



**SÜPERİLETKEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICILARIN
İNCELENMESİ VE ELEKTRİK İLETİM SİSTEMLERİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Buğra YILMAZ

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç.Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU
Temmuz-2016**

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

**SÜPERİLETKEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICILARIN İNCELENMESİ VE
ELEKTRİK İLETİM SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buğra YILMAZ

141113102

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik Tesisleri

Danışman: Doç.Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

Temmuz-2016

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

**SÜPERİLETKEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICILARIN İNCELENMESİ VE
ELEKTRİK İLETİM SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buğra YILMAZ

141113102

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :
Tezin Savunulduğu Tarih :**

Danışman : Doç.Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd.Doç.Dr. M. Temel ÖZDEMİR (F.Ü.)

: Yrd.Doç.Dr. Dursun ÖZTÜRK (B.Ü.)

Temmuz-2016

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmasını yöneten, tezin hazırlanması ve yazımı süresince bana daima yardımcı olan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU'na ve her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu yüksek lisans tezinin, ülkemizde süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar üzerine çalışma yapacak olanlara katkıda bulunmasını dilerim.

Buğra YILMAZ
Elazığ-2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti.....	3
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	7
1.3. Tezin Yapısı.....	7
2. ARIZA AKIMI VE ARIZA AKIMI SINIRLANDIRMA YÖNTEMLERİ.....	9
2.1. Arıza Akımı	9
2.2. Arıza Akımı Sınırlandırma Yöntemleri.....	10
2.2.1. Akım Sınırlayıcı Reaktörler.....	11
2.2.2. Solid-State Arıza Akımı Sınırlayıcılar	13
2.2.3. Akım Sınırlayıcı Sigortalar.....	17
2.2.4. I _s Sınırlayıcılar	20
2.2.5. Güç Sisteminin Yeniden Yapılandırılması	23
2.2.6. Bara Ayırma Yöntemi	23
2.2.7. Yüksek Empedanslı Transformatörler.....	23
2.2.7.1. Büyük Empedanslı Transformatörlerin Kullanımı	23
2.2.7.2. Küçük Güçlü Transformatörlerin Kullanımı	25
2.2.8. HVDC Kullanımı.....	26
2.2.9. Yüksek Gerilim Seviyeli İletim Hatlarının Kullanımı	26
2.2.10. Nötr Reaktörlerin Kullanımı.....	27
2.2.10.1. Transformatör Nötrünün Reaktörle Topraklanması	28
2.2.10.2. Generatör Transformatörünün Nötrünün Reaktörle Topraklanması	29

2.2.11. Nötr Noktası İzoleli Sistem	30
2.2.12. Manyetik Arıza Akımı Sınırlayıcılar	31
2.2.13. Hibrit Arıza Akımı Sınırlayıcılar	31
2.3. Arıza Akımı Sınırlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması	32
3. SÜPERİLETKEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICILAR.....	34
3.1. Giriş	34
3.2. İdeal SFCL Karakteristikleri	37
3.3. SFCL Tipleri.....	37
3.3.1. Rezistif SFCL	37
3.3.2. İndüktif SFCL.....	39
3.3.2.1. Korumalı Çekirdekli İndüktif SFCL.....	39
3.3.2.2. Doyurulabilir Çekirdekli İndüktif SFCL	41
3.4. SFCL Uygulamaları.....	44
3.5. SFCL ve Diğer Arıza Akımı Sınırlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	47
4. SFCL’NİN İLETİM SİSTEMLERİNDE KULLANIMI.....	50
4.1. SFCL’nin Modellenmesi	50
4.2. Uygulama	51
4.2.1. Yükte Arıza Durumu	53
4.2.2. Barada Arıza Durumu.....	57
4.2.3. İletim Hattında Arıza Durumu.....	61
4.3. Sonuçlar ve Yorumlar.....	65
5. SONUÇLAR.....	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	76

ÖZET

Güç sistemlerinde zaman zaman çeşitli sebeplerle arızalar meydana gelmektedir. Bu arızaların sebep olduğu yüksek akım seviyeleri, sistem ve sistemdeki elemanlar için genellikle tehlikeli durumlar oluşturmaktadır. Arıza akımlarının sınırlandırılması, bu akımların zorlayıcı termal ve dinamik etkilerinden sistemin ve sistem elemanlarının korunması anlamına gelir. Literatürde birçok arıza akımı sınırlandırma yöntemi vardır. Bu yöntemler genellikle birbirinden farklı olmasına rağmen hepsinin ortak amacı, sistemin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamaktır. Sürekli gelişim içinde olan güç sistemlerinde arıza akımı sınırlayıcıların önemi giderek artmaktadır. Arıza akımı sınırlayıcıları sayesinde mevcut sistemde herhangi bir değişiklik yapılmaksızın işletme sürekliliği sağlanabilir. Bu çalışmada, arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinin çalışma prensipleri ve yapıları incelenmiş, ayrıca süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar (SFCL) detaylı olarak ele alınmıştır. MATLAB-Simulink’de IEEE 14 baralı sistem kullanılarak yapılan simülasyonlar ile SFCL’nin elektrik enerjisi iletim sistemlerine uygulanabilirliği incelenmiş ve SFCL’nin sistem üzerindeki etkileri dalga şekilleriyle gösterilmiştir. Ayrıca, aynı şartlarda ve aynı arıza durumlarında SFCL yerine akım sınırlayıcı reaktörler kullanılarak simülasyonlar tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç sistemi, Arıza akımı, Akım sınırlayıcı, Süperiletken, SFCL.

