. Aksi halde, arıza faz-faz arızasına dönüşür. Direnç ile arıza akımı belirli bir değerde sınırlandırılabiliyor olsa da, birçok arıza faz-toprak arızası olarak başlayıp kısa sürede 3 faz arızasına dönüşebildiği için tek başına yeterli bir yöntem olarak kabul edilemez [32].

4.1.4 İletkenin Yalıtılması veya Çıplak İletken

İletkenlerin ve baraların yalıtılmış olması ilk aşamada ark arızalarının önlenmesi için kesin olması gereken bir şeymiş gibi dursa da, bu konu hakkında farklı görüşler hakimdir. Temel olarak iletkenlerin yalıtılmış olması bir objenin düşmesi sonucu oluşabilecek arızaları ve bir faz arızasının kolayca fazlar arasına dönüşmesini engellemesi dolayısıyla faydalı bir uygulamadır denilebilir. Fakat, arızanın yalıtkan malzeme boyunca yavaşça devam edip yanması daha büyük bir zarara yol açabilir [33].

Öte yandan yalıtkanlı kısımdan sonra bağlantı noktalarındaki çıplak kısımlarda arkın boyutu ve etkisi artarak daha fazla zarar verebilir. Şekil 4.1'de bu duruma örnektir [34]. (U:726 V, I_k:77 kA, t_{ark}:65 ms)



Şekil 4.1 İletkenin Yalıtkansız Kısmında Erime [34]

4.1.5 Bakım

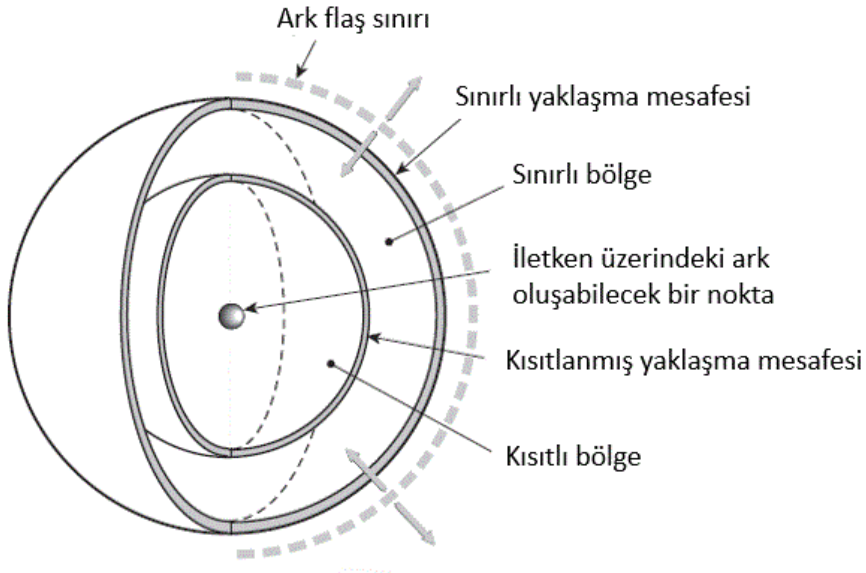
Elektrik güç sistemlerinde ve ekipmanlarında düzenli ve doğru yapılan bakımlar sayesinde ark arızaları ve olası etkileri önlenebilir. Görsel incelemeler, termal ölçümler, kısmi boşalma testleri ve düzenli koruma elemanları testleri önleyici bakım uygulamalarından bazılarıdır. Ayrıca, ekipmanların eskimeye, korozyona, kire ve titreşimlere karşı da önleyici bakım uygulanması oldukça önemlidir. Özellikle gelişen teknoloji ile ekipmanların mevcut durumu da anlık takip edilerek, gerekli bakımları yapılabilir [34].

4.1.6 Çalışma Mesafesinin Belirlenmesi

Ark flaş hesaplamaları bölümünde IEEE 1584 standardına ve diğer standartlara göre ark flaş enerjisi ve çalışma mesafeleri hesaplamaları ayrıntıları ile gösterilmiştir. Bu bölümde ise NFPA 70E 2015 standardına göre tehlike sınır bölgeleri açıklanarak, tablo yöntemine göre bu değerlerin belirlenmesi anlatılmıştır.

NFPA standardının amacı, elektrik enerjisinin kullanımından kaynaklı oluşabilecek riskler için çalışanlara pratik ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamaktır. Bu standart elektriksel uygulamalarda iş güvenliği, bakım ve özel ekipmanlar için ayrıntılı güvenlik ve prosedürlerle ilgili bilgiler içermektedir.

Ayrıca, elektriksel arızaların oluşma ihtimalini azaltmak için çalışma sınır değerlerini, uyarıcı etiketleri ve kişisel koruyucu ekipmanlarını belirleyici yöntemleri açıklar.



Şekil 4.2 Tehlike Sınır Bölgeleri [27]

Şekil 4.2'de gösterilen bölgeler ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

Ark Flaş sınırı (Arc flash boundary): Ark flaş enerjisinin 5 j/cm^2 (1,2 cal/cm^2) olduğu mesafe, ark flaş sınır mesafesi olarak tanımlanmaktadır. Belirtilen mesafe eğitimli veya eğitimsiz herhangi bir personelin kişisel koruyucu ekipmanı olmadan enerjili bölgeye yaklaşabileceği maksimum mesafedir. Bu mesafe sistemin gerilimi, arıza akımı ve ark süresine bağlı olarak değişen bir mesafedir. Hesaplamalar ile ilgili bölümde belirtilen ark flaş çalışma mesafesini belirten sınırı ifade eder.

Sınırlı yaklaşma mesafesi (Limited approach boundary): Sınırlı yaklaşma mesafesi, eğitimsiz personelin yaklaşabileceği maksimum mesafedir, özel izinli durumlarda eğitimsiz personelin sınırlı yaklaşma bölgesinde veya sınırında çalışmak zorunda olduğu durumlarda eğitimli personel ona eşlik etmeli ve onu olası tehlikelere karşı uyarmalıdır.

Kısıtlanmış yaklaşma mesafesi (Restricted approach boundary): Kısıtlanmış yakınlaşma sınırı, sadece eğitimli personelin özel durumlarda kişisel koruyucu

ekipmanı ile aşabileceği mesafedir. Kısıtlanmış bölgede oluşabilecek elektrik arkından kaynaklı ciddi manada bir risk vardır [27].

Bu mesafeler, NFPA 70E'ye göre Alternatif Akım (AC) sistemleri için Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilen değerler dikkate alınarak belirlenebilir.

Tablo 4.2 Alternatif Akım (AC) Sistemlerde Sınırlı ve Kısıtlanmış Yaklaşma Mesafesi Belirleme Tablosu [27]

Sistem Nominal Gerilimi (Fazlar arası)	Sınırlı yaklaşma mesafesi		Kısıtlanmış Yaklaşma mesafesi
	Hareket edebilen iletken	Sabit iletken	
<50 V	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
50 V-150 V	3 m	1 m	Temastan kaçının
151 V-750 V	3 m	1 m	0,3 m
751 V-15 kV	3 m	1,5 m	0,7 m
15.1 kV-36 kV	3 m	1,8 m	0,8 m
36.1 kV-46 kV	3 m	2,5 m	0,8 m
46.1 kV-72.5 kV	3 m	2,5 m	1 m
72.6 kV-121 kV	3,3 m	2,5 m	1 m
138 kV-145 kV	3,4 m	3 m	1,2 m
161 kV-169 kV	3,6 m	3,6 m	1,3 m
230 kV-242 kV	4 m	4 m	1,7 m
345 kV-362 kV	4,7 m	4,7 m	2,8 m
500 kV-550 kV	5,8 m	5,8 m	3,6 m
765 kV-800 kV	7,2 m	7,2 m	4,9 m

Tablo 4.3 Alternatif Akım (AC) Sistemlerde Kişisel Koruyu Ekipmanların (PPE) ve Ark Flaş Sınırı Belirlenmesi için Tablo [27]

Ekipman	Ark Flaş Kişisel Koruyucu Ekipman(PPE) Kategorisi	Ark Flaş Sınırı
Panolar veya diğer ekipmanlar: <240 V mak. kısa devre akımı: 25 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.03 sn çalışma mesafesi: 455 mm	1	485 mm
Panolar veya diğer ekipmanlar: 240 V-600 V mak. kısa devre akımı: 25 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.03 sn çalışma mesafesi: 455 mm	2	900 mm
Motor Control Merkezleri: 600 V mak. kısa devre akımı: 65 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.03 sn çalışma mesafesi: 455 mm	2	1,5 m
Motor Control Merkezleri: 600 V mak. kısa devre akımı: 42 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.33 sn çalışma mesafesi: 455 mm	4	4,3 m
Kesici, kontrol panoları: 600 V mak. kısa devre akımı: 35 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.5 sn çalışma mesafesi: 455 mm	4	6 m
Diğer ekipmanlar: 600 V mak. kısa devre akımı: 65 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.03 sn çalışma mesafesi: 455 mm	2	1,5 m
NEMA E2 motor yol vericisi: 2.3 kV-7.2 kV mak. kısa devre akımı: 35 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.24 sn çalışma mesafesi: 910 mm	4	12 m
Metal kaplı kesici: 1kV- 15 kV mak. kısa devre akımı: 35 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.24 sn çalışma mesafesi: 910 mm	4	12 m
Ark dayanımlı kesiciler Tip1 veya Tip2:1kV- 15kV mak. kısa devre akımı: 35 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.24 sn çalışma mesafesi: 910 mm	Kapısı kapalı: uygulanamaz Kapısı açık: 4	Kapısı kapalı: uygulanamaz Kapısı açık: 12 m
Diğer ekipmanlar: 1kV- 15 kV mak. kısa devre akımı: 35 kA mak. arıza temizleme süresi: 0.24 sn çalışma mesafesi: 910 mm	4	12 m

Şekil 4.3’de uygun çalışma mesafesinde doğru ekipman ile çalışan bir personel gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Çalışan Personelin Uygun Çalışma Mesafesinde Doğru Ekipman ile Müdahele Örneği [35]

Doğru Akım (DC) sistemler için, NFPA 70E’ye göre Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’te sistem gerilim değerlerine bağlı olarak yaklaşma mesafeleri verilmiştir.

Tablo 4.4 Doğru Akım (DC) Sistemlerde Sınırlı ve Kısıtlanmış Yaklaşma Mesafesi Belirleme Tablosu [27]

Sistem Nominal Gerilimi (Fazlar arası)	Sınırlı yaklaşma mesafesi		Kısıtlanmış Yaklaşma mesafesi
	Hareket edebilen iletken	Sabit iletken	
<50 V	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
100 V-300 V	3 m	1 m	Temastan kaçının
301 V-1 kV	3 m	1 m	0,3 m
1.1 kV-5 kV	3 m	1,5 m	0,5 m
5 kV-15 kV	3 m	1,5 m	0,7 m
15.1 kV-45 kV	3 m	2,5 m	0,8 m
45.1 kV-75 kV	3 m	2,5 m	1 m
75.1 kV-150 kV	3,3 m	3 m	1,2 m
150.1 kV-250 kV	3,6 m	3,6 m	1,6 m
250.1 kV-500 kV	6 m	6 m	3,5 m
500.1 kV-800 kV	8 m	8 m	5 m

Tablo 4.5 Doğru Akım (DC) Sistemlerde Kişisel Koruyu Ekipmanların (PPE) ve Ark Flaş Sınırı Belirlenmesi için Tablo [27]

Ekipman		Ark Flaş Kişisel Koruyucu Ekipman (PPE) Kategorisi	Ark Flaş Sınırı
Bataryalar, DC Anahtarlama elemanları ve diğer DC kaynaklar 100-250 V mak. ark süresi 2 sn çalışma mesafesi 455 mm	Kısa devre akımı <4 kA	1	900 mm
	Kısa devre akımı 4 kA- 7 kA	2	1,2 m
	Kısa devre akımı 7 kA- 15 kA	3	1,8 m
Bataryalar, DC Anahtarlama elemanları ve diğer DC kaynaklar 100-250 V mak. ark süresi 2 sn çalışma mesafesi 455 mm	Kısa devre akımı 1.5 kA	1	900 mm
	Kısa devre akımı <4 kA	2	1,2 m
	Kısa devre akımı 4 kA- 7 kA	3	1,8 m
	Kısa devre akımı 7 kA- 15 kA	4	2,5 m

Ek olarak havai hatlarda çalışan personel, 50 kV'a kadar olan sistemlerde minimum 3 m mesafede, daha yüksek gerilimli sistemlerde ise her 10 kV için 10 cm daha uzak bir mesafede bulunmalıdır [27].

Ayrıca, gelişen teknoloji ile birlikte uzaktan kontrol ekipmanlarının kullanılması ile özellikle operasyonel ve izleme işlemleri için tehlike oluşturabilecek ekipmanlardan uzak durulması güvenliği artırabilecek yöntemlerden biridir. Bu sayede, anahtarlama işlemleri uzaktan yapılarak, insan hatası ile meydana gelebilecek arızaların etkilerinin önüne geçilmiş olur [11].

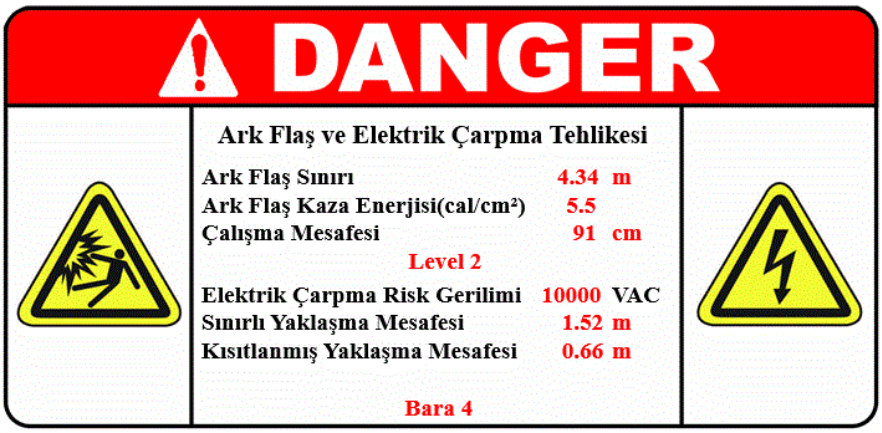
4.1.7 Uyarıcı Etiketler

Elektrik panoları, kontrol panelleri, motor kontrol merkezleri gibi elektrik ekipmanlarında ark flaş tehlikelerine karşı uyarıcı etiketlerle önleyici önlemler alınmalıdır. NFPA 70E 2015 standardında belirtilen bu etiketler aşağıdaki bilgileri içermelidir;

1. Sistemin nominal gerilimi,
2. Ark flaş sınırı,
3. Bunlardan en az birisi;
   a. Ark flaş enerjisi ve çalışma mesafesi veya kişisel koruyucu ekipman kategorisi,
   b. Kişisel koruyucu ekipmanlar için minimum ark seviyesi,
   c. Sisteme özel kişisel koruyucu ekipman bilgisi.

Ayrıca, etiketler görünür bir yerde ve kolay okunabilir olmalıdır [27].

Şekil 4.4'te ark flaş uyarıcı etiket örneği gösterilmiştir. Bu örnek etikette; sistemin gerilimi, ark flaş enerjisi, kişisel koruyucu ekipman seviyesi, çalışma ve ark flaş sınırı görülebilmektedir.



Şekil 4.4 Ark Flaş Uyarıcı Etiket Örneği

4.1.8 Kişisel Koruyucu Ekipmanlar (PPE)

Çalışma mesafesinin belirlenmesi bölümünde NFPA 70E standardına göre ark flaş kişisel koruyucu ekipman kategorileri ve çalışma mesafeleri tablo yöntemi verilmiştir. Bu bölümde ise, tabloda belirtilen kategorilere göre kişisel koruyucu ekipmanların nasıl olması gerektiği belirtilmiştir. Kişisel koruyucu ekipmanlar arkın meydana getirebileceği zararın azaltılmasında çok önemli bir faktördür. Personel, ark flaş kategorisine uygun ekipmanlara sahip iken çalışmasını gerçekleştirmelidir.

Şekil 4.5'de uygun kişisel koruyucu ekipmanıyla çalışan bir personel gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Kişisel Koruyucu Ekipmanlı Personel Örneği [12]

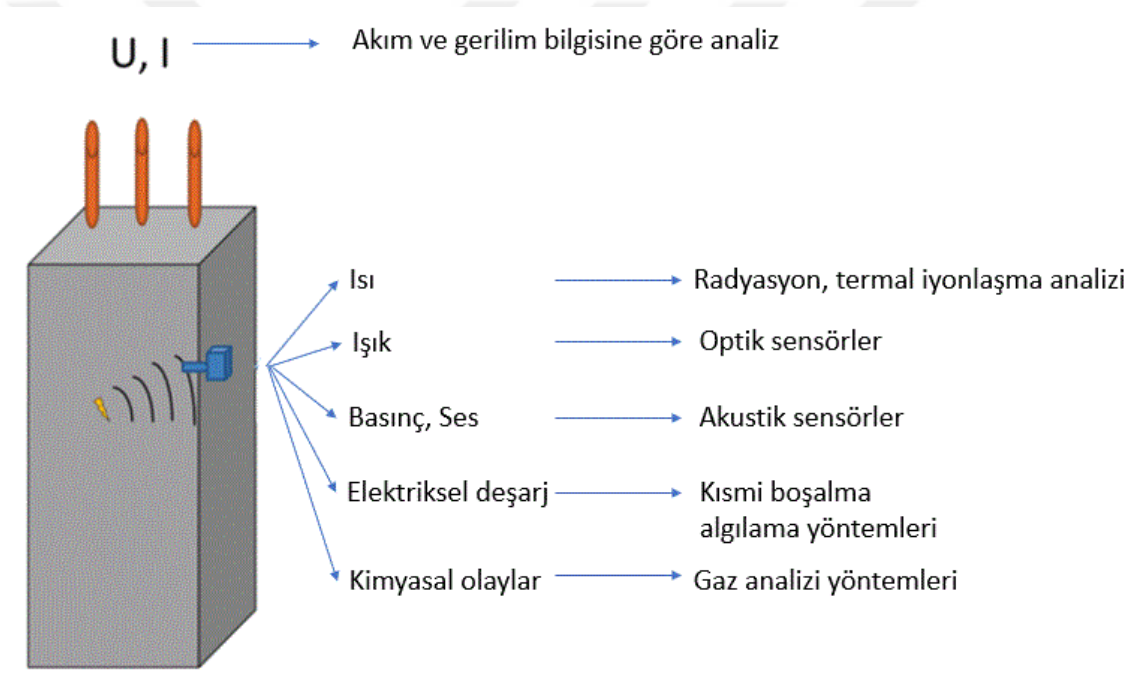
Tablo 4.6'da ark flaş enerji seviyesine göre belirlenmiş olan kategoriler için kişisel koruyucu ekipmanların gerekliliği belirtilmiştir.

Tablo 4.6 Ark Flaş Kategorisine Göre Kişisel Koruyucu Ekipmanlar [27]

Kişisel Koruyucu Kıyafet veya ekipman tipi	Ark Flaş Kişisel Koruyucu Ekipman (PPE) Kategorisi			
	1 (4 cal/cm2)	2 (8 cal/cm2)	3 (25 cal/cm2)	4 (40 cal/cm2)
Ark'a dayanıklı uzun kollu gömlek	x	x	x	x
Ark'a dayanıklı uzun kollu ceket			x	x
Ark'a dayanıklı pantolon	x	x	x	x
Ark'a dayanıklı özel pantolon			x	x
Ark'a dayanıklı tulum			x	x
Ark'a dayanıklı başlık		Gerektiğinde	x	x
Yüz koruyucu	x	x	x	x
Koruyucu gözlük	x	x	x	x
Baret, kask	x	x	x	x
Kulak koruyucu	x	x	x	x
Koruyucu eldiven	x	x	x	x
Deri ayakkabı	Gerektiğinde	x	x	x

4.2 Ark Tahmini Yöntemleri

Ark öncesi aktif koruma ark arızalarının önceden tahmin edilmesi ile sağlanır. Bağlantı kopması ya da yalıtkanın bozulması ark arızaları için en temel sebeplerdir. Bunların algılanması ark tahmini için çok önemlidir. Günümüzde gelişen teknoloji, sistemi anlık olarak takip edip olası ark arızalarını önlemeyi mümkün kılmaktadır. Bu bölümde, akım ve gerilim analizleri ile arkı önceden tahmin etmenin yolları açıklanmıştır. Ayrıca, sensörler ve diğer yöntemlerle de ark tahmin etme yöntemleri belirtilmiştir. Arkı tahmin edebilmek için anahtarlama elemanlarında meydana gelen kısmi boşalmalar, Şekil 4.6'da gösterilen yöntemlerle algılanabilir.

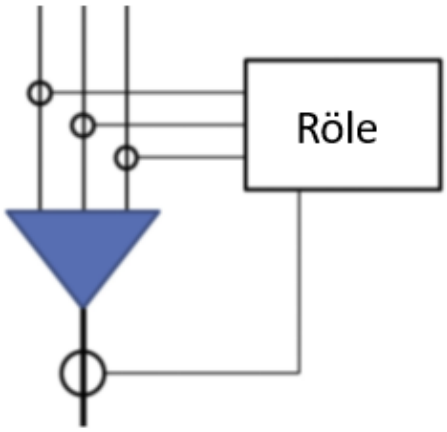


Şekil 4.6 Muhtemel Arkları Algılama Yöntemleri [23]

4.2.1 Akım ve Gerilim Bilgisine Göre Arkın Belirlenmesi

Bir sistemde faz akımları sürekli olarak ölçüldüğü ve analiz edildiği için akım bilgisi ile oluşabilecek ark arızalarını tahmin etmek oldukça faydalı olacaktır. Bu amaçla yapılan çalışmalar alçak gerilim sistemlerindeki 3. 5. ve 7. harmoniklerin analiz edilerek ark tahmini için kullanılabileceğini göstermiştir. Fakat, bu metot tek başına bir ark tahmini yapabilmek için yeterli değildir [36].

Topraksız veya nötrü kompanze edilmiş orta gerilim sistemlerinin sıfır sequence gerilimindeki değişimler oluşabilecek toprak arızası için işaret verebilmektedir. Bu işaret birçok uygulamada yüksek dirençli toprak arızalarının önceden belirlenmesinde kullanılmaktadır. Fakat, bu yöntem arızanın yeri hakkında bir bilgi vermediği için kablo bağlantı noktalarındaki akım farklılıklarından yararlanılarak yapılan arıza belirleme yöntemi ile kombine edilebilir. Şekil 4.7'de bunun prensip şeması gösterilmiştir [37].



Şekil 4.7 Kablo Bağlantı Noktalarındaki Akım Farklılıklarının Analizi [37]

4.2.2 Ark Arızası Belirleme İçin Diğer Metotlar

Elektriksel verilerle yapılan ark arızası belirleme yöntemlerine ek olarak fiziksel verilere dayalı birçok yöntem vardır. Bu yöntemler ağırlıklı olarak anahtarlama elemanlarının içerisine veya bulunduğu bölgeye yerleştirilen çeşitli sensörlere ihtiyaç duyarlar. [38] ve [39] kaynaklarında ayrıntıları ile anlatılan anahtarlama tesislerindeki arkları önceden belirleme yöntemlerinde kullanılan fiziksel belirtiler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

a) Elektromanyetik emisyon: Kismi boşalma(PD) darbeleri, dielektrik malzemenin yüzeyinde veya içinde akım dalgalanmalarına neden olur. Yüklü parçacıkların bu ivmesi, RF frekansı (3 kHz–300 GHz) bölgesinde elektromanyetik emisyon üretir. Kismi boşalmanın RF sinyali ile algılanması giderek yaygınlaşan bir teknoloji olmuştur [40].