SUMMARY

The Investigation of Superconductor Fault Current Limiters and Research of Availability in Electrical Transmission Systems

The faults in power systems occur from various reasons, sometimes. High current levels caused by such faults, generally comprise a hazardous situation for system and elements of the system. Limiting of fault currents mean to protect the system and the system components from challenging thermal and dynamic effects of these currents. In the literature there are several fault current limiting methods. Although these methods are generally different from each other, the common goal is to ensure system safety and reliability. Importance of fault current limiters is increasing gradually in power systems that is continuously improving. By using fault current limiters can be provided operation continuity without any change in the existing system. In this study, operating principles and structures of the fault current limiting methods have been investigated besides the superconducting fault current limiters (SFCL) were discussed in detail. Their availability in electric power transmission systems have been investigated by simulations in MATLAB-Simulink using IEEE 14 buses system and impacts of SFCL on the system were shown with waveforms. Moreover, instead of SFCL in the same conditions and the same fault situations was repeated simulations using current limiting reactors and the results were compared.

Keywords: Power system, Fault current, Current limiting, Superconducting, SFCL.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. FCL'siz ve FCL'li basit güç sistemi	10
Şekil 2.2. Üç fazlı CLR	12
Şekil 2.3. Endüktansın arıza akımı üzerindeki etkisi.....	13
Şekil 2.4. Solid-state arıza akımı sınırlayıcının temel yapılandırması	14
Şekil 2.5. SSFCL'nin kontrol diyagramı	15
Şekil 2.6. SSFCL devre şeması	16
Şekil 2.7. SSFCL modeli	16
Şekil 2.8. CLF uygulaması	17
Şekil 2.9. Ark ve kuvars kum arasındaki etkileşim	18
Şekil 2.10. CLF'li sistemdeki akımın değişimi	19
Şekil 2.11. Arıza sırasındaki akım ve gerilim değişimleri	19
Şekil 2.12. I_s Sınırlayıcı	20
Şekil 2.13. I_s sınırlayıcının kısımları	21
Şekil 2.14. Arıza sırasında I_s sınırlayıcıdaki akım komütasyonu	21
Şekil 2.15. I_s sınırlayıcının genel yapısı	22
Şekil 2.16. I_s sınırlayıcı ile kesici karşılaştırması	22
Şekil 2.17. Transformator sekonderindeki kısa devrenin tek hat diyagramı	24
Şekil 2.18. Bir adet transformator kullanımı	25
Şekil 2.19. Birden fazla küçük güçlü transformator kullanımı.....	26
Şekil 2.20. Hava çekirdekli nötr reaktörleri	27
Şekil 2.21. Hava çekirdekli nötr reaktörünün yapısı	28
Şekil 2.22. Nötr reaktörü ile topraklanan sistem	28
Şekil 2.23. Generatör transformatorünün nötr reaktör ile topraklanması.....	29
Şekil 2.24. Nötr noktası izoleli sistem.....	30
Şekil 2.25. Manyetik FCL eşdeğer devresi.....	31
Şekil 2.26. Hibrit FCL eşdeğer devresi	32
Şekil 3.1. Süperiletkenlik kritik yüzeylerinin faz diyagramı.....	35
Şekil 3.2. YBCO'nun dış manyetik alandaki sıcaklık-direnç eğrisi.....	35
Şekil 3.3. SFCL'nin uygulama yerleri.....	36

Şekil 3.4. Rezistif SFCL devresi ve I_{Hat}/I_c 'nin fonksiyonu olan R_{si} üzerindeki gerilim.....	38
Şekil 3.5. Şönt dirençli rezistif SFCL malzemesinin yapısı	38
Şekil 3.6. Korumalı çekirdekli indüktif SFCL devresi	39
Şekil 3.7. Eksenel kesitte süperiletkenlik durumunda manyetik indüksiyon	40
Şekil 3.8. Eksenel kesitte rezistif durumda manyetik indüksiyon.....	40
Şekil 3.9. Açık ve kapalı çekirdekli indüktif SFCL	41
Şekil 3.10. Doyurulabilir çekirdekli indüktif SFCL devresi	42
Şekil 3.11. Kısa devre akımının dalga şekilleri	43
Şekil 3.12. Sıcaklık dalga şekilleri	43
Şekil 3.13. Direnç dalga şekilleri.....	43
Şekil 3.14. SFCL uygulaması	44
Şekil 3.15. 15 kV Saturable-Core SFCL uygulaması.....	44
Şekil 3.16. 220 kV 300 MVA SFCL	45
Şekil 3.17. 12 kV 800 A SFCL.....	45
Şekil 3.18. 12 kV 800 A SFCL.....	46
Şekil 3.19. 12 kV 2400 A SFCL.....	46
Şekil 3.20. Rezistif SFCL uygulaması	46
Şekil 4.1. Rezistif SFCL Simulink modeli	51
Şekil 4.2. Rezistif SFCL Simulink alt sistemi	51
Şekil 4.3. IEEE 14 baralı sistem	52
Şekil 4.4. IEEE 14 baralı sistemin tek hat şeması	53
Şekil 4.5. Yükün arızasız durumdaki gerilimi ve akımı	53
Şekil 4.6. Yükte FCL olmadığı durumda tek faz-toprak arızası.....	54
Şekil 4.7. Yükte CLR'li durumda tek faz-toprak arızası.....	54
Şekil 4.8. Yükte SFCL'li durumda tek faz-toprak arızası	55
Şekil 4.9. Yükün arızasız durumdaki gerilimi ve akımı	55
Şekil 4.10. Yükte FCL olmadığı durumda üç faz arızası	56
Şekil 4.11. Yükte CLR'li durumda üç faz arızası.....	56
Şekil 4.12. Yükte SFCL'li durumda üç faz arızası	57
Şekil 4.13. Baranın arızasız durumdaki gerilimi ve akımı	57
Şekil 4.14. Barada FCL olmadığı durumda tek faz-toprak arızası	58
Şekil 4.15. Barada CLR'li durumda tek faz-toprak arızası	58
Şekil 4.16. Barada SFCL'li durumda tek faz-toprak arızası.....	59