Bağlantının kopması esnasında yük akımı, kıvılcım çıkmasına ve havada iyonizasyon oluşmasına neden olabilir. Kısmi boşalma ve korona da iyonizasyona sebep olabilir. [41]'de gaz izoleli kesicilerde, kısmi boşalma ölçme tekniği ile ark arıza tahmini ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

b) Akustik (ultrasonik) emisyon: Kısmi boşalma aynı zamanda elektriksel ekipmanlarda mekaniksel titreşime de sebep olur. Bu titreşimin bir sonucu olarak ultrasonik spektrum aralığında bir akustik sinyal yayılır. 10 Hz-300 kHz aralığındaki bu titreşimler akustik sensörlerle algılanabilir [42].
c) Optik emisyon: Kısmi boşalma esnasında çeşitli iyonizasyon süreçleri sonucunda optik ultraviyole (UV) sinyalleri ortaya çıkar. Her materyal bu olayların sonucunda farklı dalga boylarında ışık yayar ve yayılan ışık çeşitli optik sensörlerle algılanabilir [34].
d) Termal emisyonlar (kızılötesi emisyon ve termal iyonizasyon): Isınma olayları daha çok gevşek kontakların direncinin artmasından ve seri arkların kötü kontaklarda meydana gelmesinden dolayı oluşmaktadır. İyonlaşma, atomların uyarılması ve kısmi boşalmalar da termal emisyonlara neden olur. Bu olaylara bağlı olarak üretilen ısı, elektromanyetik radyasyonun kızılötesi spektrum aralığındadır ve çeşitli termal sensörlerle algılanabilir [34].
e) Kimyasal emisyon: İyonizasyon işlemi sırasında nötr bir madde veya molekül, elektronları kaybeder veya kazanır, böylece net bir yük elde edilir. Bu iyonlar, kısmi boşalmanın yan ürünü olarak adlandırılan bir molekülü üretmek için diğer atomların iyonları ile birleşir. Kısmi boşalmanın hava yalıtımlı hücrelerde en yaygın yan ürünleri ozon ve nitrojen oksittir. Nem ve su molekülleri ile reaksiyona girdiklerinde nitrik asit oluştururlar [43]. Nitrik asit aşındırıcıdır ve kontaklar ile dielektrik malzeme ve izolatörlerde ciddi hasara neden olabilir. Yalıtım malzemesinin kimyasal yapısının ayrışmasında büyük rol oynar. Bu kimyasal değişiklikler, arkın tahmin edilmesinde kullanılabilecek belirtilerdendir.

4.2.3 Sensor Teknolojileri

Bu bölümde ark arızalarını önceden belirleyebilmek için kullanılan sensör teknolojileri ile ilgili bilgiler verilmiştir [34]-[23].

a) RF Anten: Anten tipi sensörler, yüksek frekans aralığında (HF / VHF / UHF) kısmi boşalmanın algılanması için yaygın olarak kullanılır, ucuz ve küçüktür. Sadece kismi boşalma kaynağının yakınında doğru çalışır, yöne ve yansıyan sinyallere de duyarlıdır.
b) Kuplaj kondansatörü: Kuplaj kondansatörleri, kısmi deşarj enerjisini elektrik şebekesinden ölçüm ayarlarına aktarmak için kullanılır. Bazen akım veya gerilim ölçümü için yakınlık sensörleri olarak da kullanılırlar. En büyük dezavantajı, 50/60 Hz'lik anma gerilim seviyesine dayanacak şekilde tasarlanması ve yüksek frekanslı cevaba sahip olması için düşük endüktansa sahip olacak şekilde imal edilmelerinin gerekmesidir; aynı zamanda da yüksek maliyetlidirler.
c) Yüksek frekanslı akım transformatörü (HFCT): HFCT'nin çalışma prensibi normal 50/60 Hz akım transformatörü ile aynıdır. Kısmi deşarjlar, deşarj akımına orantılı bir akım oluşturur. HFCT sensörü, taşınabilirlik, maliyet etkinliği ve izine ihtiyaç duymaması nedeniyle güç sistemlerinde birçok uygulama için en popüler endüktif sensörlerden biridir. Fakat, maliyetleri yüksektir.
d) Rogowski bobini: Hava çekirdekli bir indüksiyon sensörüdür, kısmi deşarjın neden olduğu akım darbelerinin ölçüleceği iletken etrafına yerleştirilir. Değişen akım, bobinde gerilim endükler. Rogowski bobinleri, istenilen frekans için tasarlanabilir, kolay kullanilabilir ve dış müdahalelerden kolay etkilenmezler.
e) Piezoelectric ultrasonic sensör: Piezoelektrik sensörler, hava yalıtımlı hücrelerde kısmi deşarjı algılayabilen yönlü sensörlerdir. İzolasyondaki dahili deşarjların ürettiği ultrason sinyallerini algılarlar. Bu sinyaller ancak yalıtım ve hava yoluyla zayıflatılabilir. Ayrıca, yüzeylerde oluşan kısmi boşalmaları algılayabilen bu sensörler, ucuz ve kolay kullanıma sahiptir. Fakat,

piezoelektrik sensörler düşük hassasiyet ve yönlülükleri nedeniyle dahili kısmi deşarj tespiti için optimal cihazlar değildir.

f) Ultraviyole sensör: Yalıtkan malzemeler veya gevşek kontaklardaki kısmi deşarjları algılayabilen ultraviyole sensörler, ultraviyole ışığa karşı duyarlıdır. Bu tekniğin tek başına uygulanması, diğer ışık kaynaklarının varlığı dolayısıyla hatalı çalışmaya neden olabilir.

g) Termal sensör: Birçok farklı çeşit termal sensör vardır. Bazı sensörler malzemenin direnç değişimi prensibi ile çalışırken, diğerleri ısı nedeniyle elektron yayınımı ile çalışır. Bu tür sensörler daha az hassastır. Bu sensörler yalıtkan malzeme ile temas halinde tutulursa, ark tarafından üretilen aşırı ısı nedeniyle kendilerini eritebilir. Daha uzak bir mesafede tutulurlarsa, sıcak noktanın sıcaklığını doğru bir şekilde algılayamazlar, aksine sadece etrafındaki havanın sıcaklığını hissedebilirler. Bu yüzden doğru konumlandırılmaları çok önemlidir. Ayrıca, ısı nedeniyle yayılan kızılötesi radyasyonu ölçebilen termal kameralar ve kızılötesi sensörlerde vardır. Kızılötesi termal sensörler, gevşek kontaklar ve kısmi deşarjlar nedeniyle oluşan sıcak noktayı bulmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat, termal kameralar IR (Infrared Radiation) çok pahalıdır ve çevrimiçi durum izleme için uygulanması pratik değildir.

Tablo 4.7'de algıladıkları olay ve kullanıldıkları gerilim seviyesine bağlı olarak sensörler hakkında özet bilgi verilmiştir.

Tablo 4.7 Sensör Teknolojileri Kullanımı [34]

Algılanılabilen Olay	Sensörler	Kesici Tipi
Elektromanyetik emisyonlar	RF Anten	OG
Akustik(ultrasonik) emisyonlar	Piezoelectric ultrasonic sensör	OG
Ultraviyole emisyonlar	Optik sensörler	OG
Yüksek frekanslı kısmi boşalma darbeleri	Yüksek frekanslı akım trafosu(HFCT)	OG
Termal emisyonlar	Termakupl, termal kamera	OG, AG
Kimyasal emisyonlar	Analizör	OG, AG
Elektriksel farklılıklar	Elektriksel diferansiyel sensörler	OG

4.3 Ark Enerjisini Azaltma ve Akım Sınırlama Yöntemleri

Önleyici veya öngörücü önlemler tüm ark hatası risklerini ortadan kaldıramaz. Doğrudan insan etkisi veya ekipman arızası gibi nedenler ciddi arızalara neden olabilir. Bu nedenle, ark oluşmasından sonra tespit edilen arklara gerekli tepkinin verilmesinin gerekliliği reaktif korumanın önemini göstermektedir. Bununla birlikte, geleneksel aşırı akım koruma sistematiği yavaş çalıştığından ark flaş arızalarında oldukça yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden, uzun ark süresine ve yüksek enerji açığa çıkmasına yol açar. Bu bölümde ark etkisini azaltıcı pasif yöntemlerden olan; ark enerjisini azaltma, ark akımını azaltma ve sınırlama yöntemlerinden bahsedilmiştir.

4.3.1 Ark Flaş Enerjisi Azaltılması

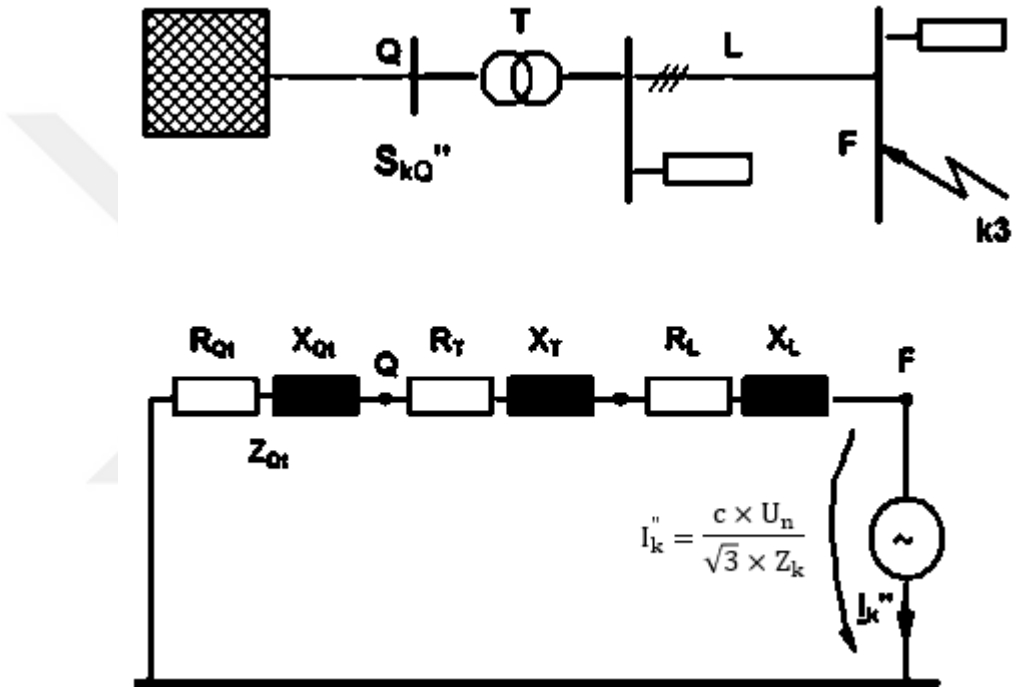
Ark flaş enerjisinin hesaplanmasının birincil amacı çalışanlar için güvenli çalışma bölgelerinin ve kişisel koruyucu ekipmanların (PPE) belirlenmesidir. Ayrıca, ark-flaş enerji hesaplamaları potansiyel hasar hesaplamaları ve farklı koruma yaklaşımlarını karşılaştırılırken kullanılabilir. Teorik olarak arkın etkisini azaltmak için ark sonrası açığa çıkan ark flaş enerjisinin azaltılması gereklidir. Bölüm 3'te ark-flaş enerjisi ile ilgili hesaplamalar ayrıntıları ile açıklanmıştır.

Ark flaş enerjisi temel olarak gerilim, çalışma mesafesi, ark akımı ve ark süresine bağlıdır. Uygulamada değiştirilebilen temel faktörler ark akımı ve ark süresidir. Çünkü, sistem gerilimi ve çalışma mesafesi kolaylıkla değiştirilebilen faktörler değildir. Önleyici amaçla veya ark flaş enerjisinin etkisini azaltma amacıyla, çalışma mesafeleri uyarı ve işaretlerle belirtilerek kontrol amaçlı alarm sistemleri kullanılabilir [16].

Bazı koruma yaklaşımları arıza akımının sınırlandırılması ile bazıları ise ark süresinin azaltılması ile ark-flaş enerjisinin azaltılmasına yoğunlaşmaktadır.

4.3.2 Ark Akımının Azaltılması

Ark arızası, oldukça değişken bir yapıdadır. Ark süresi boyunca ark uzunluğu değişir, ark direnci de sabit değildir. Ayrıca, bunlar ark akımının belirlenmesi sırasındaki tek belirsizlik değildir. Ark akımı, maksimum arıza akımına (bolted current) bağlıdır. Bu akım, birçok etken ve arıza noktasına göre değişkenlik gösterir. En yüksek ark-flaş enerjisi en büyük ark akımında oluşmamaktadır. Daha küçük arıza akımlarında, arıza temizlenme süresi uzadığında daha büyük bir enerjinin ortaya çıkmasıyla karşılaşılabilmektedir.



Şekil 4.8 Örnek Bir Sistemde Kısa Devre Akımı Hesaplanması [34]

Şekil 4.8'de örnek bir sistemde F noktasında gerçekleşen arıza için, arıza eşdeğer devresi ve arıza akımı hesaplama denklemi verilmiştir. Buna göre kısa devre akımı;

$$I_k^{"} = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times Z_k} \tag{4.1}$$

denklemi ile elde edilmektedir.Bu ifade de,

c: gerilim faktörü (0.95, 1, 1.05, 1.10),

U_n: fazlar arası gerilim [V],

Z_k: kısa devre empedansı [ohm]

olarak tanımlanmıştır.

Hesaplamalarda şebekenin empedansı çok önemlidir. Şebekenin arıza akımına katkısı her zaman ulaşılabilir olmayabilir. Bu yüzden hesaplamalarda şebeke sonsuz bir iletken gibi düşünülüp dikkate alınmakta ve bu durum minimum arıza akımının tahmininde yanlışlıklara yol açmaktadır. Şebeke ya da kaynak empedansı sistemdeki değişikliklerden ve bağlı olan jeneratörlerin değişmesinden dolayı farklılık gösterir.

Şebekenin kısa devre gücünün arıza akımına orta gerilim sistemlerinde ciddi bir etkisi var iken, alçak gerilim(<1kV) sistemlerinde OG/AG Trafosunun yüksek empedansından dolayı etkisi oldukça küçüktür [44].

Ayrıca, [44] numaralı çalışmada şebekenin kısa devre gücünün ve empedansının arıza akımına olan etkisi farklı sistemlerde örnek hesaplamalar ile gösterilmiştir. Şebeke sonsuz bir iletken gibi düşünülerek, şebekenin gerçek kısa devre gücünde ve ark akımının maksimum arıza akımının yarısı olduğu düşünülerek yapılan hesaplamalar karşılaştırılmıştır. Şebekenin kısa devre gücü bilinmediğinde, maksimum arıza akımında ve maksimum arıza akımının yarısında enerji hesaplamalarının yapılması tavsiye edilmiştir.

4.3.3 Ark Flaş Korumasında Akım Sınırlama Yaklaşımı

Ark akımının sınırlandırılması, ark süresinin önemli derecede etkilenmemesi koşuluyla ark-flaş enerjisinin azalmasını sağlar diyebiliriz. Fakat, bu daha düşük ark akımının daha yüksek bir ark flaş enerjisine yol açabileceği gerçeğini değiştirmez.

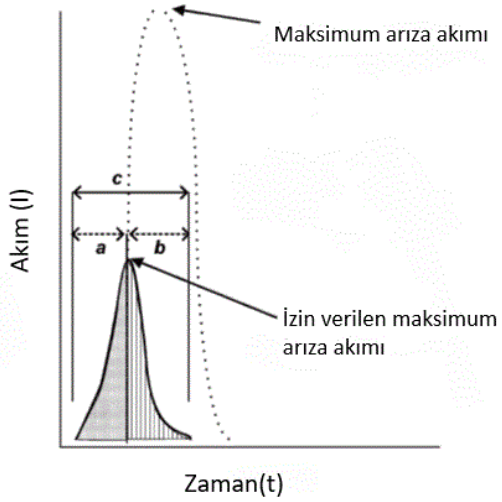
Ark arızasının her zaman bir empedansı vardır. Bu yüzden, maksimum arıza akımından küçüktür. Yüksek gerilim uygulamalarında ark empedansı çok küçük olduğundan neredeyse maksimum arıza akımına eşittir. Fakat, 1 kV altı alçak gerilim uygulamalarında ark önemli bir empedansa sahiptir ve maksimum arıza akımından küçüktür. [45]'de yapılan çalışma ark akımının, maksimum arıza

akımının %20 ile %40 arasına kadar düşebileceğini göstermiştir. [46] ise maksimum %33'üne kadar düşebileceğini ifade etmektedir.

Ark akımının azaltılmasının etkisi incelenirken, ark süresi ve ark-flaş enerjisinin durumu dikkate alınmadan bir çalışma yapılmamalıdır. Örneğin, aşırı akım koruma sistemi ters aşırı akım koruma eğrisine sahip ise yüksek arıza akımlarında açma süresi düşük akımlara göre oldukça kısadır.

Sistemde büyük güçlü tek bir transformatör kullanmak yerine, küçük güçlü ve daha çok sayıda transformatör kullanılarak arıza akımı azaltılabilir. Ayrıca, akım sınırlayıcı reaktör kullanılarak da sistem empedansı arttırılarak arıza akımı azaltılabilir. Fakat, bunlar ek maliyetlere ve kayıplara yol açmaktadır [23].

Akım sınırlama yaklaşımı için en uygun metot akım sınırlayacı sigortaların (current limiting fuse) kullanılmasıdır, bu sayede hem akım sınırlanır hem de ark süresi azaltılabilinir. Bu sigortalar çok hızlı bi şekilde arızayı temizleyerek arızanın maksimum değerine ulaşmasını engeller. Şekil 4.9'da bu tip sigortaların çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Akım Sınırlayıcı Sigortaların Çalışma Prensibi [47]

Akım sınırlayıcı sigortaların işleyişi arıza akımı seviyelerine bağlıdır. Eğer arıza akımı, akım sınırlayıcı sigortanın çalışma aralığında ise ark flaş enerjisinin, basınç dalgasının ve hatta yüksek arıza akımın neden olduğu mekanik gerilmenin azaltılmasında çok etkilidir.

Akım sınırlama veya ark süresinin kısaltılması ile arkın basınç etkisi de minimize edilebilir. 5 ms'lik ark süresi, basınç dalgasının pik değerine ulaşmaması için hedeflenen ark süresi olarak değerlendirilebilir. Çünkü basınç dalgasında azalma ses dalgasında da azalma sağlayarak hem işitme hem de ark sonucu uçuşan parçalardan dolayı oluşacak zararı azaltır [18].

Akım sınırlayıcı sigortaların, yüksek arıza akımlarında çok iyi bir çözüm olduğu söylenebilir. Çünkü koruma koordinasyonuna etkileri düşük akımlardakine göre daha azdır. Fakat, düşük arıza akımlarında koruma sisteminin doğru bir şekilde arızaya cevap vermemesi riski oldukça yüksektir. Ayrıca, akım sınırlayıcı sigortalar ile ilgili düşük akım nedeniyle yüksek olay enerjisi riski de oldukça yüksektir.

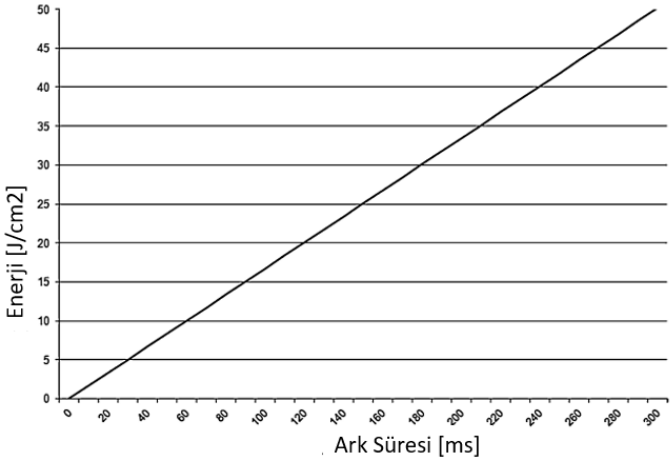
Sonuç olarak akım sınırlama yaklaşımı ark arızalarının etkisini azaltmada ark süresi ve ark enerjisi ile ilgili birçok risk ve belirsizlik içerir. Burada belirtilen ve belirtilmeyen arıza akımı sınırlama yöntemlerinin kullanımı/seçimi için detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir.

4.4 Ark Hızlı Algılama ve Ark Süresi Azaltma Yöntemleri

Ark öncesinde arkı tahmin edebilmek için kullanılan sensör teknolojileri, ark oluştuktan sonra pro-aktif olarak arkı kısa sürede temizleyebilmek için de kullanılmaktadır. Bu sensör teknolojileri ile aşırı akım tabanlı koruma sistemleri birlikte entegre koruma sistemleri oluşturarak da ark süresini azaltıp, ark flaş enerjisini ciddi manada düşürebilmektedirler.

Şekil 4.10'da görüleceği üzere, ark flaş enerjisi, ark süresi ile doğru orantılıdır. Ark flaş enerjisinin azaltılması konusunda ark süresinin kısaltılması en önemli seçeneklerden biri olmuştur. Bu konu hakkındaki çeşitli teknolojiler [11]'da sunulmuştur.

Ark süresi hesap edilirken, arkın belirlenmesi, rölenin komut göndermesi ve kesicinin açma sürelerinin toplamından bahsedildiği unutulmamalıdır.

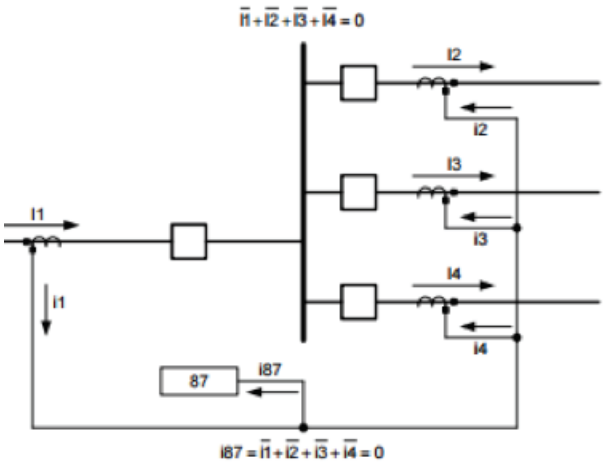


Şekil 4.10 Ark Enerjisinin Ark Süresine Bağlı Değişimi (U:15 kV, I_k:50 kA, G:152 mm, D:910 mm) [34]

4.4.1 Bara Diferansiyel Koruma

Kirchoff yasasına göre bir düğüme ya da bir baraya bağlı akımların vektörel toplamı sıfırdır. Şekil 4.11'de de görüldüğü gibi diferansiyel koruma sistemi çok basitçe baraya giren akımlarla çıkan akımları karşılaştırır. Bu akımlar arasındaki herhangi bir farkın önceden tanımlı eşik değeri geçmesi sonucunda barada arıza olduğu anlaşılır ve açma komutu verilir. Güç sistemlerindeki baraların diferansiyel korunmasında kullanılan bu yöntemde; baraya bağlanan tüm fiderlere akım trafosu bağlantısı yapılır ve bu akım trafoları üzerinden aradaki fark izlenir [48].

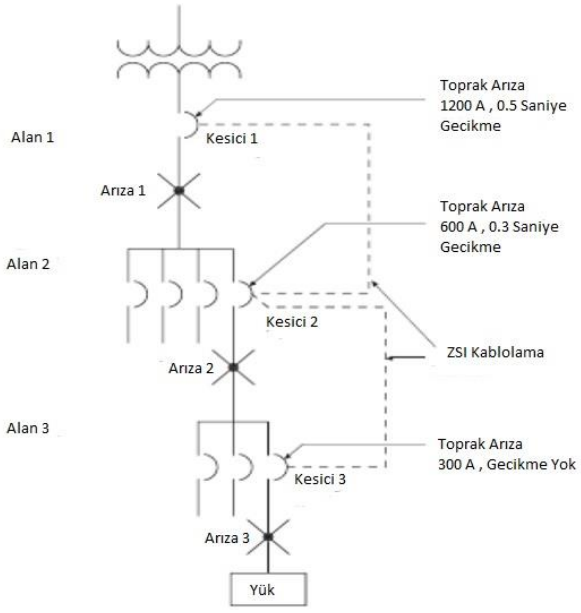
Bu koruma metodu oldukça hızlıdır (yaklaşık 15-40 ms.). Fakat, yüksek empedanslı bara diferansiyel koruma, ekstra akım transformatörü ve kablolama gerektirdiğinden pahalıdır. Bu korumada röle kendi empedansı ile gerilimi ölçer ve eğer değer belirli bir değerin üstünde ise röle açma komutu gönderir. Düşük empedanslı bara diferansiyel koruma ise ekstra akım transformatörü gerektirmez. Fakat, kompleks bir röle ayarı gerektirir. Ayrıca, akım transformatörü doygunluğa ulaşırsa yanlış çalışmaya neden olabilir [11].



Şekil 4.11 Düşük Empedanslı Bara Koruma Sisteminin Tek Baralı Sistem Uygulaması [48]

4.4.2 Bölge Seçici Kilitleme

İki ya da daha fazla kesicinin birbiri ile haberleşmesi ile kısa devre veya toprak arızasının en kısa sürede arızaya en yakın kesici tarafından giderilmesini sağlayan metottur. Bu yöntemin temel amacı, hatanın konumuna bakılmaksızın, tam seçicilik dikkate alınarak, mümkün olan en kısa sürede arıza akımını temizlemektir. Şekil 4.12'de örnek bir uygulama gösterilmiştir.



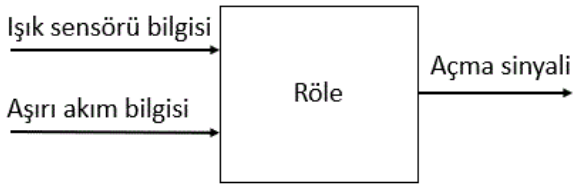
Şekil 4.12 Bölge Seçici Kilitleme(ZSI) Uygulanmış Sistem Örneği [49]

4.4.3 Ark Flaş Enerjisini Azaltan Bakım Anahtarı

Bir elektrik sistemi ideal olarak ancak %100 enerjisiz olduğunda güvenlidir. Fakat, bazı uygulamalarda sistemi enerjisiz bırakmak mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda daha hızlı açma sağlayacak ark flaş enerjisini azaltıcı bakım anahtarının kullanılması, enerjili sistemde çalışmakta olan personel için riski azaltmaktadır. Hızlı anahtarlama yapılarak ark ile açığa çıkabilecek enerji azaltılmakta ve enerjili sistemde çalışacak personelin maruz kalabileceği risk azaltılmış olmaktadır [50]. Bu anahtar ark flaş sınır bölgesinde çalışmakta olan bir personel olduğunda aktif durumda iken, çalışma bittikten sonra eski konumuna getirilmelidir. Bu sayede çalışanın olası ark flaş riski azaltılmış olur.

4.4.4 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma

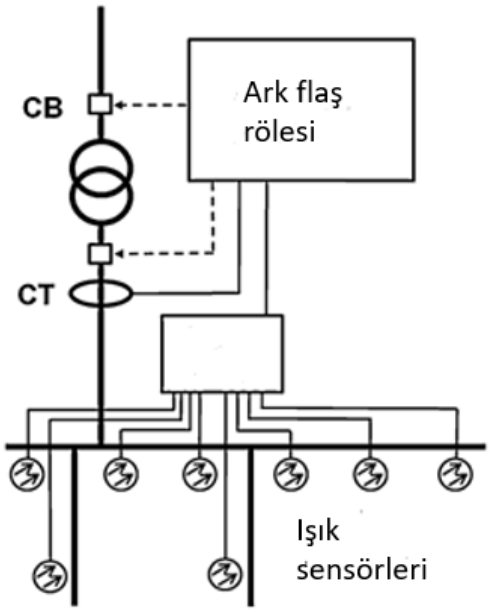
Ark oluştuğu esnada ani bir radyasyon yayar ve bu görünen ışığın analiz edilmesiyle ark tespit edilebilir. Optik sensörlerle gerçekleştirilebilen bu koruma arızanın çok hızlı bir şekilde temizlenmesini sağlar. Yanlış açmaları önlemek için genellikle bu yöntem aşırı akım koruma yöntemi ile kombine edilerek kullanılır. Arklar genellikle tek faz arızası olarak başlayıp kısa zamanda 3 faz arızasına dönüştüğü için, nötrden geçen akım da ölçülerek ark arızası büyümeden önce tespit edilmeye çalışılmaktadır [11]. Şekil 4.13'de temel prensip şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma Temel Prensibi [34]

Bu korumada ışığın algılanması için nokta bazlı sensörler veya bölge bazlı fiber sensörler kullanılmaktadır. Nokta bazlı sensörler ile kablo bağlantı noktaları gibi ulaşılması zor kapalı bölgelerde seçici koruma sağlanırken, fiber sensörlerle bara bölgeleri veya kesici bölgeleri gibi büyük alanlardaki ışığın algılanması ile koruma sağlanır [51].

Ark esnasında açığa çıkan ışığın yoğunluğu normal bir ışıktan çok daha fazla olduğundan sensörün duyarlılığının çok fazla bir önemi yoktur. Alçak gerilim uygulamalarında ışığın algılanması konusuna dikkat edilmesi gereklidir. Şekil 4.14'de akım bilgisi ve ışık sensörleri ile yapılan bir koruma yapısına ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 4.14 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma Sistemi Örneği [34]

Bu koruma sisteminin en büyük avantajı, çok hızlı bir şekilde açma gerçekleştirmesidir. Ayrıca, nokta bazlı sensörler kullanılırsa da montajı oldukça kolaydır ve seçici bir açma işlemi gerçekleştirilmesini sağlar.

Bu sistem nümerik rölelere entegre edilebildiği gibi, ark flaş röleleri (dedicated arc flash relay) ile beraber kullanıldığında daha hızlı bir açma işlemi gerçekleşebilmektedir.

Yaygın olarak kullanılan nümerik röleler ile yaklaşık 15 ms'de açma işlemi gerçekleşirken, ark flaş röleleri ile 7 ms'den daha kısa sürede açma işlemi gerçekleştirilebilir. Şekil 4.15'te 500 ms süresince 50 kA'lik bir arıza akımına maruz kalarak yanan bir kesici verilmiştir. Şekil 4.16'te verilen sistemde ise, ışık ve aşırı akım tabanlı bir koruma gerçekleştirilerek ark yaklaşık 6 ms gibi bir sürede temizlenmiştir [11].

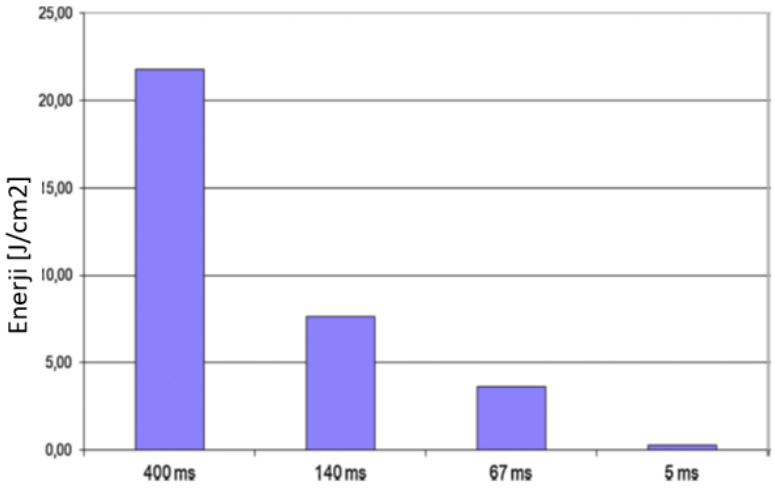


Şekil 4.15 500 ms Ark Süresi ile Yapılan Test [11]



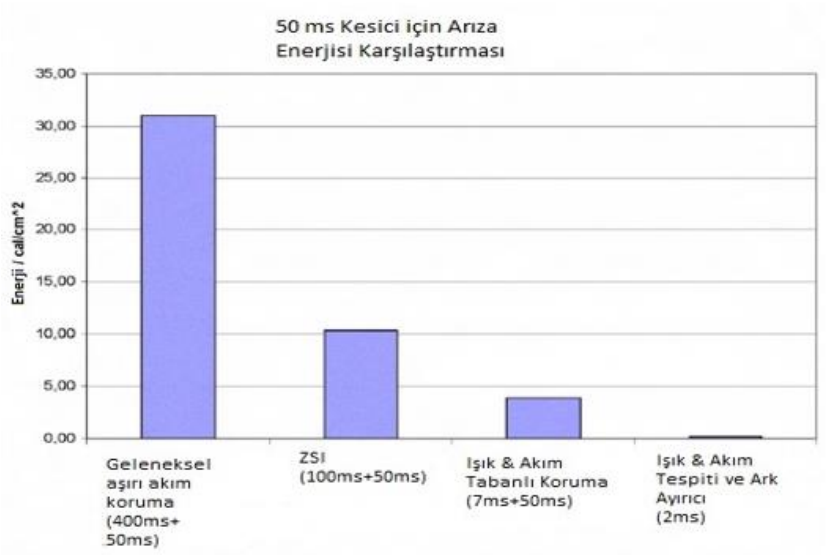
Şekil 4.16 Işık ve Aşırı Akım Tabanlı Koruma ile 6 ms Ark Süresi ile Gerçekleşen Test [11]

Şekil 4.17'de, U= 15kV, I_k= 40kA, bara açıklığı=152 mm, çalışma mesafesinin= 90 mm olan bir sistemde, ark süresinin açığa çıkan ark flaş enerjisine etkisi gösterilmiştir. Normalde 67 ms olan ark süresi ışık ve aşırı akım koruma gerçekleştirildiğinde 5 ms'ye düşmüş ve bu uygulama açığa çıkan ark flaş enerjisini ciddi oranda düşürmüştür [34].



Şekil 4.17 Örnek Bir Sistemde Ark Flaş Enerjisinin Ark Süresine Göre Kıyaslanması (U:15 kV, I_k:40 kA, bara açıklığı:152 mm, çalışma mesafesi: 90 mm) [34]

Şekil 4.18'de farklı koruma metotlarına göre ark flaş enerjisi karşılaştırılması yapılmış olan yayından alınmış olan sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.18 Farklı Koruma Metotlarına Göre Ark Flaş Enerjisi Karşılaştırılması [11]

4.5 Ark Söndürme

Temel olarak arkı söndüren yani temizleyen 3 farklı ekipman veya teknoloji vardır. Bunlar sigortalar, kesiciler ve ark gidericiler olarak sıralanabilir. Sigortalar daha önceki bölümde, akım sınırlama yaklaşımı başlığı altında açıklanmıştır. Bu bölümde ise kesiciler ve ark gidericilerden bahsedilmiştir.

4.5.1 Kesiciler

Kesicilerin havalı, vakumlu ve yağlı gibi birçok çeşidi vardır. Kesici tipleri ve özellikleri ayrı bir araştırma konusu olabilecek seviyededir. Bu yüzden, hazırlanan tez kapsamında temel olarak kesicilerin ark arızaları için önemi vurgulanmıştır.

Işık ve aşırı akım bazlı koruma sisteminde rölenin açma komutu vermesi 8 ms'nin altındadır. Eğer mekaniksel yerine, IGBT'li (izoleli bipolar transistör) röle kullanılırsa rölenin açma komutu göndermesi 1 ms'ye kadar düşebilmektedir. Kesicinin operasyon zamanı yaklaşık 10 ms civarında olduğu için ark süresi kesicinin işlem zamanına bağlı olmaktadır. Bu da kesici seçiminin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

[45]'de yapılan çalışma, kesicilerin teknik dokümanında yazan operasyon zamanının maksimum süre olduğunu, yapılan testlerde bütün kesicilerin teknik dokümanında belirtilen zaman içerisinde işleme girdiğini göstermektedir. Unutulmamalıdır ki ark süresi röle zamanı ve kesici zamanı toplamından oluşmaktadır. Bu yüzden akımı kesen kesicilerin seçimi oldukça önemlidir.

Yağlı kesicilere göre bakım kolaylığı açısından daha avantajlı olan vakumlu kesiciler orta gerilim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek gerilimli sistemlerde ise SF6 gazlı kesiciler yüksek delinme dayanımı ve kimyasal kararlılığı nedeniyle piyasada sıklıkla tercih edilmektedir.

4.5.2 Ark Gidericiler

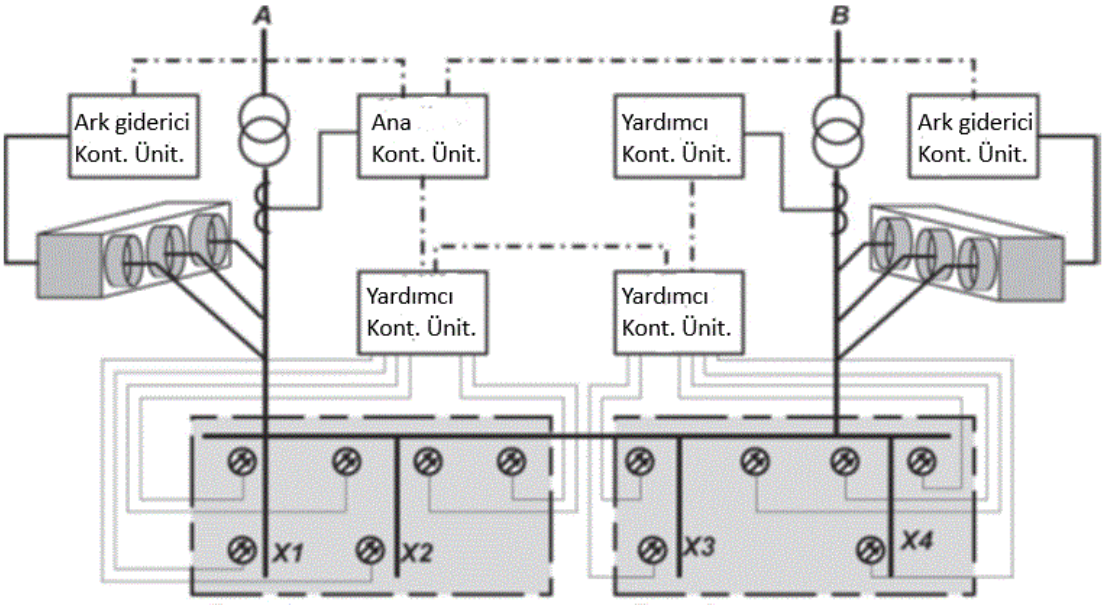
Ark gidericiler, paralel bir kısa devre oluşturarak arkları çok hızlı bir şekilde söndüren ekipmanlardır. Ark gidericiler, IEC 62271-200 standardında yüksek

seviyede bir koruma sağlamak için opsiyonel olarak tanımlandığı için yaygın bir kullanımı yoktur. Kesici hücrelerine sonradan yapılan montaj ile kullanılan ark gidericiler personel güvenliği ve ark flaş enerjisi azaltılmasında fayda sağladığı gibi ark sonrası açığa çıkan basıncı da azaltır [18].

Çalışma prensibi şu şekildedir; ark arızası saptandığında ark giderici ani bir şekilde sistemde bir kısa devre oluşturur, gerilim çöker ve ark söndürülür. Ark gidericiler ışık ve aşırı akım bazlı koruma sistemleri ile birlikte kullanılırlar. Bu sayede ark giderici 1-2 ms içerisinde açma komutu alır, 1-2 ms içerisinde çalışır ve toplam ark süresi 5 ms'nin altında olur. Burada ekipmanlar arası hızlı iletişim çok önemlidir. Ark flaş rölesi aynı zamanda kesiciye açma komutu gönderir. Bu sayede ark gidericinin işlevini yerine getirmesinden sonra kesici arkı tamamen temizler. Böylece, arkın verebileceği zarar minimize edilmiş olur.

Ark gidericilerin çalışması esnasında oluşan yüksek akım, güç sistemindeki ekipmanlara özellikle transformatörlere bozucu etkide bulunabileceği de belirtilmektedir. İlgili standartlara göre transformatörler bu çok yüksek arıza akımlarına karşı dayanaklı olduklarından bu etki ihmal edilebilir [52].

Şekil 4.19'da ark gidericiler ile yapılan ark flaş koruma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Ark Gidericiler ile Yapılan Ark Flaş Koruma [18]

4.6 Ark Arızaları Çözüm Yöntemleri Genel Değerlendirme

Ark flaş arızaları önleme, çözüm ve söndürme yöntemleri 4. Bölümde ayrı başlıklar altında açıklanmaya çalışılmıştır. Görüleceği üzere her yerde işe yarayabilecek tek bir yöntem yoktur. Ark öncesinde, arkı tahmin edebilmek için kullanılabilecek yöntemler aynı zamanda ark oluştuktan sonra arkı hızlı algılayıp söndürmek için içinde kullanılmaktadır. Bu yüzden sistem bütünüyle değerlendirilmeli ve gerekli tüm önlemler buna göre alınmalıdır.

Gelişen teknoloji ile birlikte sensörlerle ve aşırı akım tabanlı koruma sistemleriyle birlikte entegre olarak kullanılan aktif koruma yöntemlerinin arkın etkilerini oldukça minimize ettiği görülmüştür. Bunun yeterli olmadığı durumlarda ise pasif yöntemlerin kullanılmasının öneminin arttığı belirtilmiştir.

Ayrıca, arıza akımı ve ark süresi azaltılarak arkın oluşturduğu riskler azaltılabilirken, yapılan çalışmalar ark akımını azaltmaya çalışmak yerine ark süresini kısaltmanın daha efektif ve daha az riskli olduğunu göstermektedir.

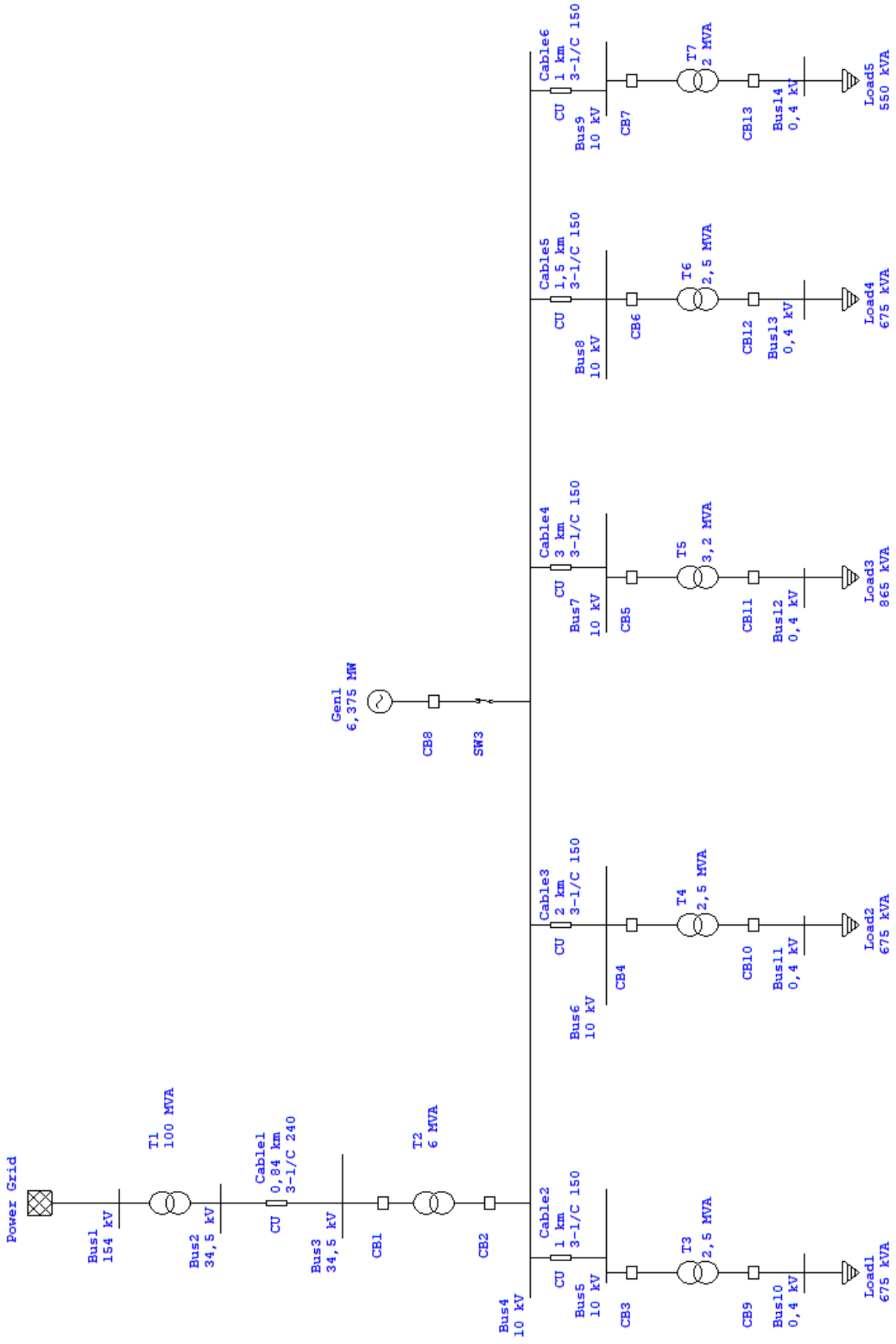
Ark flaş arızalarının zararlarını minimize etmek için aktif ve pasif yöntemlerin kombine şekilde kullanılması tavsiye edilebilir. Tüm bunlar teknik imkanlar, risk, sistem durumu ve maliyet gibi etkenler dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

5
Modelleme ve Analiz Çalışmaları

Bu bölümde, örnek sistemler modellenerek ark flaş hesaplamaları yapılmış, farklı çalışma modları dikkate alınarak ark flaş risk analizleri gerçekleştirilmiştir. Modellemeler için, ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) programı kullanılmıştır. Hesaplamalar IEEE 1585-2002 ve NFPA 70E-2015 standartlarına göre yapılmıştır. Bu simülasyonlar ile sistemin farklı noktalarında ve farklı çalışma modlarında ark flaş arızalarının etkilerinin incelenilmesi ve ark flaş arızalarının etkilerinin azaltılmasına yönelik önlemlerin etkinliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

5.1 Uygulama 1

Uygulama1'de, seçilen örnek bir sistemde ETAP programıyla yapılan ark flaş analizleri ile sistemin farklı çalışma senaryolarındaki durumu incelenmiştir. Seçilen tesis, şebekeye 100 MVA'lık 154/34,5 kV ve 6 MVA'lık 34,5/10 kV'luk transformatörler üzerinden bağlıdır. 10 kV'luk baraya aynı zamanda 7,5 MVA'lık generatör sistemi entegre edilmiştir. Tesis, 5 farklı noktadaki ve farklı güçlerdeki 10/0,4 kV'luk transformatörler ile yüklerini beslemektedir. Sistemin tek hat şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Uygulama 1'deki Sistemin Tek Hat Şeması

5.1.1 Çalışma Senaryolarına Göre Analizler

Seçilen bir orta gerilim ve bir alçak gerilim barasında iki farklı senaryoya göre analizler yapılmıştır;

Senaryo 1: Generatör sistemi 10 kV'luk 4. Bara'ya bağlı değildir. Yükler sadece şebeke tarafından beslenmektedir.