Şekil 4.17. Baranın arızasız durumdaki gerilimi ve akımı	59
Şekil 4.18. Barada FCL olmadığı durumda üç faz arızası.....	60
Şekil 4.19. Barada CLR'li durumda üç faz arızası	60
Şekil 4.20. Barada SFCL'li durumda üç faz arızası	61
Şekil 4.21. İletim hattının arızasız durumdaki gerilimi ve akımı	61
Şekil 4.22. İletim hattında FCL olmadığı durumda tek faz-toprak arızası	62
Şekil 4.23. İletim hattında CLR'li durumda tek faz-toprak arızası	62
Şekil 4.24. İletim hattında SFCL'li durumda tek faz-toprak arızası	63
Şekil 4.25. İletim hattının arızasız durumdaki gerilimi ve akımı	63
Şekil 4.26. İletim hattında FCL olmadığı durumda üç faz arızası.....	64
Şekil 4.27. İletim hattında CLR'li durumda üç faz arızası	64
Şekil 4.28. İletim hattında SFCL'li durumda üç faz arızası	65

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması	32
Tablo 4.1. Yük için tek faz-toprak arızası tepe değeri karşılaştırması	66
Tablo 4.2. Yük için üç faz arızası tepe değeri karşılaştırması	66
Tablo 4.3. Bara için tek faz-toprak arızası tepe değeri karşılaştırması.....	66
Tablo 4.4. Bara için üç faz arızası tepe değeri karşılaştırması	67
Tablo 4.5. İletim hattı için tek faz-toprak arızası tepe değeri karşılaştırması.....	67
Tablo 4.6. İletim hattı için üç faz arızası tepe değeri karşılaştırması	68

SEMBOLLER LİSTESİ

V_k	: Kaynak gerilimi
Z_k	: Kaynak empedansı
$Z_{yük}$: Yük empedansı
Z_a	: Arıza empedansı
Z_{FCL}	: FCL empedansı
I_{sistem}	: Sistem akımı
ωL	: CLR reaktansı
I_a	: Arıza akımı
$C1$: SSFCL'deki kapasitör bankı
$L1$: SSFCL'deki reaktör
$A1$: SSFCL'deki hızlı kapanan anahtar
$Z1$: SSFCL'deki ani akım sınırlayıcı düşük empedans
$Z2$: SSFCL'deki ani akım sınırlayıcı düşük empedans
ZnO	: Varistör
di/dt	: Akımın değişim oranı
dv/dt	: Gerilimin değişim oranı
$\% U_k$: Nisbi kısa devre gerilimi
U	: Kısa devre akımının hesap edileceği fazlar arası baz gerilim
N_n	: Anma baz gücü
Z	: Transformator kısa devre empedansı
U_{fn}	: Faz-nötr besleme gerilimi
I_k	: Kısa devre akımı
I_{k1}	: Tek adet transformator kullanımındaki kısa devre akımı
I_{k2}	: Birden fazla küçük güçlü transformator kullanımındaki kısa devre akımı
N	: Transformator gücü
Z_N	: Nötr reaktörü
C_f	: Fazlar arası kapasite
C_t	: Fazlar ile toprak arası kapasite
Z_{NTr}	: Transformator nötr reaktörü
Z_{NG}	: Generator nötr reaktörü
A	: Ayırıcı
I_{yk}	: Yüksek gerilim faz-toprak kısa devre akımı
I_{gk}	: Generator kısa devre akımı
T_c	: Kritik sıcaklık
J_c	: Kritik akım yoğunluğu
H_c	: Kritik manyetik alan
I_c	: Kritik akım
R_{si}	: Süperiletken direnci
I_{Hat}	: Hat akımı
R_m	: SFCL maksimum direnci
T_{si}	: Zaman sabiti
t_0	: Rezistif bölgeye geçiş başlangıcı
t_1, t_2	: Birinci ve ikinci toparlanma süresi
a_1, a_2, b_1, b_2	: Birinci mertebeden lineer fonksiyonun katsayıları

KISALTMALAR LİSTESİ

SFCL	: Süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
FCL	: Arıza akımı sınırlayıcılar
HVDC	: Yüksek gerilimli doğru akım
CLR	: Akım sınırlayıcı reaktörler
SSFCL	: Solid-state arıza akımı sınırlayıcılar
GTO	: Gate Turn Off Thyristor
BPA	: Bypass anahtarı
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
SGTO	: Super Gate Turn Off Thyristor
CLF	: Akım sınırlayıcı sigortalar
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
HVDC	: Yüksek gerilimli doğru akım
BTB	: Back-to-Back bağlantı
YG	: Yüksek gerilim
OG	: Orta gerilim
BIL	: Temel izolasyon seviyesi
PTC	: Pozitif ısı katsayısı
SVC	: Statik VAR kompanzatör
HTS	: Yüksek sıcaklıklı süperiletken
LN₂	: Sıvı nitrojen
YBCO	: Yttrium Barium Copper Oxide
NbTi	: Niobium-Titanium
MgB₂	: Magnesium diboride
Bi-2212	: Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide
Bi-2223	: Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide

1. GİRİŞ

Günümüzde her alanda elektrik enerjisinin gerekliliği, elektrik tüketiminde önemli bir artışa yol açmıştır. Elektrik enerjisi talebini karşılamak için, çoğu durumda elektrik üretim sistemleri ve yardımcı sistemler birbirlerine oldukça büyük ağlar oluşturacak şekilde bağlanırlar ve bu yapı güç sistemi olarak adlandırılır.