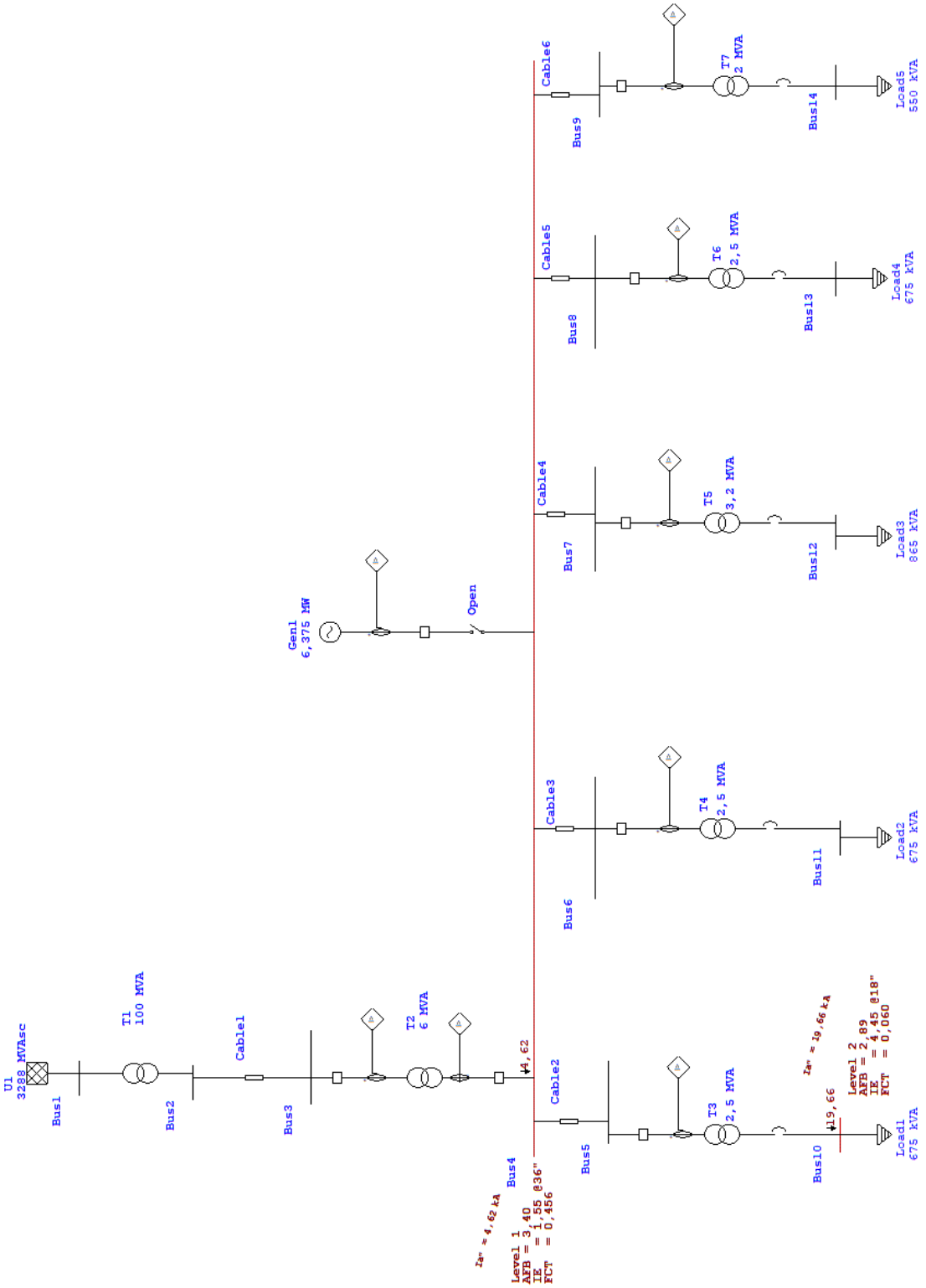
Senaryo 2: Generatör sistemi 10 kV'luk 4. Bara'ya bağlıdır ve 3 MVA değerinde bir güç sağlamaktadır. Yükler hem şebeke ve hem de generatör tarafından beslenmektedir.

Bu iki senaryoya göre seçilen 4. Bara ve 10. Bara'da 3-faz kısa devre arızası oluşturarak kısa devre akımları, ark akımları, ark flaş enerjileri, kişisel koruyucu ekipman seviyeleri ve ark flaş sınır değerleri belirlenmiştir. Yapılan simülasyon ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de özetlenmiştir.

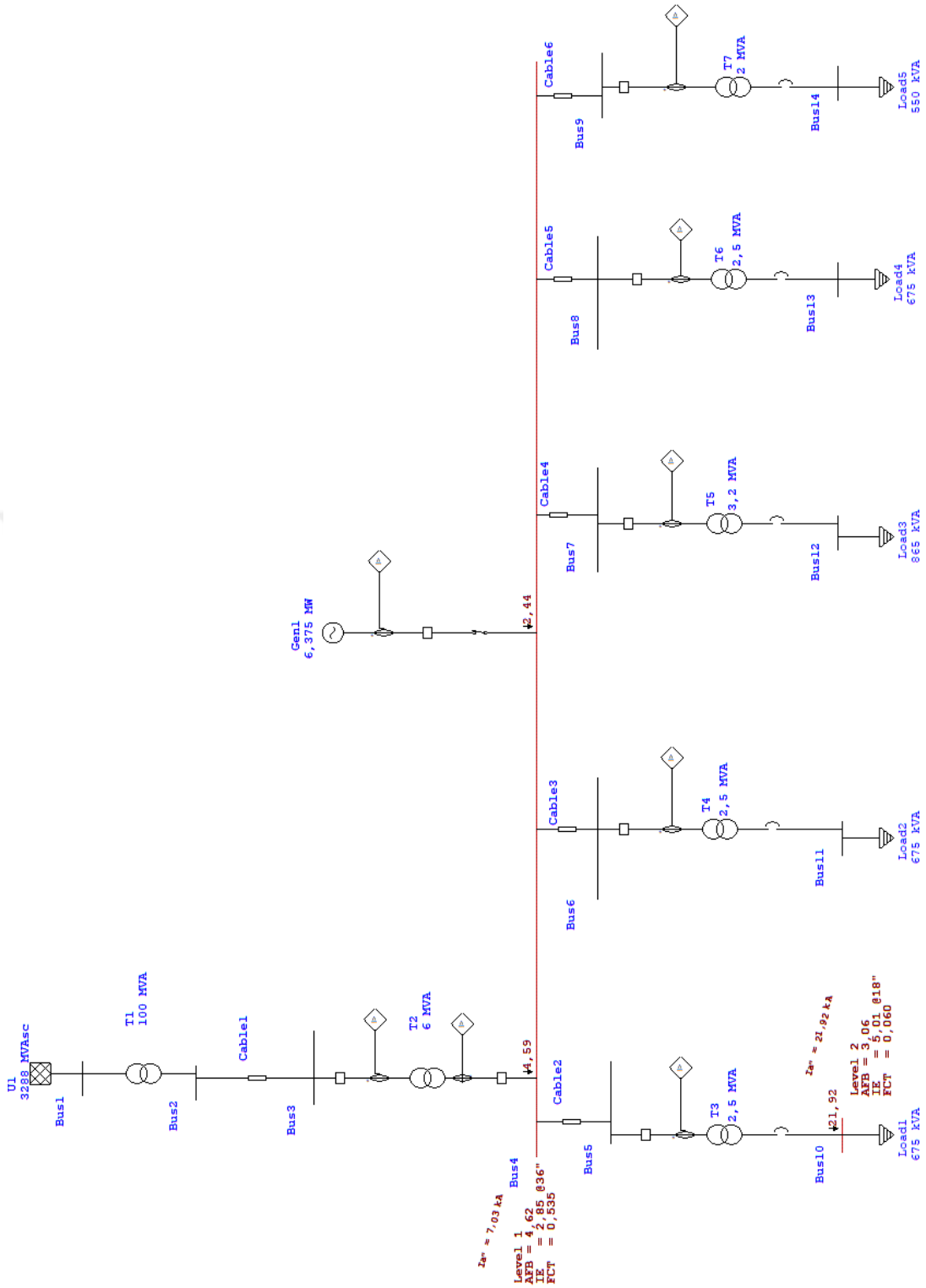
Ayrıca, ark flaş analizi sonuçları sistem tek hat şeması üzerinden Senaryo 1 için Şekil 5.2'de, Senaryo 2 için ise Şekil 5.3'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Uygulama 1'de Senaryolara Göre Analiz Sonuçları

	Senaryo 1 (Generatör bağlı değil)		Senaryo 2 (Generatör bağlı)	
3 faz kısa devre lokasyonu	Bara 4	Bara 10	Bara 4	Bara 10
3 faz kısa devre akımı (kA)	4,7	38,91	7,2	44,24
Ark akımı(kA)	4,62	19,66	7,03	21,92
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	1,55	4,45	2,85	5,01
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	1	2	1	2
Ark flaş sınırı (cm)	103,63	88,08	140,81	93,26



Şekil 5.2 Uygulama 1 Senaryo 1'in Ark Flaş Analizi

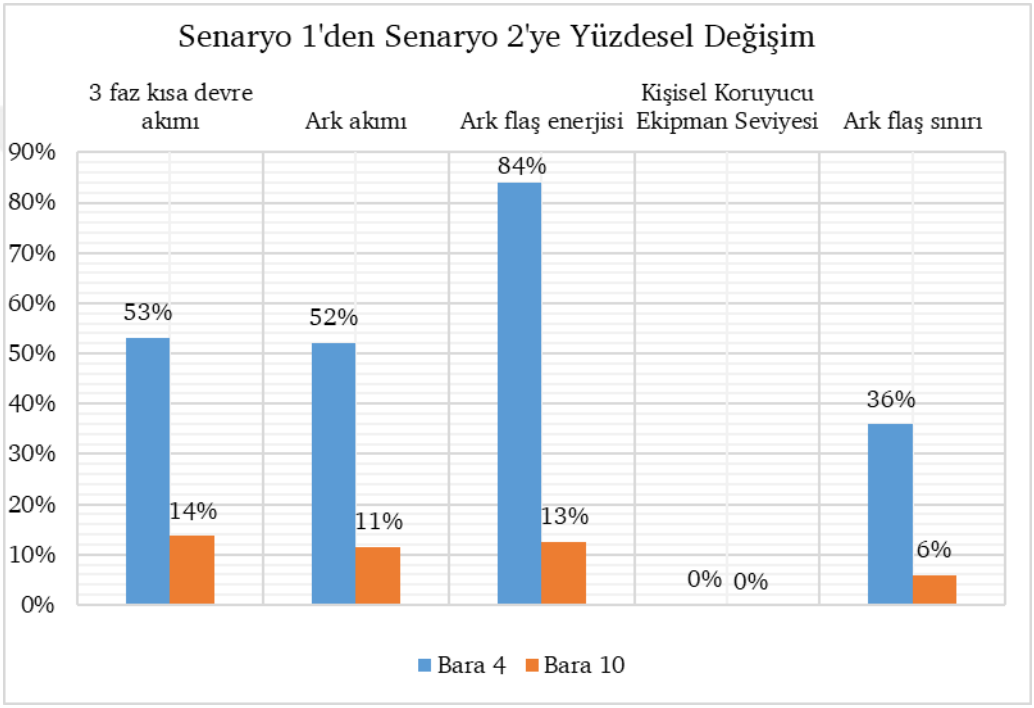


Şekil 5.3 Uygulama 1 Senaryo 2'nin Ark Flaş Analizi

5.1.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 5.1'den görüldüğü üzere; 2. Senaryo'da, yani generatörün bağlı olduğu durumda, generatörün kısa devre arızasına ciddi manada bir etkisinin olduğu görülmüştür. Arıza akımındaki bu değişim dolayısıyla ark akımı, ark flaş enerjisi ve ark flaş sınırı da artmıştır. Özellikle Bara 4'te, kısa devre akımı %53, ark akımı ise %52 artmıştır. Diğer taraftan Bara 10'da , kısa devre akımı %13,6 , ark akımı ise %11,4 artmıştır.

Senaryo 1'den Senaryo 2'ye olan yüzdesel değişim Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Senaryo 1'den Senaryo 2'ye Yüzdesel Değişim

Ark akımındaki bu değişiklik ark flaş enerjisini de etkilemiştir. Ark flaş enerjisi, Bara 4'te 1,55 cal/cm^2'den 2,85 cal/cm^2 'ye, Bara 10'da ise 4,45 cal/cm^2'den 5,01 cal/cm^2'ye çıkmıştır. Ark flaş enerjisindeki artış, tesisteki çalışan personele ve ekipmanlara etki edebilecek daha büyük bir zarar demektir. Bu nedenle, ark flaş sınırı Bara 4'te 103,63 cm'den 140,81 cm'ye ; Bara 10'da ise 88,08 cm'den 93,26 cm'ye çıkmıştır.

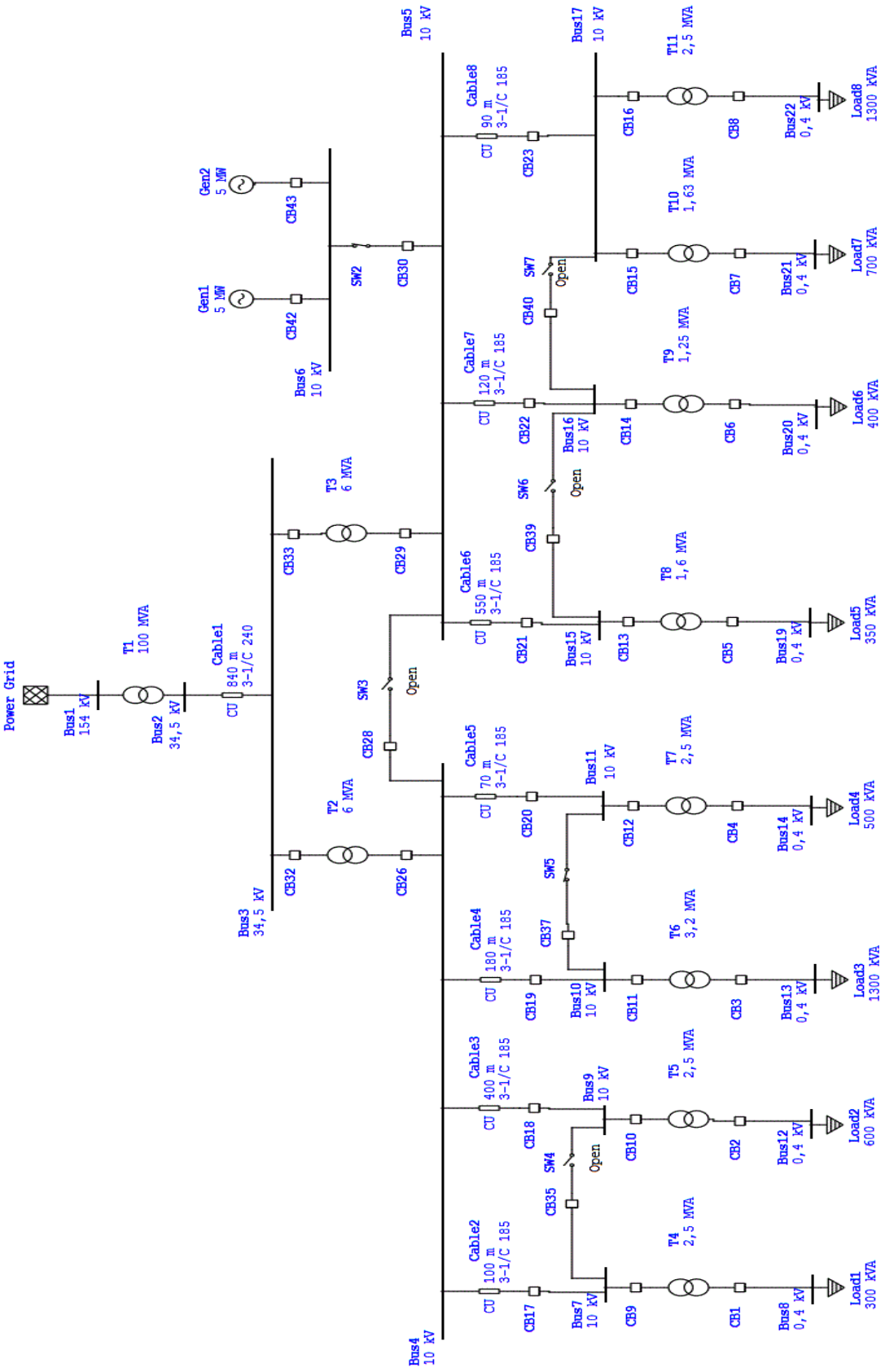
Ayrıca, 0,4 kV'luk gerilim seviyesine sahip Bara 10'da kişisel koruyucu ekipmanı seviyesi iki senaryoda da 2'dir. Fakat, Bara 4'te bu seviye 1'dir. Bunun nedeni, alçak gerilimde oluşan arıza akımı ve ark enerjisinin daha yüksek çıkmasıdır. Bu da daha üst seviyede bir kişisel koruyucu ekipman kullanılması gerektirmektedir.

Ek olarak, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de aynı zamanda kaynakların arıza akımına katkılarıda gözlemlenebilir. Bu katkı, Senaryo 1' de şebekeden 4,62 kA iken Senaryo 2'de şebekeden 4,59 kA, sisteme bağlı generatörden ise 2,44 kA'dir.

Sonuç olarak, generatörün arıza akımına ve ark flaş hesaplamarına katkısı oldukça yüksektir. Bu yüzden, güç sistemleri farklı çalışma senaryolarına göre doğru analiz edilmeli ve gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra ona göre önlemler alınmalıdır.

5.2 Uygulama 2

Uygulama 2'de, seçilen bir sanayi tesisinde 4 farklı çalışma senaryosunda ark flaş analizleri yapılmış ve ark flaş enerjisi seviyesi yüksek çıkan durum için farklı çözüm yöntemlerinin azaltıcı etkisi analiz edilerek, elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekil 5.5'de tek hat şeması verilen sistem; şebekeye 100 MVA gücünde 154/34,5 kV'luk transformatör üzerinden bağlıdır. 2 adet 6 MVA gücünde 34,5/10 kV'luk transformatör ile de tesis içerisinde 10 kV'luk baralar üzerinden enerji dağıtımı gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, 10 kV'luk baralardan birisine bağlı 2 adet 5 MW'lık generatörlerle tesis, kendi içerisinde enerjisini üretebilecek kapasiteye sahiptir. Normal çalışma koşullarında tesis her daim şebekeye bağlı olarak işletilmektedir. Tesis içerisindeki diğer noktalara da orta gerilim yeraltı kabloları ile iletim gerçekleştirilerek, 8 farklı noktadaki binalar farklı güçteki 10/0,4 kV'luk transformatörler ile yüklerini beslemektedir.



Şekil 5.5 Uygulama 2'deki Sistemin Tek Hat Şeması

5.2.1 Çalışma Senaryolarına Göre Analizler

Sistem çalışma modunun, farklı kaynakların ayrı ayrı ya da hep birlikte sisteme bağlı olmasının kısa devre hesaplamaları ve ark flaş analizlerine olan etkisi oldukça farklıdır. Bu yüzden ark flaş analizleri yapılırken oluşabilecek ark arızalarının etkisi farklı senaryolarda ve farklı noktalarda analiz edilmelidir. İlerleyen bölümlerde örnek sistemde farklı çalışma senaryolarında yapılan analizler incelenmiştir.

Farklı senaryolardaki durumları analiz edebilmek için her durumda aşağıda belirtilen noktalarda maksimum kısa devre akımı, ark akımı, ark flaş olay enerjisi, kişisel koruyucu ekipman seviyesi, ark flaş mesafesi ve arıza temizleme süreleri belirlenerek karşılaştırılmıştır.

A: 4 numaralı 10 kV'luk bara

B: 5 numaralı 10 kV'luk bara

C: 9 numaralı 10 kV'luk bara

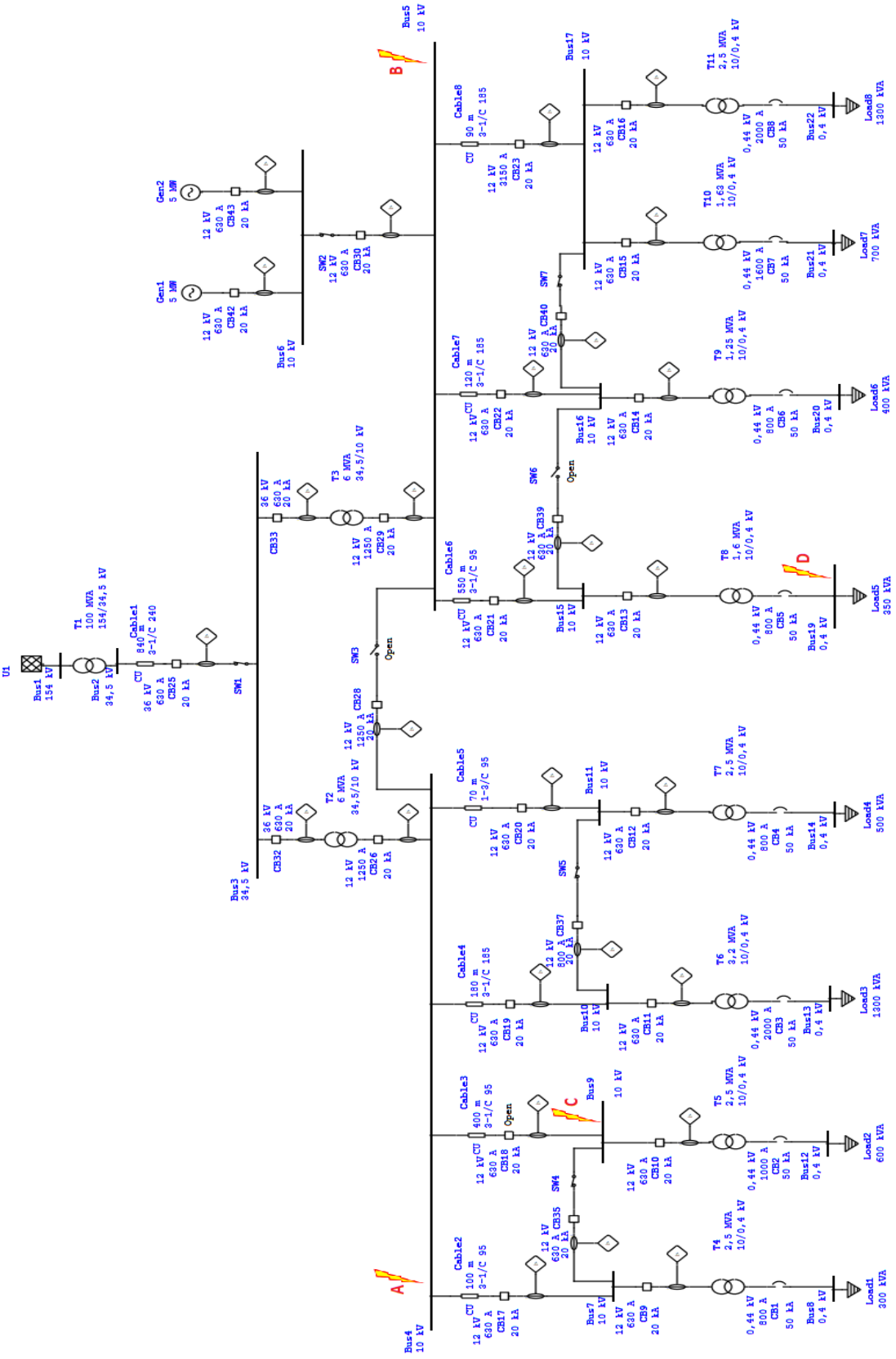
D: 19 numaralı 0,4 kV'luk bara

Sistemde belirlenen noktalarda yapılacak ark flaş analizleri için seçilen baraların gerilim seviyesi, bara açıklığı, mesafe faktörü ve çalışma mesafesi değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Uygulama 2'de Baraların Ark Flaş Analizleri için Gerekli Olan Verileri

	A: Bara 4	B: Bara 5	C: Bara 9	D: Bara 19
Gerilim Seviyesi [kV]	10	10	10	0,4
Bara açıklığı [mm]	153	153	153	32
Mesafe faktörü(x)	0,973	0,973	0,973	1,473
Çalışma mesafesi [cm]	91,4	91,4	91,4	61

Sistem tek hat şemasında A, B, C ve D noktalarının yerleri Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Uygulama 2'de Arıza Noktalarının Yerleri

5.2.1.1 Senaryo 1 için Analizler

Senaryo 1 için anahtarların durumu Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 Uygulama 2 Senaryo 1'de Anahtarların Durumu

	Anahtarların Durumu
1.Anahtar (SW1)	kapalı
2.Anahtar (SW2)	kapalı
3.Anahtar (SW3)	kapalı
4.Anahtar (SW4)	açık
5.Anahtar (SW5)	kapalı
6.Anahtar (SW6)	açık
7.Anahtar (SW7)	açık

Senaryo 1'deki çalışma durumunda;

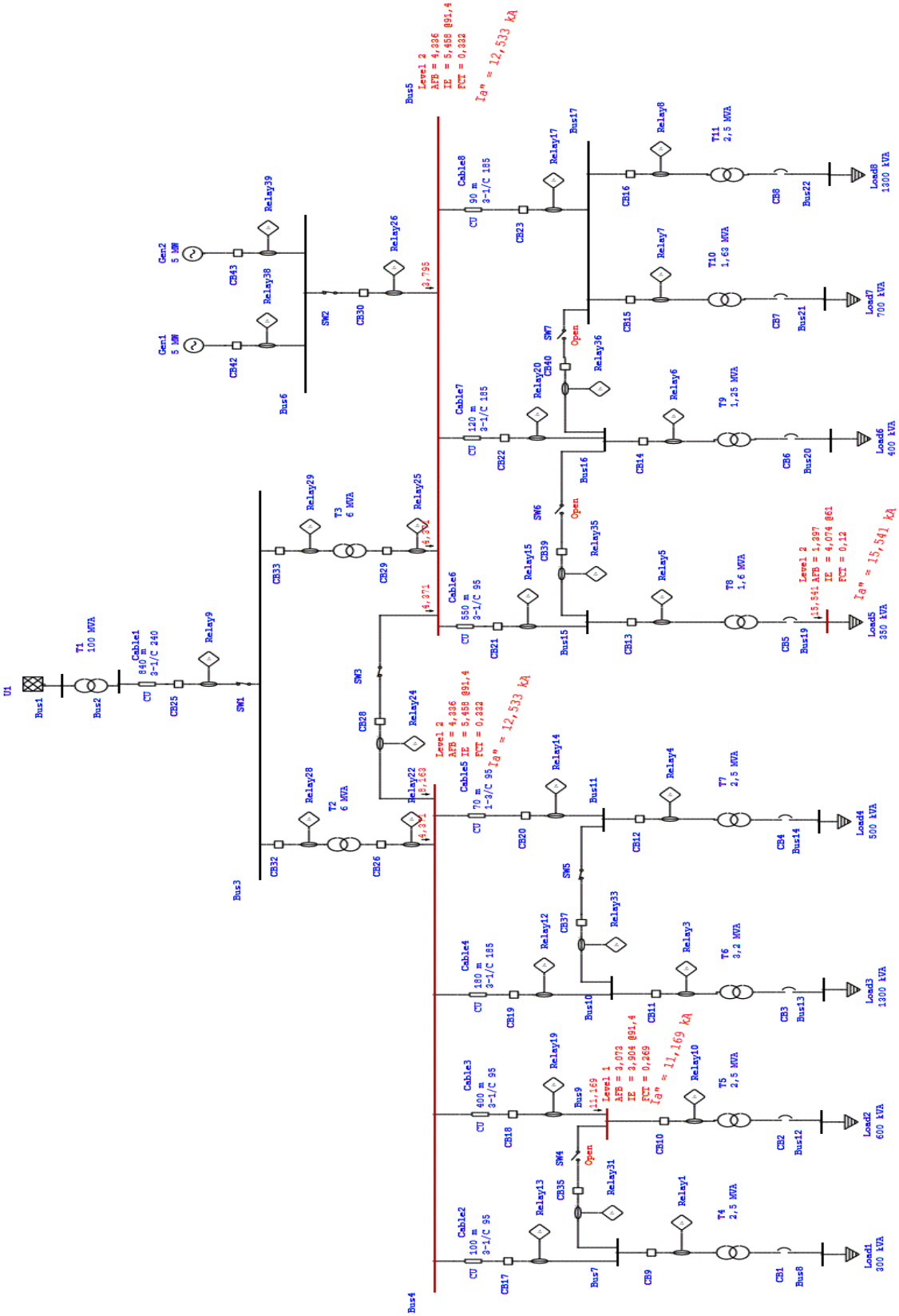
Sistem, şebeke ve generatörlerden beslenmekte; iki ana 10 kV'luk barayı birleştiren kuplaj(3. Anahtar) kapalıdır. Ayrıca, 4, 6 ve 7 numaralı anahtarlar açık, 5 numaralı anahtar ise kapalıdır.

A, B, C ve D noktalarında, Senaryo 1 için meydana gelen 3-faz kısa devre arızasında, arızaların meydana geldiği noktalardaki 3 faz maksimum kısa devre akımı, ark akımı, ark enerjisi, kişisel koruyucu ekipman seviyesi ve arıza temizleme süresi Tablo 5.4'te özetlenmiştir.

Tablo 5.4 Uygulama 2 Senaryo 1'de Ark Flaş Analizi Verileri

	Senaryo 1 (Şebeke bağlı, Generatör bağlı, kuplaj var)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	14,755	14,755	12,185	38,377
Ark akımı(kA)	12,533	12,533	11,169	15,541
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	5,46	5,46	3,9	4,07
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	2	2	1	2
Ark flaş sınırı (m)	4,3	4,3	3,1	1,4
Ark temizleme süresi (sn)	0,332	0,332	0,269	0,12

Şekil 5.7'de Senaryo 1 için ark flaş analizlerinin gerçekleştirildiği sistemin yazılımdaki ekran görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 5.7 Uygulama 2 Senaryo 1'in Ark Flaş Analizi

5.2.1.2 Senaryo 2 için Analizler

Senaryo 2 için anahtarların durumu Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5 Uygulama 2 Senaryo 2'de Anahtarların Durumu

	Anahtarların Durumu
1.Anahtar (SW1)	kapalı
2.Anahtar (SW2)	kapalı
3.Anahtar (SW3)	açık
4.Anahtar (SW4)	kapalı
5.Anahtar (SW5)	kapalı
6.Anahtar (SW6)	açık
7.Anahtar (SW7)	kapalı

Senaryo 2'deki çalışma durumunda;

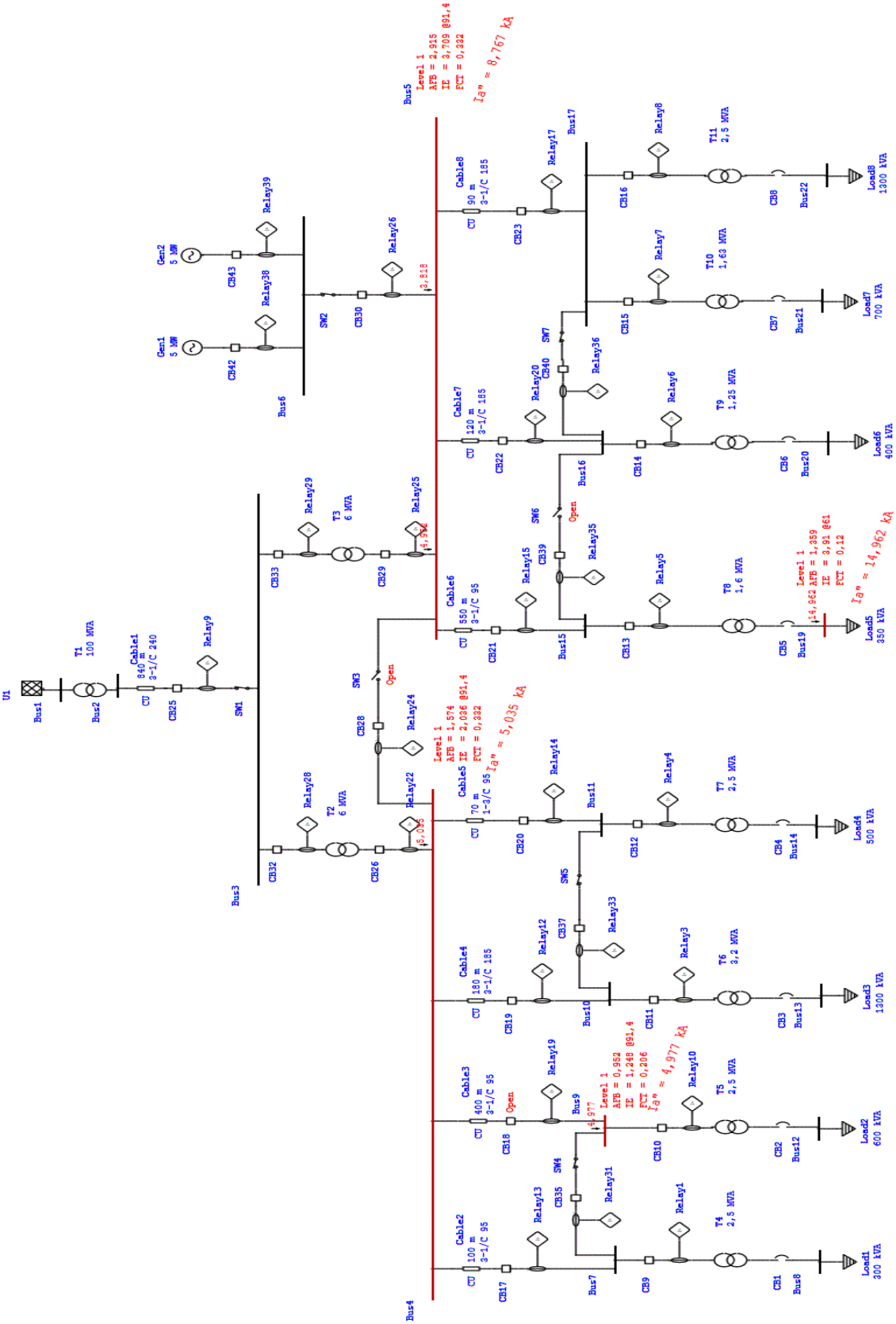
Sistem, şebeke ve generatörlerden beslenmekte; iki ana 10 kV'luk barayı birleştiren kuplaj(3. Anahtar) açıktır. Ayrıca, 4, 5 ve 7 numaralı anahtarlar kapalı, 6 numaralı anahtar ise açıktır.

A, B, C ve D noktalarında, Senaryo 2 için meydana gelen 3-faz kısa devre arızasında, arızaların meydana geldiği noktalardaki 3 faz maksimum kısa devre akımı, ark akımı, ark enerjisi, kişisel koruyucu ekipman seviyesi ve arıza temizleme süresi Tablo 5.6'da özetlenmiştir.

Tablo 5.6 Uygulama 2 Senaryo 2'nin Ark Flaş Verileri

	Senaryo 2 (Şebeke bağlı, Generatör bağlı, kuplaj yok)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	5,159	10,606	5,071	37,121
Ark akımı(kA)	5,035	8,767	4,977	14,962
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	2,04	3,71	1,25	3,91
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	1	1	1	1
Ark flaş sınırı (m)	1,6	2,9	0,96	1,4
Ark temizleme süresi (sn)	0,332	0,332	0,206	0,12

Şekil 5.8'de Senaryo 2 için ark flaş analizlerinin gerçekleştirildiği sistemin yazılımdaki ekran görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 5.8 Uygulama 2 Senaryo 2'nin Ark Flaş Analizi

5.2.1.3 Senaryo 3 için Analizler

Senaryo 3 için anahtarların durumu Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7 Uygulama 2 Senaryo 3'de Anahtarların Durumu

	Anahtarların Durumu
1.Anahtar (SW1)	kapalı
2.Anahtar (SW2)	açık
3.Anahtar (SW3)	kapalı
4.Anahtar (SW4)	açık
5.Anahtar (SW5)	kapalı
6.Anahtar (SW6)	açık
7.Anahtar (SW7)	açık

Senaryo 3'deki çalışma durumunda;

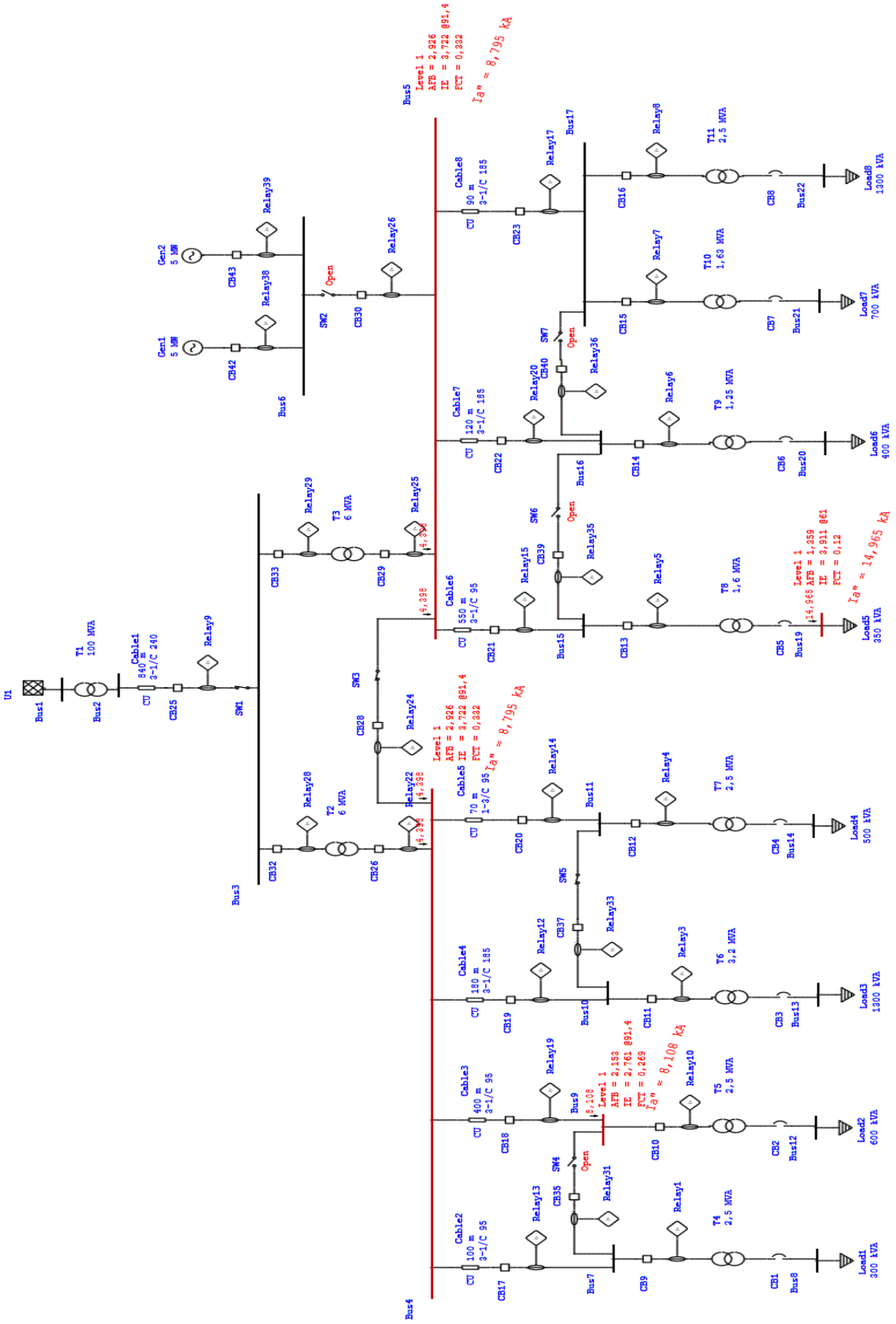
Sistem, sadece şebekeden beslenmekte; iki ana 10 kV'luk barayı birleştiren kuplaj(3. Anahtar) ise kapalıdır. Ayrıca, 4, 6 ve 7 numaralı anahtarlar açık, 5 numaralı anahtar ise kapalıdır.

A, B, C ve D noktalarında, Senaryo 3 için meydana gelen 3-faz kısa devre arızasında, arızaların meydana geldiği noktalardaki 3 faz maksimum kısa devre akımı, ark akımı, ark enerjisi, kişisel koruyucu ekipman seviyesi ve arıza temizleme süresi Tablo 5.8'de özetlenmiştir.

Tablo 5.8 Uygulama 2 Senaryo 3'ün Ark Flaş Analizi Verileri

	Senaryo 3 (Şebeke bağlı, Generatör bağlı değil, kuplaj var)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	9,132	9,132	8,1	37,087
Ark akımı(kA)	8,795	8,795	8,108	14,965
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	3,72	3,72	2,76	3,91
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	1	1	1	1
Ark flaş sınırı (m)	2,9	2,9	2,2	1,4
Ark temizleme süresi (sn)	0,332	0,332	0,269	0,12

Şekil 5.9'da Senaryo 3 için ark flaş analizlerinin gerçekleştirildiği sistemin yazılımdaki ekran görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 5.9 Uygulama 2 Senaryo 3'ün Ark Flaş Analizi

5.2.1.4 Senaryo 4 için Analizler

Senaryo 3 için anahtarların durumu Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9 Uygulama 2 Senaryo 4'de Anahtarların Durumu

	Anahtarların Durumu
1.Anahtar (SW1)	kapalı
2.Anahtar (SW2)	açık
3.Anahtar (SW3)	açık
4.Anahtar (SW4)	kapalı
5.Anahtar (SW5)	kapalı
6.Anahtar (SW6)	açık
7.Anahtar (SW7)	kapalı

Senaryo 4'deki çalışma durumunda;

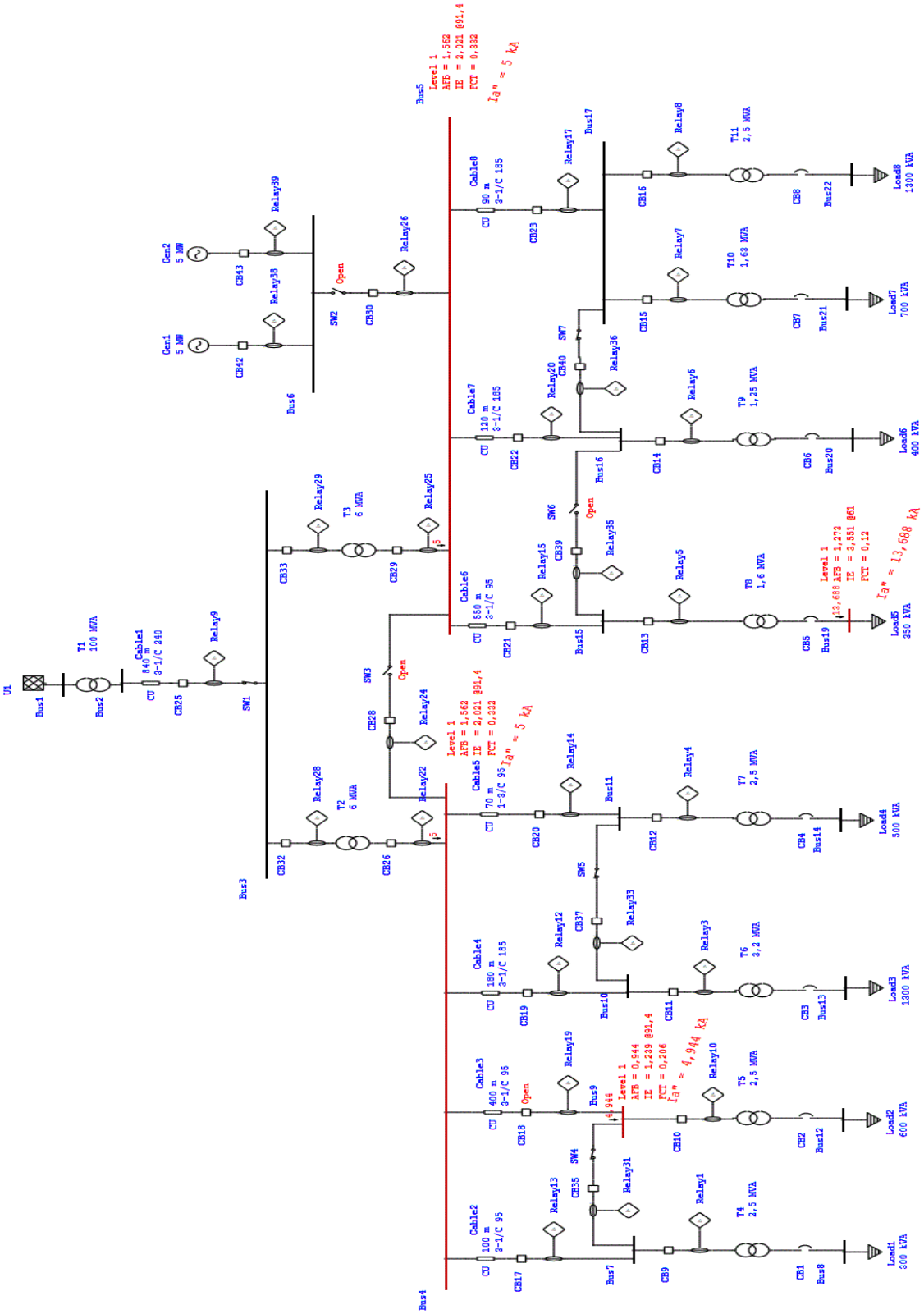
Sistem, sadece şebekeden beslenmekte; iki ana 10 kV'luk barayı birleştiren kuplaj(3. Anahtar) ise açıktır. Ayrıca, 4,5 ve 7 numaralı anahtarlar kapalı, 6 numaralı anahtar ise açıktır.

A, B, C ve D noktalarında, Senaryo 4 için meydana gelen 3-faz kısa devre arızasında, arızaların meydana geldiği noktalardaki 3 faz maksimum kısa devre akımı, ark akımı, ark enerjisi, kişisel koruyucu ekipman seviyesi ve arıza temizleme süresi Tablo 5.10'da özetlenmiştir.

Tablo 5.10 Uygulama 2 Senaryo 4'ün Ark Flaş Analizi Verileri

	Senaryo 4 (Şebeke bağlı, Generatör bağlı değil, kuplaj yok)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	5,12	5,12	5,034	34,19
Ark akımı(kA)	5	5	4,944	13,688
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	2,02	2,02	1,24	3,55
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	1	1	1	1
Ark flaş sınırı (m)	1,6	1,6	0,9	1,3
Ark temizleme süresi (sn)	0,332	0,332	0,206	0,12

Şekil 5.10'da Senaryo 4 için ark flaş analizlerinin gerçekleştirildiği sistemin yazılımdaki ekran görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 5.10 Uygulama 2 Senaryo 4'ün Ark Flaş Analizi

5.2.2 Uygulanan Senaryoların Karşılaştırmaları

Bu bölümde, sistemde yapılan farklı çalışma senaryolarındaki ark flaş analizleri karşılaştırılmıştır. Aynı noktanın farklı senaryolardaki ark flaş analiz verilerini toplu halde görebilmek için tüm sonuçlar Tablo 5.11'de sunulmuştur.

Tablo 5.11 Ark Flaş Analizi Tüm Senaryo Verileri

Senaryo	Arıza Lokasyonu	3 faz kısa devre akımı (kA)	Ark akımı(kA)	Ark flaş enerjisi (cal/cm)	Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	Ark flaş sınırı (m)	Ark temizleme süresi (sn)
Senaryo 1	A	14,755	12,533	5,46	2	4,3	0,332
	B	14,755	12,533	5,46	2	4,3	0,332
	C	12,185	11,169	3,9	1	3,1	0,269
	D	38,377	15,541	4,07	2	1,4	0,12
Senaryo 2	A	5,159	5,035	2,04	1	1,6	0,332
	B	10,606	8,767	3,71	1	2,9	0,332
	C	5,071	4,977	1,25	1	0,96	0,206
	D	37,121	14,962	3,91	1	1,4	0,12
Senaryo 3	A	9,132	8,795	3,72	1	2,9	0,332
	B	9,132	8,795	3,72	1	2,9	0,332
	C	8,1	8,108	2,76	1	2,2	0,269
	D	37,087	14,965	3,91	1	1,4	0,12
Senaryo 4	A	5,12	5	2,02	1	1,6	0,332
	B	5,12	5	2,02	1	1,6	0,332
	C	5,034	4,944	1,24	1	0,9	0,206
	D	34,19	13,688	3,55	1	1,3	0,12

5.2.2.1 Senaryo 1- Senaryo 2 Karşılaştırması

Tablo 5.11'den görüleceği üzere Senaryo 1'de yani ana kuplaj anahtarı 3. Anahtar kapalı olduğunda A, B ve C noktalarındaki 3 faz kısa devre akımı Senaryo 2'ye göre oldukça yüksektir. D noktasında ise çok fazla değişmemiştir. A, B ve C noktalarındaki bu ciddi artışın sebebi arızaya generatör sisteminin de katkıda bulunmasıdır. Ark arıza akımları da bu noktalarda benzer durumdan etkilenerek Senaryo 1'de Senaryo 2'ye göre daha yüksek değerdedir.