Güç sistemleri çok geniş alanları kapsadığı için sistemin herhangi bir yerinde arıza meydana gelme olasılığı fazladır. Bu arızalar sistemde yapılan manevralar veya atmosferik olaylar, canlıların teması ve diğer dış etkenler nedeniyle olabilmektedir. Güç sistemlerinde meydana gelen arızalarda, arıza akımı nominal akımın 5 ile 20 katına kadar ulaşabilir [1]. Arıza akımının bu değerleri sisteme ve sistemdeki elemanlara geri dönüşü olmayan zararlar verecektir. Bu yüzden güç sistemi kesicileri arıza akımını mümkün olan en kısa sürede kesmek zorundadır. Bu zorunluluk kesicinin daha büyük arıza akımıyla karşı karşıya kalmasına, dolayısıyla teknik ve ekonomik problemlere sebep olmaktadır. Artan enerji talebiyle birlikte güç sistemine yeni üretim sistemlerinin eklenmesi ve yeni iletim sistemlerinin tesis edilmesi ile arıza akımı seviyeleri daha da artmaktadır. Tipik yüksek gerilim kesicilerinin kesme yeteneğinin 80 kA ile sınırlı olduğu düşünülürse, arıza akımının giderek artan seviyeleri yakın zamanda mevcut kesicilerin kesme yeteneklerini aşacaktır [2]. Bu durumda arıza akımının kesilmesi ve izolasyonun sağlanması amacıyla yani güç sisteminin güvenliğinin sağlanması için yeni ve daha büyük elemanların kullanılması gerekecektir.

Güç sistemlerindeki arıza akımlarının artan seviyeleri nedeniyle daha büyük sistem elemanlarının kullanım gerekliliği sonucunda ortaya çıkacak ekonomik sorunlardan dolayı arıza akımı sınırlandırma yöntemleri büyük önem kazanmaktadır. Arıza akımı sınırlandırıcıları (FCL-Fault Current Limiters) güç sistemlerinde meydana gelen büyük arıza akımlarını sınırlandırarak ve kontrol edilebilir bir seviyede tutarak sisteme verebileceği zararlı etkileri önleyen elemanlardır. Yeni nesil arıza akımı sınırlayıcıları, arıza durumu oluşuncaya kadar güç sisteminde ihmal edilebilir bir empedans gösterirler. Ancak herhangi bir arıza anında yüksek empedans göstererek arıza akımını sınırlarlar. Bu sayede normal çalışma sırasında sistemde herhangi bir güç kaybı ve gerilim düşümü meydana getirmezler. Güç sistemi elemanları arıza akımı sınırlandırıcıları sayesinde büyük arıza akımlarının meydana getireceği termal ve elektrodinamik etkilerden

korunurlar. FCL, akımı sınırlayarak maliyeti yüksek olan sistem elemanları üzerindeki geçici yüksek gerilimleri de önlediği için izolasyon yapıları da korunmuş olur. Ayrıca, arıza akımının seviyesi düşürülerek adım ve dokunma gerilimleri azaltılır. Böylece insanların ve diğer canlıların güvenliği sağlanmış olur. Kabloların, kesicilerin, transformatörlerin ani akım taşıma kapasiteleri ve bunların aşılması durumunda ortaya çıkabilecek olan teknik arızalar ve ekonomik sorunlar düşünüldüğünde, FCL'nin önemi daha iyi anlaşılabilir.

Bahsedilen bütün bu sorunlar, arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinin son yıllarda büyük gelişim göstermesine neden olmuştur ve çok sayıda arıza akımı sınırlandırma yöntemi literatüre girmiştir. Arıza akımı sınırlamada bazı önemli yaklaşımlar aşağıda verilmiştir:

- Akım sınırlayıcı reaktörler
- Solid-state arıza akımı sınırlayıcılar
- Süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar
- Sigortalar
- I_s sınırlayıcılar
- Güç sisteminin yeniden yapılandırılması
- Transformatör merkezlerinde baraların ayrılması
- Yüksek empedanslı transformatör uygulamaları
- HVDC hatların kullanılması
- Daha yüksek gerilim seviyeli iletim hatlarının kullanımı
- Nötr reaktörler [3].

Arıza akımı sınırlayıcılarının kullanılması ile tüketicilerin enerji talepleri kesintiye uğramadan karşılanmaktadır. Ayrıca, mevcut sistem yeni ve büyük elemanlara ihtiyaç duymadan yani ekonomik sorunlarla karşılaşmadan çalışmaya devam edecektir. Sonuç olarak arıza akımının, sınırlayıcılar tarafından sınırlandırılması hem sistemin güvenliği, güvenilirliği ve sürekliliği açısından hem de ekonomik açıdan olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Kısaca FCL, sistemin işletme sürekliliğini sağlamalı ve aynı anda işletme sırasında kayıp, gerilim düşümü vb. herhangi bir olumsuz etkide bulunmamalıdır. Bu tezin konusu olan SFCL, normal işletme sırasında sistemde yaklaşık olarak sıfır direnç göstermektedir. Böylece güç kaybına ve gerilim düşümüne yol açmamaktadır. Arıza durumunda ise, hızlı bir şekilde direncini yükselterek arıza akımını sınırlamakta ve sistemde kesinti meydana gelmeksizin işletme sürekliliğini sağlamaktadır. Ülkemizde, 400