Ark akımı ve ark süresine bağlı olarak değişen ark flaş enerjisi ise Senaryo 2'ye kıyasla Senaryo 1'de; A noktasında 2,67 katına, B noktasında 1,47 katına, C

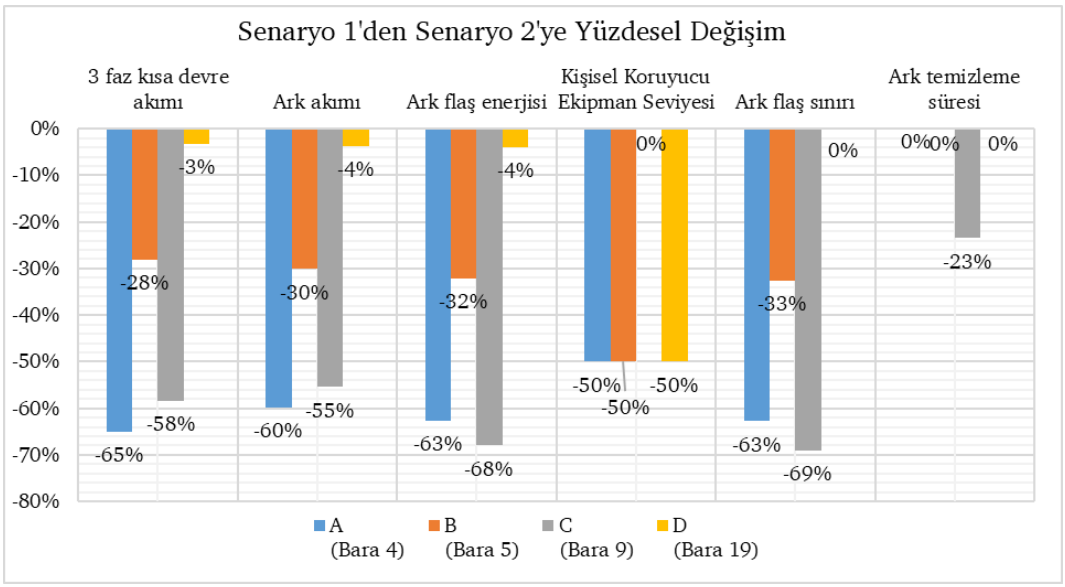
noktasında ise 3,12 katına çıkmıştır. D noktasında ise küçük bir artış söz konusudur.

A ve B, ana 10 kV'luk baralarıda Senaryo 1'de 5,46 cal/cm^2 ortaya çıkan ark flaş enerjisi ile kişisel koruyucu ekipmanlar için 1. Seviye eşiği 4 cal/cm^2 yi geçerek 2. Seviye ekipman ihtiyacı oluşturmuştur. D noktasındaki enerji seviyeside 3,91'den 4,07 cal/cm^2'ye çıkarak kişisel koruyucu ekipman seviyesi 2 olmuştur. C noktasında ise ark flaş enerjisi Senaryo 1'de 3 kat daha fazla büyük olsa da kişisel koruyucu ekipman seviyesi değişmemiştir.

Ark flaş risk analizleri için çok önemli olan ark flaş sınırı ise Senaryo 1'de Senaryo 2'ye kıyasla; A noktasında 1,6 m'den 4,3 m'ye , B noktasında 2,9 m'den 4,3 m'ye , C noktasında ise 0,96 m'den 3,1 m'ye çıkmıştır. D noktasında ise ark flaş sınırı değişmemiştir.

Ark temizleme süresinde A, B ve D noktalarında bir değişim olmamıştır. C noktasında ise 0,206 sn'den 0,269 sn'ye olan artış, ark akımı artışı ile birlikte ark flaş enerjisinin ciddi oranda artmasına sebep olmuştur.

Şekil 5.11'de Senaryo 1'den Senaryo 2'ye yüzdesel değişim gösterilmiştir.



Şekil 5.11 Senaryo 1'den Senaryo 2'ye Yüzdesel Değişim

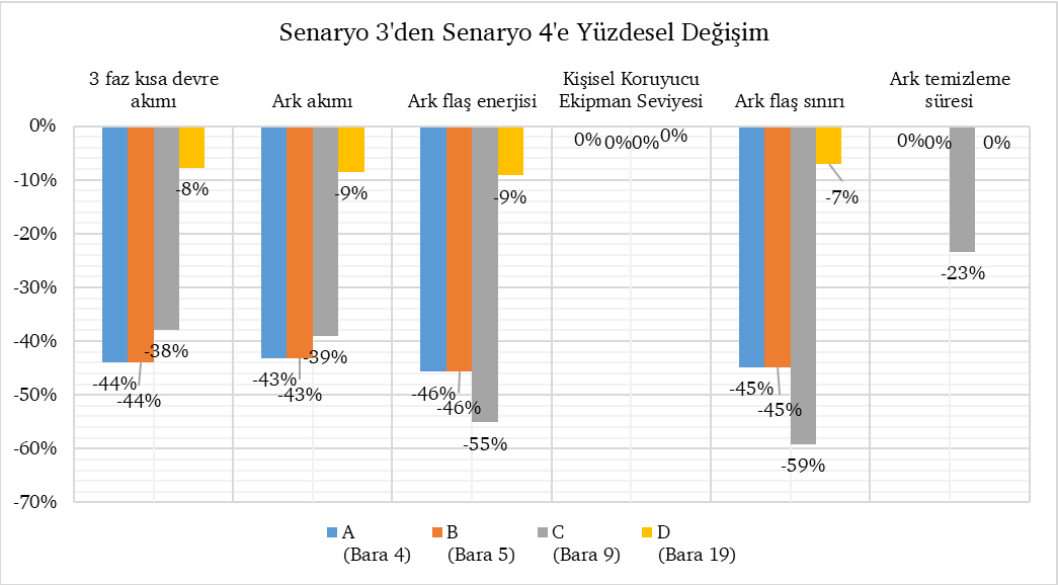
Senaryo 1 ile Senaryo 2'nin kıyaslanması bize; A ve B baraları arasındaki ana kuplaj bağlantısının kapalı olması ile tek bir bara haline gelmesinin, arıza akımına generatör katkısını ciddi oranda hissettirmiştir. Ayrıca, ark flaş analizi açısından sistemin Senaryo 1 çalışma modunda çalışmasının sistem güvenliği ve işletme esnekliği açısından çok uygun olmadığı görülmüştür. Eğer, Senaryo 1'deki çalışma modunda sistem işletilecekse A, B ve D baraları gibi bazı baralarda ekstra önlemlerin alınması gerekmektedir.

5.2.2.2 Senaryo 3 - Senaryo 4 Karşılaştırması

Generatör sisteminin devrede olmadığı senaryo 3 ve 4'de temel fark ana kuplaj bağlantısının (3. Anahtarın) açık veya kapalı olmasıdır. Senaryo 4'de A, B ve C baralarında 3 faz kısa devre akımı 5 kA seviyelerinde iken, Senaryo 3'de 8-9 kA seviyelerindedir. Bu artışın temel sebebi A ve B baralarının tek bir bara gibi olması ile 6 MVA'lık iki transformatörün de arıza akımlarına katkıda bulunmasıdır.

Ark flaş enerjisi, Senaryo 4'e kıyasla Senaryo 3'de; A ve B baralarında %84, C barasında %123, D barasında ise %10 artış göstermiştir. Ark flaş enerjisinde bu ölçekte değişiklikler olmasına rağmen enerji seviyesi 0-4 cal/cm^2 aralığında kaldığı için kişisel koruyucu ekipman seviyesi değişmemiştir. Ark flaş sınırı da açığa çıkan enerjinin değişmesi sebebiyle; A ve B baralarında 1,8 katına, C barasında 2,4 katına çıkmıştır. D barasında ise sadece 0,1 m artmıştır.

Şekil 5.12'de Senaryo 3'den Senaryo 4'e yüzdesel değişim gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Senaryo 3'den Senaryo 4'e Yüzdesel Değişim

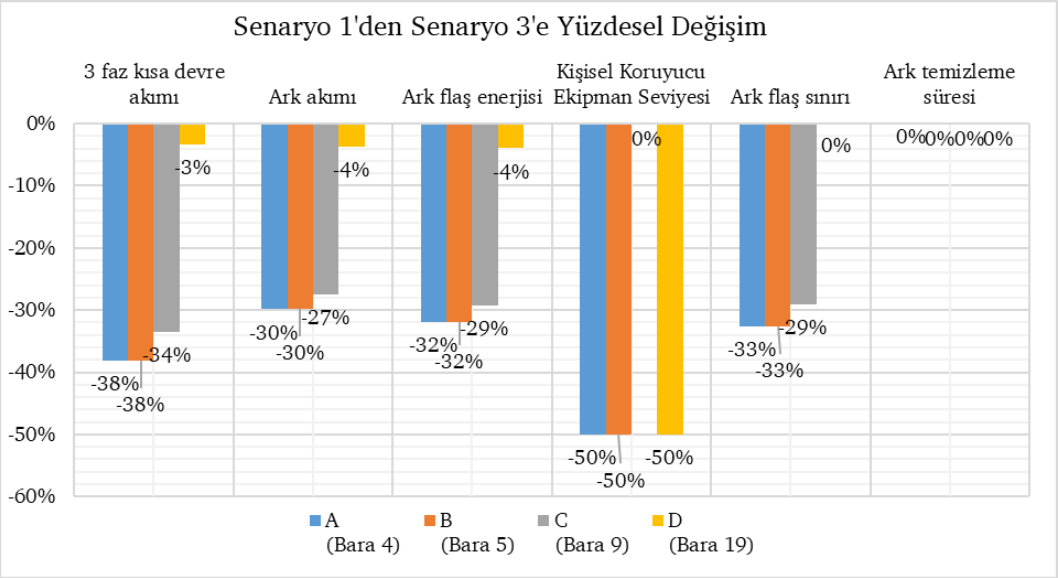
Şekil 5.12'den de görüleceği üzere Senaryo 3'den Senaryo 4'e yaşanan yüzdesel değişim dolayısıyla sistem esnekliği ve güvenirliği açısından Senaryo 4'ün Senaryo 3'e göre ark flaş analizleri açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir.

5.2.2.3 Senaryo 1 - Senaryo 3 Karşılaştırması

Senaryo 1 ve Senaryo 3'ü karşılaştırdığımızda; her ikisindede ana kuplaj anahtarının kapalı ve şebekeye bağlı oldukları için bu iki çalışma modunun temel farkı generatörlerin sisteme bağlı olup olmamasıdır. Hiç şüphesiz ki; generatör sisteminin bağlı olması kısa devre arıza akımlarını arttıracağından, ark flaş analizlerine de ciddi anlamda etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Senaryo 3'e kıyasla Senaryo 1'de; özellikle C barasında ark akımının 8,1 kA'den 11,1 kA'e çıkması ile ark flaş enerjsi 2,76'dan 3,9 cal/cm^2'ye çıkmıştır. Bu sebeple, kişisel koruyucu ekipman seviyesi neredeyse bir üst seviyeye çıkacak hale gelmiştir. Ark flaş sınırında yaşanan A ve B barasındaki %48'lik, C barasındaki %40'lık artış bize çalışma modundaki farklılıkların ark olaylarına olan etkisini göstermektedir.

Şekil 5.13'de Senaryo 1'den Senaryo 3'e yüzdesel değişim gösterilmiştir. Buradanda görüleceği üzere Senaryo 3'de, ark flaş analizleri açısından Senaryo 1'e göre ciddi oranda düşüşler meydana gelmiştir.



Şekil 5.13 Senaryo 1'den Senaryo 3'e Yüzdesel Değişim

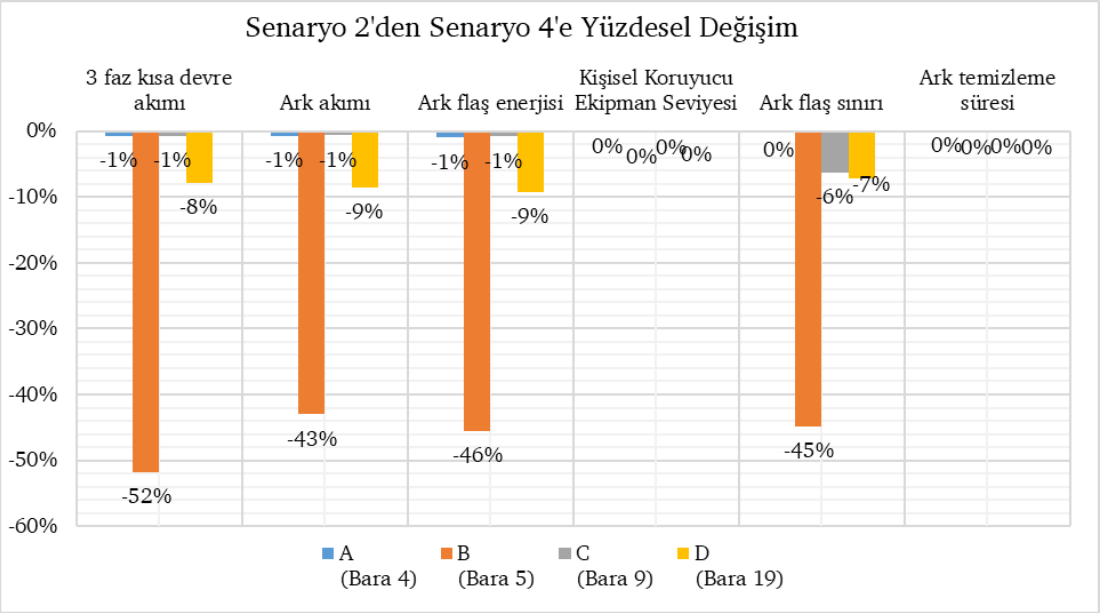
5.2.2.4 Senaryo 2 – Senaryo 4 Karşılaştırması

Senaryo 2 ve 4'ün kıyaslanması bize; kuplajın olmadığı durumda, şebekeye bağlı sistemde genaratörlerin bağlı olup olmamasının, ark flaş analizlerine olan etkisini incelememize olanak sağlamaktadır. Tablo 5.5 ve Tablo 5.9'dan da görüleceği üzere A ve C baralarında arıza akımlarında ufak değişiklikler olsa da genaratörün bağlandığı tarafta olmadıkları için ark arızası ve etkileri açısından önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Generatör sistemlerinin bağlandığı B barasında; Senaryo 4'e kıyasla Senaryo 2'de arıza akımının 2 kattan fazla arttığı , ark akımının ise 1,75 katına çıktığı görülmüştür. Bu sebeple, ark flaş enerjisi %83 artmış, ark flaş sınırı ise 1,6 m'den 2,9 m'ye çıkmıştır.

Alçak gerilim D barasında, ark akımındaki %9'luk artış, ark enerjisinde %10'luk bir artışa sebebiyet vermiştir.

Şekil 5.14'de Senaryo 2'den Senaryo 4'e yüzdesel değişim gösterilmiştir. Görüldüğü üzere en büyük değişiklik B barasındadır. Ark akımı, ark flaş enerjisi ve ark flaş sınırında sırasıyla %43, %46 ve %45 azalma meydana gelmiştir.



Şekil 5.14 Senaryo 2'den Senaryo 4'e Yüzdesel Değişim

5.2.3 Ark Flaş Enerjisi Azaltma Yöntemlerinin Etkisinin Incelenmesi

5.2.3.1 Sistem Çalışma Modunun Etkisi

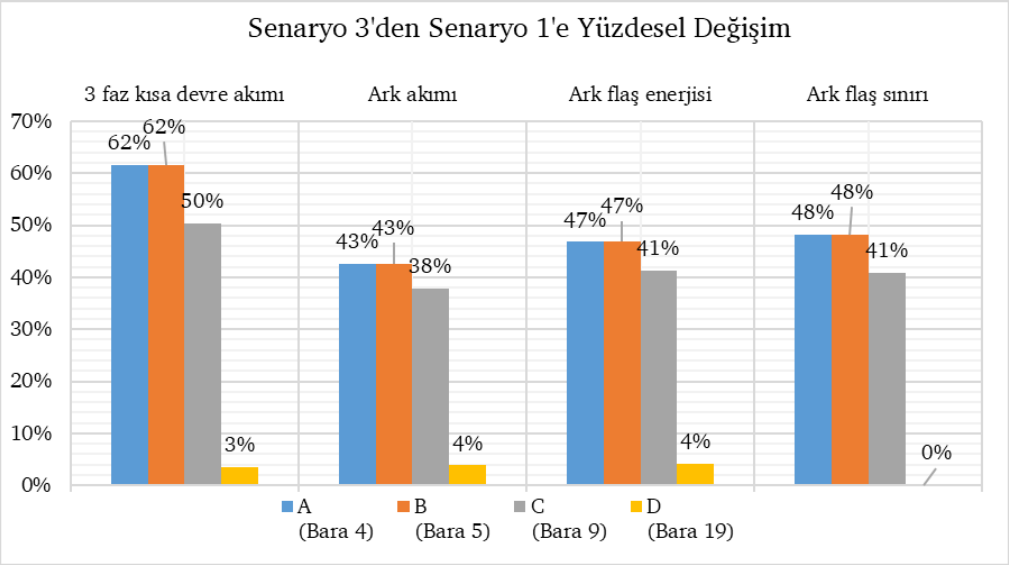
Önceki bölümlerde verilen ark flaş analiz verileri ve karşılaştırma yorumlarında da görüleceği üzere sistem çalışma moduna göre ark flaş arızalarının etkileri değişkenlik göstermektedir. İncelenen örnek sistemde görülmüştür ki, generatör sisteminin bağlı olmasının arıza akımına ciddi oranda etkisi vardır. Ayrıca, ana kuplaj anahtarının kapalı olması ile tek bir bara haline gelen A ve B baraları sonucunda, kısa devre arıza akım değerleri artmakta dolayısıyla ark flaş tehlikesi de artmaktadır. Bu yüzden, sistemin esnekliği ve güvenirliğini arttırmak için ana kuplaj anahtarı açık konumdayken sistemin işletilmesi gerçekleştirilmelidir. Bu şekilde baraların birbirinden ayrılması ile herhangi bir arızada farklı kaynakların arıza akımına katkısının engellenmesi bara ayırma yöntemi olarak da bilinmektedir.

Bir sanayi tesisi için, enerji üretim sistemleri ile enerjiyi üreterek kullanmak direkt olarak sadece şebekeden almaya göre sistem sürekliliği ve ekonomik açıdan daha iyi olmasına rağmen arıza akımlarının artması dolayısıyla çeşitli riskler barındırmaktadır. Tesisin enerji ihtiyacı için şebekeye paralel olarak bağlanan kojenerasyon, güneş enerjisi gibi enerji üretim tesisleri ilave ark flaş önlemleri alınması ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Örneğin, Senaryo 1 ve Senaryo 3 karşılaştırıldığında Generatör sisteminin bağlı olduğu durumda görülmüştür ki; A ve B orta gerilim baralarında ark flaş enerjisi %47 artabilmektedir.

Şekil 5.15'de Senaryo 3'den Senaryo 1'e yüzdesel değişim gösterilmiştir.

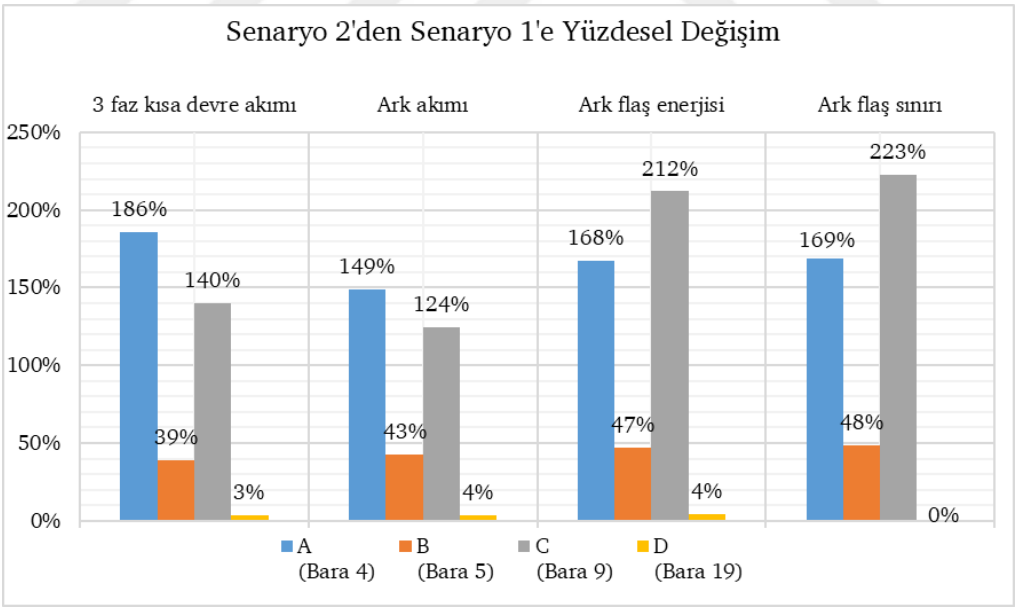
Ayrıca, benzer durum daha net bir şekilde Senaryo 2 ve Senaryo 4 karşılaştırıldığında özellikle ana kuplaj bağlantısı yokken generatör sisteminin bağlı olduğu B barasında görülebilmektedir. B barasında, ark flaş enerjisi %83 artmıştır.

Ana kublaj anahtarının kapalı olması ile tek bir bara haline gelen A ve B baraları sonucunda kısa devre arıza akım değerleri artmakta dolayısıyla ark flaş tehlikesi de artmaktadır.



Şekil 5.15 Senaryo 3'den Senaryo 1'e Yüzdesel Değişim

Şekil 5.16'da Senaryo 2'den Senaryo 1'e yüzdesel değişim gösterilmiştir. Görüleceği üzere ana kuplaj anahtarı kapatıldığı durumda ark flaş enerjisi %212'ye varan oranlarda artabilmektedir.



Şekil 5.16 Senaryo 2'den Senaryo 1'e Yüzdesel Değişim

Senaryo analizlerinden de görüleceği üzere tesis için en uygun çalışma modu farklı seçenekler değerlendirildikten sonra kararlaştırılmalı ve gerekirse belirli noktalarda ark flaş etkisini azaltma önlemleri alınmalıdır.

5.2.3.2 Ark Süresinin Azaltılmasının Etkisi

Ark flaş arızaları sebebiyle oluşan zararların ana sebebi ark esnasında ortaya çıkan enerjidir. Ark flaş enerjisinin en önemli ve değiştirilebilir parametrelerinden biri ark süresidir. Ark süresi azaltılarak ark flaş enerjisi önemli ölçüde azaltılabilir. Bu sayede, ark arızalarının yıkıcı etkisi minimize edilebilir. Ark arıza süresini azaltabilmek için birçok yöntem ve geliştirilmiş özel koruma ekipmanları vardır.

Bu bölümde, seçilen noktalarda en yüksek ark flaş enerji seviyesine sahip en kötü çalışma modu olan Senaryo 1 ele alınarak ark süresini azaltarak ark flaş enerjisini azaltma yöntemlerinden bazıları incelenmiştir. Orta gerilim rölelerinde, röle eğri tipi değiştirilerek; alçak gerilim kesicilerinde(termik manyetik şalter) ise ani açma özelliği eklenerek farklı çalışma durumları oluşturulmuştur.

Durum 1: Senaryo 1'deki mevcut durum yani orta gerilim röleleri ters (inverse) aşırı akım koruma eğrisine sahip, alçak gerilim kesicileri ise ani açma özelliği yok, belirli bir zaman gecikmesi ile açmaktadır

Durum 2: Orta gerilim röleleri aşırı ters (very inverse) aşırı akım koruma eğrisine sahip, alçak gerilim kesicileri ise ani açma özelliklidir.

Oluşturulan bu durumlar için yapılan ark flaş analizleri Tablo 5.12'de özetlenmiştir.

Tablo 5.12'den görüleceği üzere sistemde empedans değeri değişmediği için 3 faz kısa devre akımı ve ark akımları aynı kalmıştır. Fakat, Durum 2'de ark süreleri değiştiğinden sonuçlarda ciddi değişiklikler sözkonusudur. Ark süresinin A ve B baralarında 0,332 sn'den 0,205 sn'ye düşmesi, oluşan ark enerjisinin de azalmasını sağlamıştır. Ark flaş enerjisi %38, ark flaş sınırı ise %40 düşmüştür. C barasında da benzer şekilde röle karekteristiği değiştirilerek elde edilen daha kısa ark süresi, ark flaş enerjisi risk seviyesi bakımından ciddi oranda iyileşme sağlamıştır. C barasında ilk durumda 0,269 sn olan ark süresi ikinci durumda 0,174 sn; ilk durumda 3,9 cal/cm^2 olan ark enerjisi, ikinci durumda 2,52 cal/cm^2 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.12 Senaryo 1'de Durum 1 ve Durum 2 İçin Ark Flaş Analizi Verileri

	Senaryo 1 - Durum 1 (Şebeke ve Generatör bağlı, kuplaj var)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	14,755	14,755	12,185	38,377
Ark akımı(kA)	12,533	12,533	11,169	15,541
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	5,46	5,46	3,9	4,07
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	2	2	1	2
Ark flaş sınırı (m)	4,3	4,3	3,1	1,4
Ark temizleme süresi (sn)	0,332	0,332	0,269	0,12

	Senaryo 1 - Durum 2 (Şebeke ve Generatör bağlı, kuplaj var)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	14,755	14,755	12,185	38,377
Ark akımı(kA)	12,533	12,533	11,169	15,541
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	3,37	3,37	2,52	2,04
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	1	1	1	1
Ark flaş sınırı (m)	2,6	2,6	2	0,9
Ark temizleme süresi (sn)	0,205	0,205	0,174	0,06

Alçak gerilim D barasında ise ani açma özelliği ile 0,12 sn'den 0,06 sn'ye düşen ark süresi sonucunda; ark flaş enerjisi yaklaşık 2 kat azalmış, ark flaş sınırı da yaklaşık 1,5 katına düşmüştür. Tablo 5.12'den de görüleceği üzere alçak kerilim kesicisi belirli değerde ani açma yaparak açma süresini kısalttığından D barasında 3 faz kısa devre ve ark akımında bir değişiklik olmamıştır.

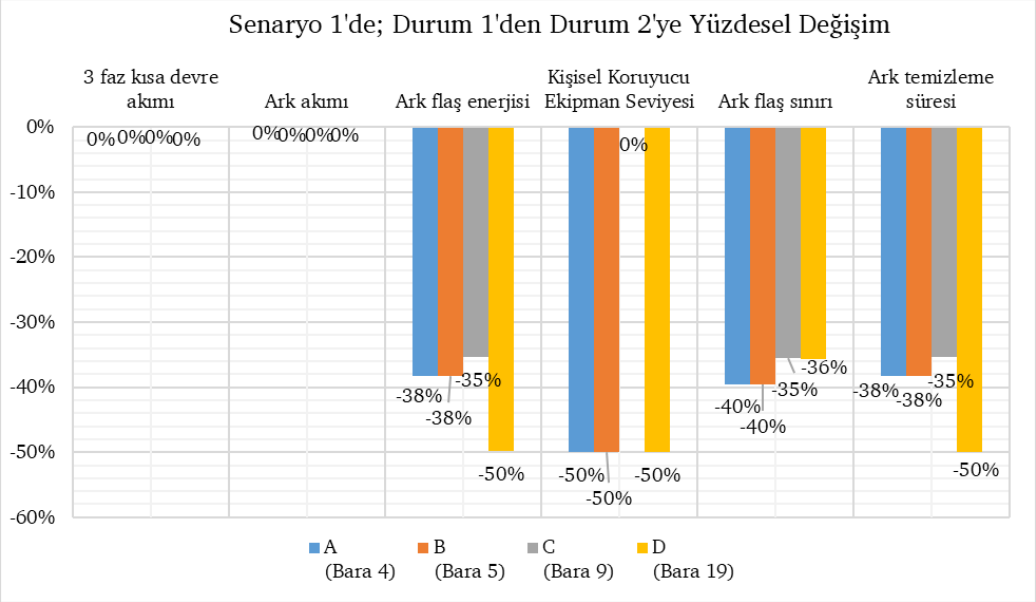
Bu bölümde, ark süresini kısaltma yaklaşımı yöntemleriyle yapılan iyileşirme ile daha önce kişisel koruyucu ekipman seviyesi 2 olan A,B ve D baralarında seviye 1'e indirilmiş. Neredeyse seviye 2 durumunda olan C barasında ise ciddi oranda ark flaş enerjisi azaltımı gerçekleştirilmiştir.

Yapılan değişiklikler orta gerilimde A barasında, alçak gerilimde ise D barasında röle akım-zaman eğrileri ve ark flaş analizi verileri açısından öncesi-sonrası olarak incelenerek aşağıda yorumlanmıştır.

Yapılan değişikliğin A barasındaki duruma etkisi;

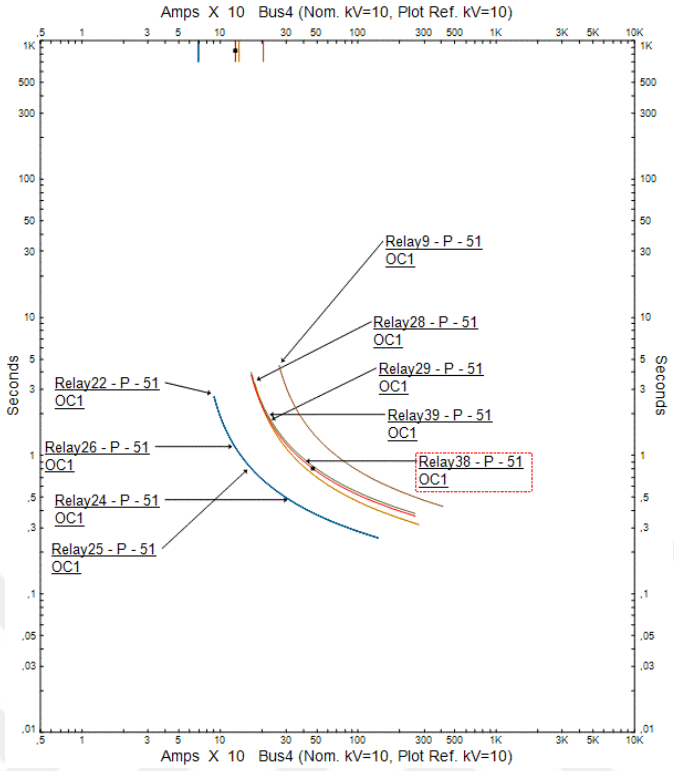
Bu bölümde, A barasındaki ark arıza süresinin ilgili rölenin çalışma karekteristiği değiştirilerek azaltıldığı ve bu sayede de o noktadaki ark flaş enerjisinin azaltılabileceği ayrıntıları ile gösterilmiştir. Şekil 5.17'de mevcut röle koordinasyonunda akım-zaman grafiği gösterilmiştir. Röleler ters zaman (IEEE Inverse) karakteristiğine sahiptir. Şekil 5.19'da görüldüğü üzere yapılan değişiklik ile rölelerin karakteristiği aşırı ters (IEEE very Inverse) olarak değiştirilmiştir. Bu sayede rölenin daha hızlı açması sağlanarak ark süresi kısaltılmış ve ark enerjisi de azaltılmıştır. Bu değişiklik öncesi durum Şekil 5.18, değişiklik sonrası durum Şekil 5.20'de görüleceği üzere ark süresi 0,332 sn'den 0,205 sn'ye, ark enerjisi de 5,45'den 3,37 cal/cm^2'ye düşmüş ve koruyucu ekipman seviyesi de 2'den 1'e inmiştir.

Şekil 5.17'de Senaryo 1'de; Durum 1'den Durum 2'ye yüzdesel değişim gösterilmiştir.



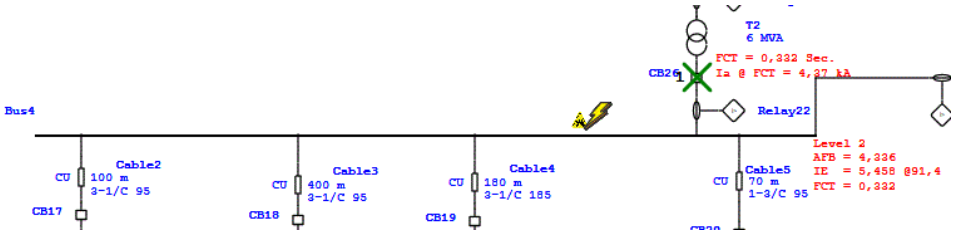
Şekil 5.17 Senaryo 1'de; Durum 1'den Durum 2'ye Yüzdesel Değişim

Şekil 5.18'de A barasındaki ilk durumdaki röle koordinasyon eğrisi gösterilmiştir.



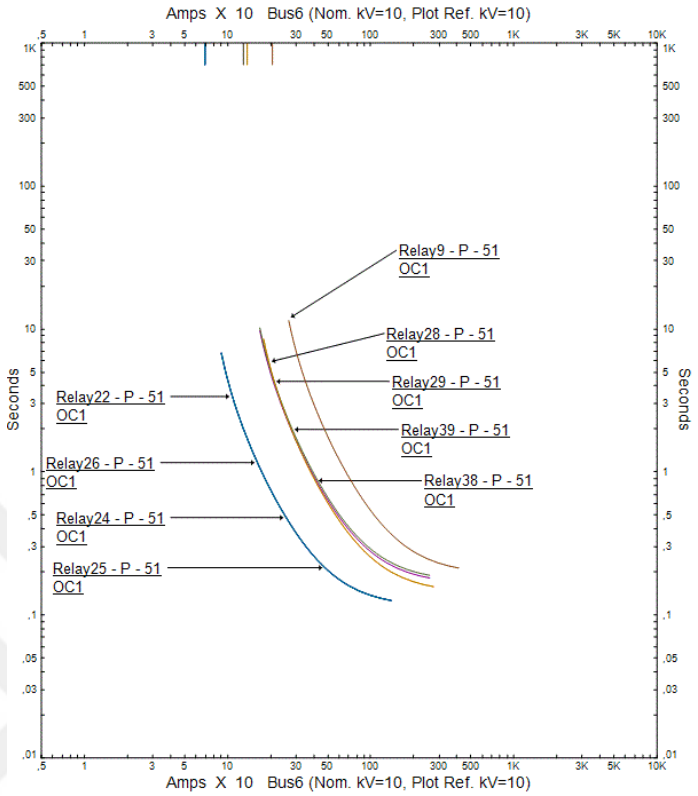
Şekil 5.18 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de A Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi

Şekil 5.19'de A barasında meydana gelen arızada ilk durumda, simülasyon programındaki ekran görüntüsü gösterilmiştir.



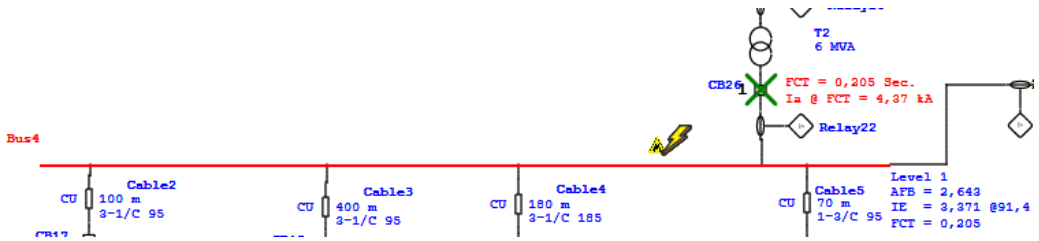
Şekil 5.19 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de A Barasındaki Arızada İlk Durumda Ark Flaş Analizi

Şekil 5.20'de A barasında değişiklik sonrası durumun röle koordinasyon eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.20 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 2'de A Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi (Değişiklik Sonrası Durum)

Şekil 5.21'de A barasında meydana gelen arızada değişik sonrası durumda simülasyon programındaki ekran görüntüsü gösterilmiştir.

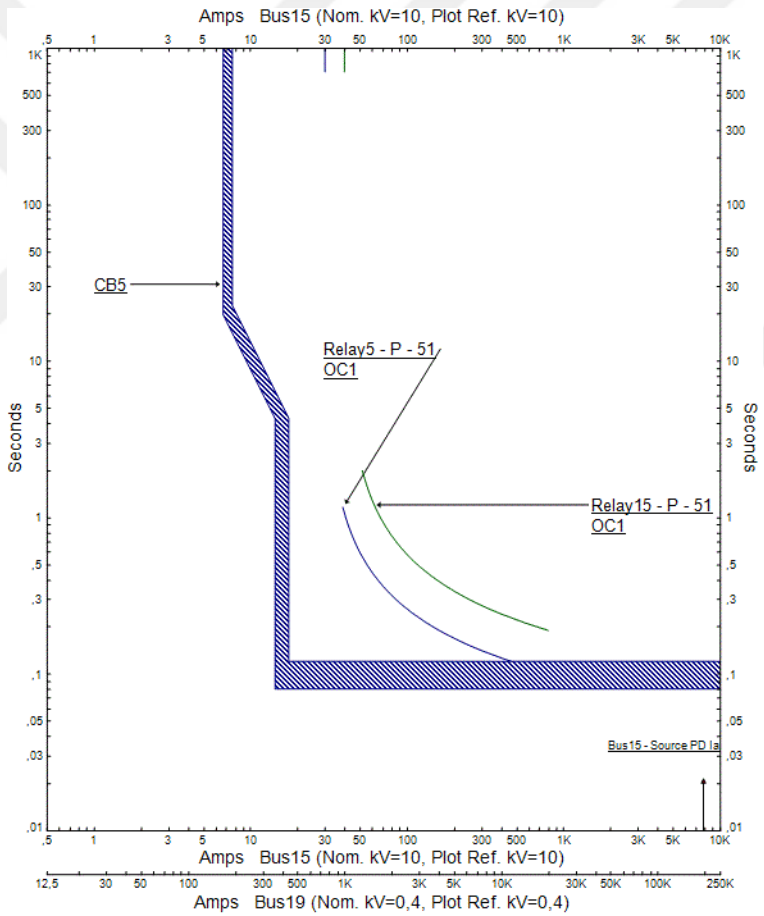


Şekil 5.21 Uygulama 2 Senaryo 1'de A Barasındaki Arızada Değişiklik Sonrası Ark Flaş Analizi

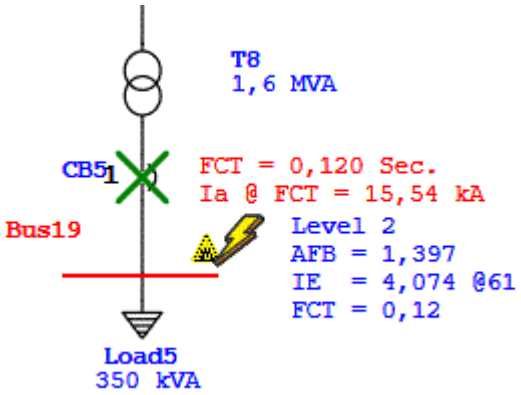
Yapılan değişikliğin D barasındaki duruma etkisi;

Tablo 5.12'den görüleceği üzere yine Senaryo 1 Durum 1'de alçak gerilim D barasında da ark flaş enerjisi 4,07 cal/cm^2 ve kişisel koruyucu ekipman seviyesi de 2. seviyededir. Ark akımı süresini azaltmak için diğer bir yöntem olarak ani açma özelliği eklenerek, ani açma süresi veya akım değeri azaltılarak bu baradaki ark flaş enerji seviyesi azaltılabilir. Bunun için D barasındaki alçak gerilim kesicisinde, ani açma özelliği aktive edilerek, ark süresi 0,12 sn'den 0,06 sn'ye düşürülmüş ve bu sayede de ark flaş enerjisi 4,07'den 2,03 cal/cm^2'ye inmiştir.

Şekil 5.22'de Durum 1'deki röle koordinasyonu, Şekil 5.23'de D barasında meydana gelen arızada ilk durumdaki ark flaş analizi gösterilmiştir.

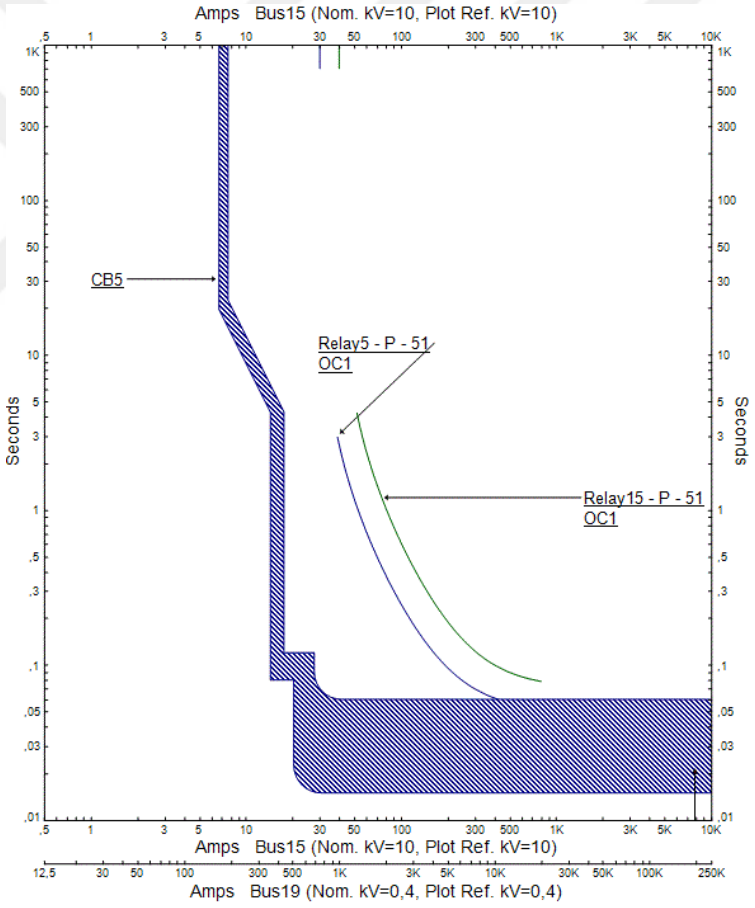


Şekil 5.22 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de D Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi

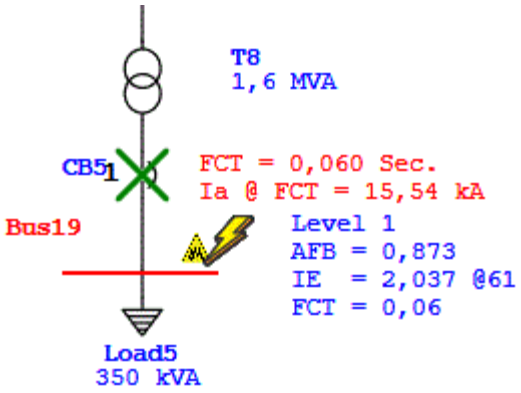


Şekil 5.23 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de D Barasındaki Arızada İlk Durum

Şekil 5.24'de Durum 2'deki röle koordinasyonu, Şekil 5.25'de D barasında değişiklik sonrası yapılan ark flaş analizi gösterilmiştir.



Şekil 5.24 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 2'de D Barasındaki Arıza İçin Röle Koordinasyon Eğrisi



Şekil 5.25 Uygulama 2 Senaryo 1 Durum 1'de D Barasındaki Arızada Değişiklikten Sonraki Durum

5.2.3.3 Arıza Akımının Azaltılmasının Etkisi

Arıza sonucu oluşan ark flaş enerjisinin etkisini azaltmak için alınabilecek önlemlerden biri de arıza akımının azaltılmasıdır. Arıza akımını sınırlandırabilmek için çeşitli uygulamalar ve teknolojiler vardır. Bunlardan bazıları; akım sınırlayıcı sigortalar, seri reaktör kullanımı, özel tasarlanmış akım sınırlayıcı koruyucu ekipmanlar vb. olarak sıralanabilir.

Bu bölümde seri reaktör kullanılarak yapılan arıza akımı sınırlama yaklaşımı, seri reaktörün konulduğu yere göre 2 farklı durum için analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde, orta gerilim röleleri ilk durumdaki gibi ters zaman eğrisi karakteristiğinde, alçak gerilim kesicileri de zaman gecikmeli durumundadır.

Koşul 1: Empedansı 20 ohm olan reaktör B barası ile generatör sistemlerinin bağlı olduğu Bara 6 arasına konumlandırılmıştır.

Koşul 2: Empedansı 20 ohm olan reaktör A barası ile B barası arasındaki ana kuplaj bağlantısına konumlandırılmıştır.

Bağlanılacak reaktörlerin empedansının hesaplanması için farklı değerlerdeki reaktörler ile analiz yapıldığında belirli bir değer sonrasında kısa devre akımlarına olan etkisinin azaldığı görülmüştür. Bu yüzden, 20 ohm'luk reaktör seçimi yapılmıştır. Ayrıca, reaktör değerini belirlerken iki koşuldaki hesaplamaları daha iyi analiz edebilmek için her iki koşulda da 20 ohm'luk reaktör seçilmesine karar verilmiştir. Ark flaş analizleri sonrasında en kötü senaryo olarak belirlenen

Senaryo 1'de yapılan değişikliklerle oluşturulmuş 2 farklı koşulun ark flaş analizleri ve Senaryo 1'de değişiklik yapılmadan önceki durumda elde edilmiş olan değerler Tablo 5.13'de özetlenmiştir.

Tablo 5.13 Senaryo 1'de İlk Durum, Koşul 1 ve Koşul 2 İçin Ark Flaş Analizi Verileri

	Senaryo 1- ilk durum (Şebeke ve Generatör bağlı, kuplaj var)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	14,755	14,755	12,185	38,377
Ark akımı(kA)	12,533	12,533	11,169	15,541
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	5,46	5,46	3,9	4,07
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	2	2	1	2
Ark flaş sınırı (m)	4,3	4,3	3,1	1,4
Ark temizleme süresi (sn)	0,332	0,332	0,269	0,12

	Senaryo 1 - Koşul 1 (Şebeke ve Generatör bağlı, kuplaj var)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	9,429	9,429	8,334	37,215
Ark akımı(kA)	9,075	9,075	8,325	15,022
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	3,85	3,92	2,85	3,93
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	1	1	1	1
Ark flaş sınırı (m)	3	3,1	2,2	1,4
Ark temizleme süresi (sn)	0,332	0,592	0,269	0,12

	Senaryo 1 - Koşul 2 (Şebeke ve Generatör bağlı, kuplaj var)			
Arıza Lokasyonu	A (Bara 4)	B (Bara 5)	C (Bara 9)	D (Bara 19)
3 faz kısa devre akımı (kA)	5,43	10,847	5,055	37,22
Ark akımı(kA)	5,288	8,984	5,039	15,007
Ark flaş enerjisi (cal/cm^2)	2,19	3,85	1,65	3,92
Kişisel Koruyucu Ekipman Seviyesi	1	1	1	1
Ark flaş sınırı (m)	1,7	3	1,3	1,4
Ark temizleme süresi (sn)	0,5	0,506	0,269	0,12

Tablo 5.13'ten görüleceği üzere, seri reaktör kullanılması ile arıza akımı sınırlandırılmış dolayısıyla ark akımı azalmıştır. Ark akımındaki azalmalarda ark flaş enerjisini düşürmüştür.