kV gerilim seviyesinde kısa devre akımlarının üst sınır değeri 50 kA, 154 kV gerilim seviyesindeki kısa devre akımlarının üst sınır değeri ise 31.5 kA olarak belirlenmiştir. Güç sistemlerinde kullanılacak tüm elemanların (bara, kesici, ayırıcı vb.) bu kısa devre akımlarında zarar görmeden çalışması gerekmektedir. Artan enerji talebini karşılamak için elektrik enerjisi üretim ve iletim sistemlerinin kapasiteleri artırılmaktadır. Bunun sonucu olarak iletim sistemlerinde meydana gelen kısa devre akım değerinin genliği de yükselmektedir. TEİAŞ, iletim sistemindeki kısa devre akımlarının yüksek olması sebebiyle 400 kV seviyesinde kısa devre akım sınırını 31.12.2018 tarihinden itibaren yürürlükte olacak şekilde 63 kA değerine çıkarmıştır. 154 kV seviyesi için de kısa devre akım değerinin yükseltilmesi planlanmaktadır. Kısa devre akım sınır değerlerinin yükseltilmesi ile güç sistemlerine eklenecek transformatör merkezleri ve enerji iletim sistemleri, meydana gelecek kısa devre akımlarından korunmuş olacaktır. Ancak, yine de işletilmekte olan mevcut elektrik iletim şebekesi için kısa devre akımları tehlike oluşturmaktadır. Bu sebeple güç sistemlerinin korunması ve güvenli bir şekilde işletilmesi için kısa devre akımlarının mutlaka sınırlandırılması gerekmektedir [4].

1.1. Literatür Özeti

Güç sistemleri sürekli gelişmekte olduğundan sistem içinde oluşabilecek arıza ihtimali de artmaktadır. Bu arızalar sonucu sistemden akacak olan genellikle büyük genlikli akımları sınırlandırmak hem sistem ve elemanlarını korumak hem de tüketicilere kesintisiz enerji temin etmek amacıyla büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple literatürde farklı arıza akımı sınırlandırma yöntemleri üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan SFCL üzerine de oldukça fazla çalışmanın yapılmış olduğu görülmektedir. Bu bölümde tez konusu ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalara yer verilmiştir.

Eckroad, rezistif ve indüktif SFCL'yi teorik olarak ele almıştır. Daha sonra PSCAD yardımıyla oluşturulan sistemdeki doyurulabilir çekirdekli indüktif SFCL'nin ters elektromotor kuvveti incelenmiştir. ABD'nin yanı sıra Avrupa ve Asya'daki çeşitli ülkelerdeki prototip SFCL çalışmalarından ve projelerinden bahsedilmiş ve yapısal olarak incelenmiştir [1].

Roininen ve ark., 220 kV/300 MVA doymuş çekirdekli SFCL'nin soğutma sisteminin tasarımı, üretimi ve işletmesini incelemişlerdir. Bu çalışmada, soğutma

sistemindeki elemanların görevleri ve birbirleriyle olan bağlantıları ele alınmıştır. Sıvı nitrojen kullanılan sistemin modellemeleri yapılmış ve soğutma sisteminin PLC ve LabVIEW tabanlı kontrol programından kısaca bahsedilmiştir. SFCL'ye ait dizayn parametreleri ve üretim aşamaları detaylı olarak verilmiştir. Geliştirilen SFCL, 2012 yılında Çin Tinajin'in Shigezhuang transformatör merkezinde devreye alınmıştır [5].

Açık ve kapalı çekirdekli indüktif SFCL'nin özelliklerinin karşılaştırıldığı başka bir çalışmada; indüktif SFCL'nin manyetik indüksiyonunun süperiletkenlik ve rezistif durumdaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca, kapalı çekirdekli indüktif SFCL'nin primer sarım sayısının 112 ve 448 olması halinde, V-I ilişkisi şerit sargılı çekirdek, kaplamalı kapalı çekirdek ve çekirdeksiz duruda araştırılmıştır. Aynı şekilde, açık çekirdekli SFCL'nin de primer sargısının 112 sarım ve 448 sarım olması halindeki süperiletken malzemenin boyutlarındaki değişime göre V-I ilişkisi araştırılmıştır [6].

Güney Afrika ulusal şebekesinde arıza akımı seviyelerinin kontrolü için, rezistif SFCL ile geleneksel yöntemlerin finansal ve işletme açısından karşılaştırılmasının yapıldığı çalışmada, seçilen transformatör merkezinin DiGILENT-PowerFactory programında modeli oluşturulmuştur. Geleneksel yöntemler olarak hava çekirdekli reaktör, yüksek empedanslı transformatör ve sistem elemanlarının yükseltilmesi ele alınmıştır. Modeller fotovoltajik sistem ve senkron generatör ile yapılmıştır. SFCL'nin yatırım maliyetinin yüksek, ancak soğutma sistemi için gerekli olan enerji hava çekirdekli reaktörün ve yüksek empedanslı transformatörün normal işletme sırasında harcadıkları enerjiye göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır [7].

Uygulamalı olarak yapılan bir çalışmada, deney düzeneğinde çekirdeksiz indüktif SFCL kullanılmıştır. Deneyin amacı ısınan indüktif SFCL sargılarının akım sınırlama performansı üzerine olan etkilerini görmektir. Bunun için 20 V, 30 V ve 40 V kaynak geriliminde SFCL'siz ve SFCL'li yapılan deneylerde arıza akımının dalga şekilleri osiloskopta gözlemlenmiştir. Ayrıca, SFCL devrede iken direnci, akımı, gerilimi ve sekonder sargıdaki sıcaklık artışının değişimi incelenmiştir [8].

Uygulamalı olarak yapılan bir diğer çalışmada, üç fazlı doymuş çekirdekli indüktif SFCL prototipi geliştirilmeye ve performans analizi yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, deney düzeneği LabVIEW programında modellenerek SFCL'nin çekirdeğinin manyetik yoğunluğu izlenmiştir. 60 V'luk üç fazlı kaynak kullanılıp DC bias değeri değiştirilerek SFCL'nin arıza akımını nasıl etkilediği gözlemlenmiştir [9].

Doyurulabilir çekirdekli indüktif SFCL'nin OG dağıtım sistemlerindeki kullanımını PSCAD/EMTDC programını kullanarak simüle eden bir çalışmada, öncelikle SFCL'nin çalışma prensibi anlatılmıştır. Daha sonra matematiksel modeller kullanılarak programda oluşturulan SFCL ile arıza akımı ve SFCL indüktansının değişimi gibi çeşitli veriler elde edilmiştir. Ayrıca, prototip SFCL ile modellenen SFCL'nin arıza akımında meydana getirdiği değişimler karşılaştırılmıştır [10].

Hekmati ve ark. tarafından güç sistemleri için kullanılabilirliği araştırılan korumalı çekirdekli indüktif SFCL'nin matematiksel formüller kullanılarak simülasyonu yapılmış ve SFCL'deki akı yoğunluğunun dağılımı incelenmiştir. Ayrıca, fabrikasyon üretimi olan süperiletken halka test sisteminde kullanılıp farklı yerlerdeki arızalara verdiği tepkiler elde edilerek simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır [11].

Dağıtım sistemleri için SFCL kullanımını inceleyen bir çalışmada 400 V 200 A'lık SFCL prototipinin geliştirilmesi için hazırlanan test düzeneği ile bazı testler yapılmıştır. Kullanılan süperiletken malzemenin arıza akımını sınırlaması ve direncinin değişimi osiloskopta gözlemlenmiştir. Bu testten elde edilen sonuçlarla 12 kV 200 A'lık SFCL'nin kavramsal tasarımı ve kurulum olasılığı incelenmiştir [12].

Üç fazlı 1 MVA gücünde rezistif SFCL prototipinin bazı elektriksel testlerinin yapıldığı başka bir çalışmada, 15.5 kA'lık bir kısa devre akımı 30-100 ms arasında süperiletken malzemeye uygulanmıştır. SFCL'nin akımı ve gerilim düşümü 3.2 kV_{rms} ve 65°K sıcaklıkta, süperiletkenin direncinin değişimi ise 350 V_{rms} ve 65°K sıcaklıkta deneysel olarak gözlemlenmiştir [13].

Akım sınırlama yetenekleri açısından rezistif SFCL ve indüktif SFCL'yi karşılaştıran bir çalışmada, sınırlayıcıların yapıları incelenmiş ve eşdeğer devreleri elde edilmiştir. Aynı süperiletken malzemeler kullanılan bu iki sınırlayıcı aynı sistemde MATLAB-Simulink SimPowerSystem ile modellenerek arıza akımına olan etkileri, direnç ve sıcaklık değişimleri gibi sonuçlar elde edilmiştir [14].

İndüktif SFCL'nin fiziksel ve nümerik modellerinin oluşturulduğu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. İndüktif SFCL'nin fiziksel boyutlarının değişimiyle V-I karakteristiğinin değişimi hem süperiletkenlik hem de rezistif bölgede incelenmiştir. Aynı şekilde süperiletken malzemenin şeklinin değişimi ile gerilim düşümü arasındaki ilişki de yine süperiletkenlik ve rezistif bölgede olmak üzere ayrı ayrı gözlemlenmiştir [15].

Rezistif SFCL'nin MATLAB-Simulink'de modellenmesinin ve simülasyonunun yapılması için öncelikle temel prensibinin ele alındığı bir çalışmada; sıcaklık, manyetik

alan ve akım yoğunluğu ilişkisi incelenmiştir. MATLAB’da oluşturulan devrede öncelikle, SFCL’siz olarak arıza akımının ve kaynak geriliminin değişiminin dalga şekli elde edilmiştir. Daha sonra SFCL modülünün eklenmesi ile alınan sonuçlar SFCL’siz devredeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [16].

Rezistif SFCL’nin FEMLAB ve MATLAB-Simulink birlikte kullanılarak modellendiği çalışmada, termal ve elektriksel karakteristiğinin matematiksel modeli elde edildikten sonra, FEMLAB’da birbirleriyle olan bağlantıları kurulmuştur. Simulink’de tanımlanan bu modelle yapılan simülasyonlarda SFCL’nin arıza akımının genliğine olan etkisi incelenmiştir [17].

SFCL’nin akıllı şebekedeki uygulamalarını ele alan çalışmada, öncelikle MATLAB-Simulink SimPowerSystem ile bir mikro şebeke modellenmiştir. Daha sonra üç fazlı rezistif SFCL’nin ana parametreleri göz önüne alınarak modellenmesi yapılmıştır. Farklı arıza noktaları belirlenerek yapılan simülasyonlarda, SFCL’nin yerinin arıza akımına ve faz gerilimlerine olan etkileri gözlemlenmiştir [18].