Koşul 1'de A ve B baralarında arıza akımı 9,429 kA'e, ark akımı ise 9,075 kA'e düşmüştür. A barasındaki ark flaş enerjisi 3,85 cal/cm^2'ye düşmüş olmasına rağmen, B barasında bu değer 3,92 cal/cm^2'dir. Çünkü Koşul 1'de B barası ile generatör sistemlerinin bağlı olduğu baralar arasına koyulan reaktör ile bu bölgedeki arıza akımı azaltılmış; fakat ters eğri karakteristiği dolayısıyla B barasındaki ark temizleme süresi 0,592 sn'ye çıkmıştır. Her ne kadar B arasındaki ark süresi artmış olsa da ark akımı azaldığı için ilk duruma göre ark flaş enerji seviyesi düşmüştür.

Koşul 1'de C barasındaki arıza akımı %32 , ark akımı %26 dolayısıylada ark flaş enerjisi %27 azalmıştır. D barasında ise ilk duruma göre arıza akımı yaklaşık 1 kA azalmış olsada ark akımında yaklaşık 0,5 kA civarında bir azalma sözkonusudur. Bu yüzden, ark flaş enerjisinde sadece 0,14 cal/cm^2 değişim yaşanmıştır.

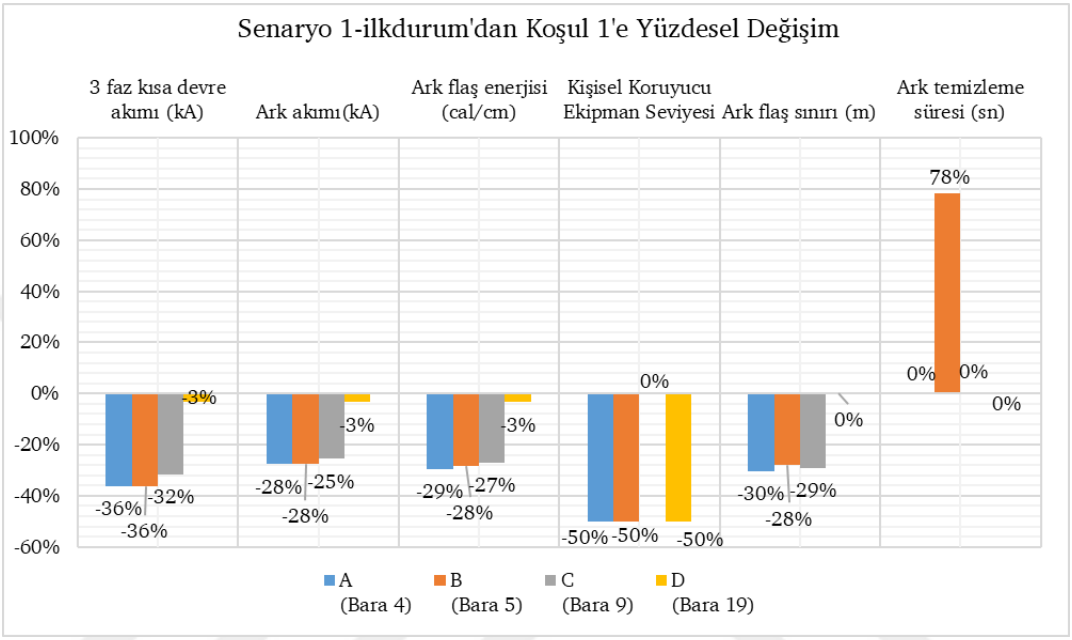
Koşul 1'de ark flaş sınırları, A barasında 3 m, B barasında 3,1 m, C barasında 2,2 m'ye düşmüş; fakat D barasında değişmemiştir. Kişisel koruyucu ekipman seviyeleri ise bu dört bara için de 1'dir.

Koşul 2'de A ve B baralarında arıza akımı Senaryo 1'in ilk durumuna kıyasla; A barasında 14,755 kA'den 5,43 kA'e, B barasında 14,755 kA'den 8,984 kA'e düşmüştür. Arıza akımındaki bu değişim, ark akımını A barasında %58, B barasında ise %28 azaltmıştır. Bu sayede, ark flaş enerjisi A barasında 2,19 cal/cm^2'ye , B barasında ise 3,85 cal/cm^2'ye düşmüştür. Röleler, ters zaman eğrisine sahip oldukları için ark süresi A ve B barasında 0,5 sn seviyelerine çıkmıştır.

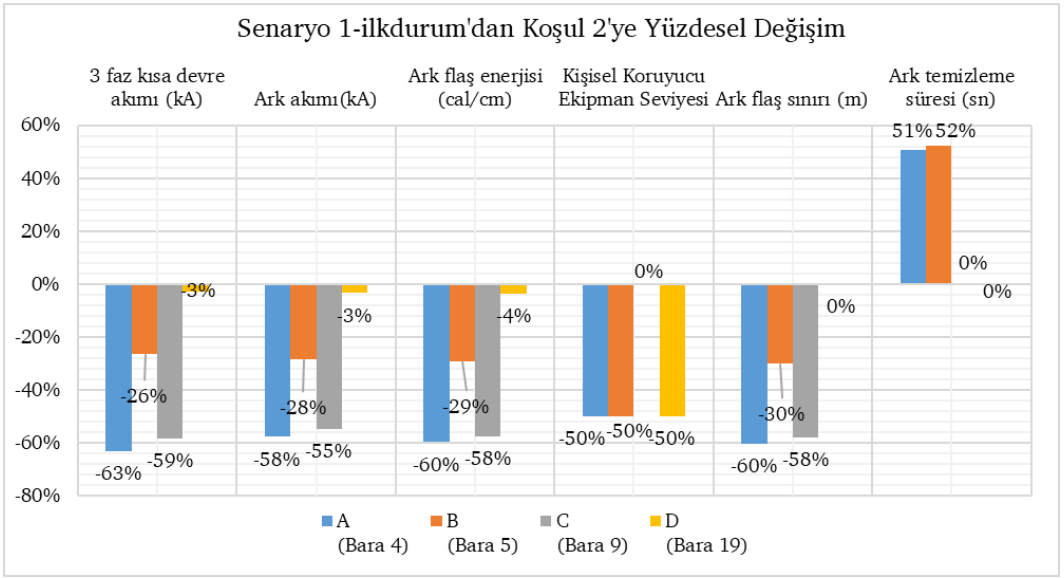
D barasında Koşul 1'deki gibi Koşul 2'de de büyük bir değişiklik olmazken, Koşul 2'de C barasında ark akımında 2,2 kat azalma dolayısıyla, ark flaş enerjisinde de 2,3 kat azalma gerçekleşmiştir.

Koşul 2'de ilk durum ile kıyas ile ark flaş enerjileri de ciddi oranda azalmış, A barasında 4,3 m 'den 1,7 m'ye, B barasında 4,3'den 3 m'ye, C barasında 3,1'den 1,3 m'ye düşmüş, D barasında yine bir değişiklik olmamıştır.

Senaryo 1'deki ilk durum dan Koşul 1'e yüzdesel değişim Şekil 5.26'da , Koşul 2'ye yüzdesel değişim ise Şekil 5.27'de gösterilmiştir.



Şekil 5.26 Senaryo 1-ilkdurum'dan Koşul 1'e Yüzdesel Değişim



Şekil 5.27 Senaryo 1-ilkdurum'dan Koşul 2'ye Yüzdesel Değişim

Güç sistemlerindeki arıza akım sınırlayıcı yöntemlerinden biri olan seri reaktör kullanımı, röle karakteristiğinden dolayı arıza süresini arttırsada, arıza akımının sınırlandırılması sayesinde ark flaş enerjisini ve olası etkilerini azaltıcı bir yöntem olarak kullanılabilir.

Koşul 1 ve Koşul 2'de, Senaryo 1'deki ilk duruma kıyasla arıza akımlarını azaltmış, ark flaş enerji seviyelerini ciddi oranda düşürmüştür. Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere, akım sınırlama yaklaşımı ile ark flaş enerjisi azaltımı planlanıyorsa Koşul 2'deki durum yani reaktörün ana kuplaj bağlantısına bağlanması tercih edilmelidir.

6
Sonuç ve Öneriler

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın giderek artması, güç sistemlerinin büyümesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte sisteme bağlanan dağıtık üretim sistemleri de yaygınlaşmaktadır. Elektrik güç sistemlerinin, bu şekilde genişleyerek kompleksleşmesi, oluşan arıza akımlarını arttırmakta, bunun sonucu olarak da verdiği zararları büyütmektedir. Ayrıca, elektrik güç sistemlerinde ve anahtarlama tesislerinde oluşturduğu zarar açısından en önemli arızalardan olan ark flaş arızalarının da ayrı olarak irdelenmesi, risk analizlerinin yapılması ve gerekli önlemlerin alınması ihtiyacını beraberinde getirmektedir.

Bu tez çalışmasında ark flaş arızaları ile ilgili yapılan literatürdeki çalışmalar incelenmiş, ark arızasının sebepleri, olası etkileri ve zararları açıklanmış, ark arızaları hesaplama yöntemleri sunulmuş, ark flaş arızalarının etkilerini azaltıcı ve koruyucu önlemler belirtilmiştir. Ayrıca, örnek sistemlerde yapılan simülasyon çalışmaları ile farklı çalışma koşullarında sistemin ark flaş analizleri gerçekleştirilmiş ve gerekli noktalar için ark flaş enerjisini azaltıcı çözüm yöntemleri kullanılarak örnek iyileştirmeler yapılmıştır.

Farklı çalışma senaryolarında gerçekleştirilen analizlerde görülmüştür ki; sistem çalışma modunun ark flaş analizlerine olan etkisi oldukça yüksektir. Bu yüzden özellikle birden fazla kaynağın entegre olarak çalıştığı sistemlerde yüksek kısa devre akımları dolayısıyla ark flaş arızalarının muhtemel tehlikelerini önlemek için ekstra önlemler alınmalıdır.

Tez çalışması kapsamında ele alınan sistemlerde çok sayıda senaryo dikkate alınarak, ilgili bölümlerde elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Çalışma modunun etkisinin önemini vurgulamak amacıyla Bölüm 5.2.1'de incelenen senaryolardan ark analizi açısından en iyi durum olan Senaryo 4 ile en kötü durum olan Senaryo 1'in karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlar A ve B baraları için şu şekilde özetlenebilir. Senaryo 4'te arıza akımı 5,12 kA iken Senaryo 1'de 14,75 kA'dir. Bu

durum %188'lik değişimi ifade etmektedir. Benzer şekilde ark akımı ve ark flaş enerjisinde de sırasıyla %150 ve %170'lik farklar oluşmaktadır.

Ark etkisinin azaltılması için uygulamada ve literatürde pek çok yöntem önerilmektedir. Bunlardan 3 tanesi olan bara ayırma, röle ayarlarının değiştirilmesi ve arıza akım sınırlama yöntemlerinin etkileri Bölüm 5.2.3'de incelenmiştir.

İncelenen sistem için ana bara olarak tanımlanan 10 kV'luk A ve B baraları arasındaki kuplajın açılması ile B barasında oluşacak 3 faz arızası için meydana gelen ark flaş enerjisinin generatörlerin bağlı olduğu durumda %32, generatörlerin bağlı olmadığı durumda ise %45 azaldığı tespit edilmiştir.

Ark süresi azaltmanın etkisinin incelenmesi amacıyla koruma elemanı ayarları değiştirilmiştir. Normal çalışma modu ile karşılaştırıldığında B barasında, ark flaş enerjisinin %38, ark flaş sınırının %39 ve ark temizleme süresinin ise %38 azaldığı görülmüştür.

Arıza akımının azaltılması için seri reaktör kullanımının ark olayına etkilerinin analizi Bölüm 5.2.3.3'de verilmiştir. Burada kuplaj bağlantısına ve işletmedeki generatörler ile 10 kV'luk B barası arasına 20 ohm'luk reaktör bağlanması durumları incelenmiştir. En etkili durumun kuplajda kullanılan reaktör olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu noktada reaktör kullanmanın B barasındaki arıza için arıza akımı, ark akımı ve ark flaş enerjisini sırasıyla %26, %28, %29 azalttığını göstermiştir. Benzer şekilde alçak gerilim barası olan D barasındaki arıza için de aynı büyüklükler %3 , %3,5 ve %3,7 azalmıştır.

Sistemdeki iki ana baradan biri aynı zamanda da generatör sistemlerinin bağlı olmuş olduğu bara olan B barasında, uygulanan yöntemlerin ark flaş enerjisindeki yüzdesel değişimi, en kötü senaryo olan Senaryo 1'e göre kıyaslanmıştır. Buna göre B barasındaki ark flaş enerjisini, kuplaja reaktör yerleştirilmesi %29, bara ayırma yöntemi %32, ark süresinin azaltılması yöntemi ise %38 azaltmıştır.

Bara ayırma yöntemi sistem işletme anında iken her zaman mümkün olmayabilir, reaktör kullanarak akım sınırlama yaklaşımı ise sistem reaktansını değiştirdiği için koruma koordinasyonuna etkisi, gerilim düşümüne sebep olması, sistemdeki kayıpları arttırması ve maaliyeti açısından tercih edilmeyebilir. Bu yüzden ark flaş enerjisini azaltma yöntemlerinden ark süresi azaltma yaklaşımı öncelikli olarak önerilen yöntem olmuştur. Uygulanan yöntemlerin B barasındaki ark flaş enerjisine olan yüzdesel etkileri gözönüne alındığında %38 azalma oranı ile ark süresinin azaltılması yönteminin, karşılaştırılan yöntemlerden daha etkili olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, ark flaş arızalarının zararlarını minimize etmek için önleyici, aktif, pasif tüm yöntemler, sistem çalışma koşulları, ekonomik yaklaşımlarla entegre olarak kullanılmalı ve sistem bütünüyle değerlendirilmelidir.

Gelecekteki çalışmalarda;

- Değişen ve gelişen teknoloji ile üretilen ark flaş arızalarının etkilerini azaltıcı özel ürünlerin kullanımı ve etkilerinin araştırılması, farklı sistem ve çalışma senaryolarındaki ark arızalarının zararlarının incelenmesi,
- Ark flaş arızalarını önleyici-azaltıcı farklı çözüm yöntemlerinin ve bunların koruma sistemine etkisinin incelenmesi,
- Kullanılan çözüm yöntemlerinin harmonik, gerilim düşümü, kayıp, vb. sisteme olan etkilerinin incelenmesi,
- Değişen yük koşullarında dinamik, transient analizlerin gerçekleştirilmesi,

planlanmaktadır.

Kaynakça

[1] Lloyd B. G., Kyle D. C., Nicole G., (2017), “Complete Electrical Arc Hazard Classification System and Its Application”, IEEE Transaction on industry applications, 53, no:5, Sep/Oct 2017.

[2] Kaufmann, R. H. and Page, J. C., “Arcing fault protection for low-voltage power distribution systems nature of the problem,” AIEE Transactions Power Apparatus Systems, 79, pp. 169–167, June 1960.

[3] Stanback, H. I., “Predicting damage from 277-V single phase to ground arcing faults,” IEEE Transactions on Industry Applications, IA-13, no. 4, July/Aug. 1977.

[4] Lee R., (1982),” The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns”, IEEE Transaction on industry applications, IA-18, No:3, pp. 246-251, May/June 1982.

[5] Dunki-Jacobs, J. R., “The escalating arcing ground-fault phenomenon,” IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22, no. 6, Nov. /Dec. 1986.

[6] Heberlein, G. E., Jr., Higgins, J. A., and Epperly, R. A., “Report on enclosure internal arcing tests,” IEEE Industry Applications Magazine, 2, no. 3, pp. 35–42, May/June 1996.

[7] Jamil, S., Jones, R. A., McClung, L. B., “Arc and flash burn hazards at various levels of an electrical system,” Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications Society 42nd Annual, Denver, CO, pp. 317–325, Sept. 1995.

[8] Doughty R. L., Neal T.E. ve Floyd H.L., (2000), “Predicting Incident Energy to Better Manage the Electrical Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems”, IEEE Trans. Ind. Appl., 36, No:1, pp. 257-269.

[9] IEEE Std 1584™, (2002), IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, IEEE.

[10] Ozen K., Tor B., Cetintas M., Akgun A., Bara A., Oprea S., (2018), "Arc-Flash Risk Level Calculations based on Computer Simulations and Measures to Avoid Hazards”, 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), pp.1-4.

[11] Kumpulainen L., Dahl S., Ma J., (2008), “Mitigation of Arc-Flash Hazards and Reduction of Costs by Selective Arc-Flash Protection”, China International Conference on Electricity Distribution (CICED2008), pp 1-7.

[12] Khan A., Aman M., (2018), “Investigation of the effects of critical incident energy parameters using ETAP® to reduce arc flash hazards”, 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG), pp 1-6.

[13] Walsch P., Price M., (2016), “MV Controllable Fuses Installed to Reduce Arc Flash on Transformers Secondary”, IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW), pp 1-6.

[14] Hughes B., (2016), “Arc Flash Detection Prevents Catastrophic Damage”, IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW), pp 1-5.

[15] Inshaw C., Wilson R., (2005), “Arc Flash Hazard Analaysis and Mitigation”, 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 145- 157, 2005.

[16] Simms J., Johnson G., (2011), “Protective Relaying Methods For Reducing Arc Flash Energy”, 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp 1-5, 2011.

[17] Kanokbannakorn W., Hongesombut K., Teerakawanich N., Srisonphan S., (2016), “Arc Flash Hazard in Distribution System with Distributed Generation”, 2016 International Electrical Engineering Congress (iEECON2016), pp 377 – 380.

[18] Kay J. A., Kumpulainen L., (2013), “Maximizing protection by minimizing arcing times in medium voltage systems”, IEEE Trans. Ind. Appl., 49, No:4, pp 1920-1927, July/August 2013.

[19] Zhang Z., Rau S., Lee W., Gammon T., Johnson C. B., (2016), “Arc Flash Pressure Measurement System Design”, IEEE Tran. on Ind. App., 52, No: 6, Nov/Dec 2016.

[20] Majd A., Luo R, (2017), “An Improved Arc Flash Energy Calculation Method, and Application”, IEEE Transactions on Industry Applications, 53, No:5, pp. 5062 – 5067.

[21] Yin Q., Ding R., (2016), “Review of Arc Models in Distribution Networks”, MATEC Web of Conferences, The International Seminar on Applied Physics, Optoelectronics and Photonics (APOP 2016), 61.

[22] Lu S., Zhang D., Phung T., (2017), “Arcing fault detection in the scenario with renewable energy generation”, IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6869 – 6874.

[23] Kumpulainen L., (2016), “Aspects and Directions of Internal Arc Protection”, Doctoral thesis, University of Vaasa Faculty of Technology Department of Electrical Engineering and Energy Technology, Vaasa.

[24] Lee, R.H. (1987), “Pressures Developed by Arcs”, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-23, Issue 4. 760–763.

[25] Gammon, T., Lee, W.-J., Zhang, Z., Johnson, B.C. (2015), “Electrical Safety, Electrical Hazards & the 2018 NFPA 70E, Time to Update Annex K”, IEEE Transactions on Industry Applications, 51, Issue 4, 2015.

[26] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), (2004), “Personal Protective Equipment”, OSHA.

[27] NFPA 70E, (2015), Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA

[28] IEEE 1584b, (2011), IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations Amendment 2: Changes to Clause 4, IEEE.

[29] Doan D., (2010), “Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems”, IEEE Trans. Ind. Appl., 46, No: 6, pp 2299-2302, Nov/Dec 2010.

[30] Ammerman R, Gammon T., Sen P. Ve Nelson P., (2010), “DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations”, IEEE Trans. Ind. Appl., 46, No: 5, pp 1810-1819, Sep/Oct 2010.

[31] IEEE Std. C37.20.7, (2017), “Guide for Testing Metal-Enclosed Switchgear Rated Up to 38 kV for Internal Arcing Faults”, IEEE.

[32] Kingrey J., Painter D. ve Locker S. , (2011) ,“Applying High-Resistance Neutral Grounding in Medium-Voltage Systems”, IEEE Transactions On Industry Applications, 47, No: 3.

[33] Land, B., (2008), “The Behavior of Arcing Faults in Low-Voltage Switchboards”, IEEE Transactions On Industry Applications, 44, No: 2.

[34] Kumpulainen L., Hussain A., Rival M., Lehtonen M. ve Kauhaniemi K. , (2014) , “Aspects of arc-flash protection and prediction”, Electric Power Systems Research, 116, pp.77–86.

[35] Gould J., Wolfs P., (2016), “Arc Flash Hazard Analysis of Coal-Fired Power Station”, Australasian Universities Power Engineering Conference- AUPEC2016, pp 1-6.

[36] Brechtken D., (2001), “Preventive Arc Fault Protection”, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 28th October–2nd November 2001, Atlanta, pp. 311–316.

[37] Arvola J., Dahl S., Virtala T., (2013), “Improving medium voltage switchgear protection in compensated distribution networks”, CIRED 2013 Conference, 10–13 June 2013, Stockholm.

[38] Hussain, G.A., (2011), “Methods for arc-flash prediction in MV/LV switchgear”, M.Sc. thesis, Aalto University, School of Electrical Engineering, Aalto.

[39] Kumpulainen, L. , Hussain, G.A. , Lehtonen, M. , Kay, J.A. , (2013), “Preemptive arc fault detection techniques in switchgear and control gear” , IEEE Trans. Ind. Appl, 49, No: 4.

[40] Xiao, S., Moore, P.J., Judd, M.D., Portugues, I.E. (2007), “An Investigation into Electromagnetic Radiation due to Partial Discharges in High Voltage Acta Wasaensia 89 Equipment”, Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 24–28 June, 2007, Tampa, Florida, USA, 1–7.

[41] Metwally, I.A., (2004), “Status review on partial discharge measurement techniques in gas-insulated switchgear/lines”, Electric Power Syst. Res., 69, pp. 25–36.

[42] Lima S., Frazao O., Farias R., Araujo F., Ferreira L., Santos J., Miranda V., (2010), “Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges – a proof of concept”, IEEE Trans. Power Deliv., 25, No: 4, pp. 2526–2534.

[43] Goodman, M., (2007), “How ultrasound can detect electrical discharge non-invasively and help eliminate arc flash incidents”, 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, pp. 247-252.

[44] Balasubramanian, I., Graham A., (2010), “Impact of available fault current variations on arc-flash calculations”, IEEE Trans. Ind. Appl., 46,No: 5, Sep.-Oct. 2010.

[45] Shipp, D. , Wood, D. ,(2011) “Mitigating arc-flash exposure”, IEEE Ind. Appl. Mag., 17, No:4, pp. 28–37.

[46] Sweeting, D., (2009), “Arcing faults in electrical equipment”, IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Technical Conference, 14–16 September, Anaheim.

[47] Kay, J.A. (2005), “Selection, Application and Interchangeability of Medium Voltage Power Fuses in Motor Control Centers”, Conference Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 20–24 June 2005, pp. 95-104.

[48] Coşkuner B., (2016), “Düşük Empedanslı Diferansiyel Bara Koruma”, EMO İzmir Şubesi Bülten, Ekim 2016.

[49] Walker C., (2011), “Arc flash energy reduction techniques zone selective interlocking & energy-reducing”, IEEE/IAS Pulp & Paper Industry Technical Paper Conference, pp 42-54.

[50] Eaton, (2011), “Arc Flash Energy Reduction Techniques Energy-Reducing Maintenance Switching”, TP08324002E, USA

[51] Kay, J.A., Arvola, J. , Kumpulainen L., (2011), “Protecting at the speed of light”, IEEE Ind.Appl. Mag.,May-June 2011, 17, No:3, pp. 12-18

[52] Fortin M., Gerth J., McLaughlin R., Riffon P., (2008), “Short-circuit strength and short-circuit testing of power and distribution transformers”, IEEE/PES Transformers Committee Spring 2008 Meeting, March 2008, Charlotte, NC.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Makaleler

1. S. Baykul, O. Arikan, (2019), “Arc Flash Faults Calculations, Hazard Analysis and Reduction Methods”, International Journal of Advances in Computer and Electronics Engineering, 4, No. 3, pp. 1-9, March 2019.