Benzer bir çalışmada SFCL teknolojisi hakkında bilgi verildikten sonra rezistif SFCL’nin modellenmesi ele alınmıştır. SFCL’nin MATLAB-Simulink’de modellenmesinin ardından SFCL’nin kullanılacağı sistemin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda ise SFCL’li ve SFCL’siz elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır [19].

İletim sistemlerinde kullanılmak üzere SuperPower Inc. ve Nexans SuperConductors GmbH firmaları tarafından geliştirilen HTS arıza akım sınırlayıcıların uygulamaları açıklanmıştır. HTSFLC ile geleneksel arıza akım sınırlama yöntemleri karşılaştırılarak avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir [20].

Enterkonnekte güç sistemlerinde geçici durum kararlılığını arttırmak ve arıza akımlarını sınırlamak için SFCL ile statik VAR kompanzatorlerinin (SVC) birlikte kullanılması araştırılmıştır. Şebeke modelinde kullanılacak olan SFCL ve SVC’nin farklı değerleri için analizler yapılmıştır [21].

PSCAD/EMTP yazılım programında 66 kV’luk şebeke modeli oluşturulmuştur. Farklı arıza dirençleri için SFCL’nin devrede olması ve olmaması durumlarında meydana gelen kısa devre akımındaki değişimler incelenmiştir [22].

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Günümüzde giderek artan enerji tüketimini karşılamak amacıyla güç sistemlerinin sürekli büyümesi, arıza akımlarının seviyelerinin artmasına sebep olmakta ve bu durum sistemin işletilmesi açısından önemli sorunlar oluşturmaktadır. Arıza akımı seviyelerinin mevcut kesme cihazlarının yeteneklerini yakın zamanda aşacak olması bu sorunlardan biridir. Sistemdeki mevcut elemanları yenileriyle değiştirmenin ekonomik külfetleri sebebiyle, arıza akımı seviyelerinin azaltılması bu soruna uygun bir çözüm olacaktır. Büyük arıza akımlarının termal ve dinamik etkileri sistem elemanlarına ciddi hasarlar verebilir. Bu nedenle sistemdeki arıza akımı kısa sürede ortadan kaldırılmalıdır. Kesiciler, arıza akımını hızlı bir şekilde kesmeye çalışırsa daha büyük akımlarla karşılaşacaktır. Bu nedenle çok kısa sürelerde açma işlemi yapamazlar. Bu olumsuz durumların önüne geçmek için arıza akımlarının seviyeleri çok kısa sürelerde sistem için tehlike arz etmeyecek seviyelere indirgenmelidir. Bu çalışmada güç sistemlerindeki arızalarda meydana gelen arıza akımlarının istenen seviyelerde sınırlandırılması amacıyla kullanılan arıza akımı sınırlandırma yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve özellikle Türkiye Elektrik Enerjisi İletim Sistemi için en uygun yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, son yıllarda gündeme gelen ve pratik uygulamaları yavaş yavaş artan SFCL'nin Dünya'daki uygulamalarını ve Türkiye Elektrik Enerjisi İletim Sistemi için kullanılabilirliğini araştırmak, bu çalışmanın amaçlarından biridir. Bu amaçla yapılan simülasyon çalışmalarında MATLAB-Simulink kullanılmış ve IEEE 14 baralı sistemde test edilmiştir. Programdan elde edilen sonuçlar analiz edilerek arıza akımı sınırlandırıcı olarak süperiletken kullanmanın sağladığı avantajlar belirlenmiş ve Türkiye Elektrik Enerjisi İletim Sistemi'nde kullanılabileceğine karar verilmiştir.

1.3. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması, 5 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; arıza akımı sınırlayıcıların gerekliliği ve önemi vurgulanarak, bazı sınırlandırma yöntemleri belirtilmiştir. Daha sonra tezin amacı ve kapsamı belirtilerek, SFCL ile ilgili literatür taraması yapılmış ve konu hakkında kısa bir özet verilmiştir.

İkinci bölümde, arıza akımının tanımı yapılmış ve arızaların oluşma nedenlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra bazı arıza akımı sınırlandırma yöntemleri ile ilgili temel bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, SFCL'nin yapısı ve çalışma prensibi detaylı olarak incelenmiş ve mevcut uygulamalarından örnekler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, SFCL'nin iletim sistemlerinde kullanımı ve sistem üzerindeki etkileri MATLAB-Simulink'de yapılan simülasyonlar ile incelenmiştir. Aynı arıza durumlarında SFCL ve CLR kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde ise ele alınan konular ve gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



2. ARIZA AKIMI VE ARIZA AKIMI SINIRLANDIRMA YÖNTEMLERİ

Güç sistemleri elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımını kapsayan çok geniş bir yapıdır. Giderek artan elektrik enerjisi talebini karşılamak amacıyla sisteme katılan yeni üretim tesisleri bu yapıyı daha da genişletmektedir. Bunun sonucunda sistemde meydana gelebilecek arıza olasılığı da artmaktadır. Güç sistemi normalde dengeli simetrik üç fazlı bir sistem olarak düşünülebilir. Bir arıza oluştuğunda bu simetri genellikle bozulur. Üç fazlı kısa devre hariç sistemde dengesiz akım ve gerilimler oluşur. Sistem elemanları kısa devrenin termik ve dinamik etkilerine, röleler tarafından belirlenen sürede dayanacak şekilde seçilmiş ve tesis edilmiş ise sorun oluşmaz. Ancak, elemanlar yeterli kapasitede değilse, dengesiz akım ve gerilimlerin yüksek seviyeleri sisteme ve sistemdeki elemanlara geri dönüşü olmayan zararlar verebilir ve canlılar için de tehlikeli durumlar söz konusu olabilir [23]. Bu nedenle sistemdeki arızalı kısımlar en kısa sürede sağlam kısımlardan ayrılmalı ve arızalar giderildikten sonra sistem normal işletme durumuna geri getirilmelidir.

2.1. Arıza Akımı

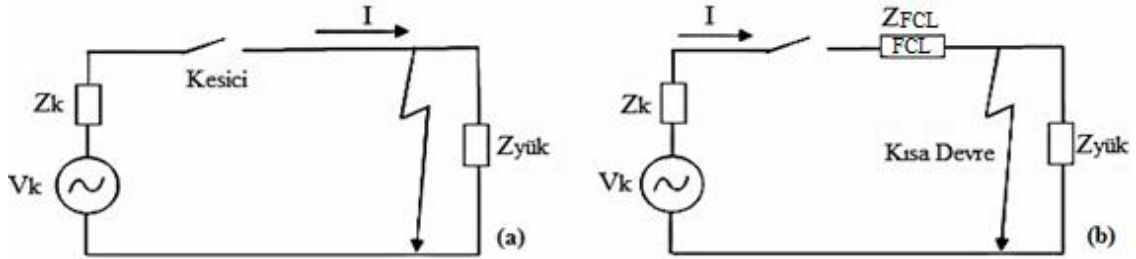
Elektrik tesislerinde faz iletkenleri arasında veya yıldız noktası topraklanmış şebekelerde faz iletkenleri ile toprak arasında yalıtkanın delinmesi veya iletken bir şekilde köprülenmesi sonucu kısa devre meydana gelir. Bu durumda sistemde empedansı küçük yeni bir devre olduğundan, sisteme bağlı bütün besleme noktalarından kısa devre noktasına doğru büyük akımlar akar [24]. Kısaca bir elektrik devresinde, farklı gerilimli iki ya da daha fazla noktanın bağıl olarak düşük bir empedans üzerinden tesadüfen veya kasıtlı olarak birbirine değmesine kısa devre denir. Bu durum sonucunda meydana gelebilecek genellikle büyük değerli akımlar arıza akımı olarak adlandırılır.

Kısa devreler iç veya dış etkilerle meydana gelebilir. Kısa devreye neden olabilecek başlıca iç etkiler; aşırı yüklenme sonucu izolasyonun aşırı derecede ısınması ve bozulması veya aşırı gerilimler sonucu meydana gelen delinmeler ve atlamalar ile izolasyondaki yapımların hataları ve yaşlanmalarıdır. Başlıca dış etkiler ise; kablo ve izoleli hava hattı iletkenlerinin izolasyonlarının zedelenmesi, hava hatları ile açık elektrik tesislerine

yıldırım düşmesi, hava hattı izolatörlerinin kırılması, hava hatlarında atmosferik olaylardan (kar, yağmur, rutubet, sis) dolayı özellikle kirlenmiş olan izolatörlerde oluşabilecek atlamalardır. Ayrıca, hava hatlarına konan kuşlar ile transformatör merkezlerine giren çeşitli hayvanların topraklanmış kısımlar ile gerilim altındaki kısımlar arasındaki veya fazlar arasındaki temasları ve bakım esnasında güvenlik amacı ile kapatılan topraklama ayırıcılarının tekrar gerilim verilirken unutulmaları veya yapılan yanlış manevralar da aşırı gerilimlere sebep olan dış etkilere [24].

2.2. Arıza Akımı Sınırlandırma Yöntemleri

Güç sistemlerinin herhangi bir noktasında arıza meydana geldiği zaman o noktadaki empedans çok küçük bir değere sahip olduğu için arıza akımı çok yüksek değerlere ulaşır. Bu durum sistemin basit bir modeli incelenerek anlaşılabilir. Şekil 2.1’de gösterilen devrede V_k kaynak gerilimi, Z_k kaynak empedansı, $Z_{yük}$ yük empedansıdır. Ayrıca, arıza esnasında meydana gelen Z_a arıza empedansı vardır [25].



Şekil 2.1. Basit güç sistemi a) FCL'siz b) FCL'li [25]

Normal çalışma durumunda, FCL'siz sistemde akımın değeri;

$$I_{sistem} = \frac{V_k}{Z_k + Z_{yük}} \quad (2.1)$$

iken, arıza meydana geldiğinde sistemdeki akımın değeri;

$$I_{sistem} = \frac{V_k}{Z_k + Z_a} \quad (2.2)$$

olur. Burada; $Z_a \ll Z_{yük}$ 'tür.

Arıza empedansı (Z_a), yük empedansından ($Z_{yük}$) çok küçük olduğu için Denklem 2.2'deki akım değeri, Denklem 2.1'deki akım değerinden daha yüksek çıkacaktır. Ancak bu sisteme, Şekil 2.1 (b) modelindeki gibi seri bir FCL yerleştirilirse arıza akımının değeri düşecektir.

$$I_{sistem} = \frac{V_k}{Z_k + Z_{FCL} + Z_a} \quad (2.3)$$

Sabit sistem geriliminde, artan FCL empedansı arıza akımının daha da azalmasına sebep olacaktır.

Günümüzde arıza akımını sınırlamak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemler farklı özelliklerdeki cihazları ve donanımları kullanmasına rağmen, hepsinin ortak amacı arıza akımının sınırlandırılmasıdır. Böylece sistem kesintiye uğramadan arıza durumu ortadan kaldırılabilir ve tüketicilerin talepleri karşılanmış olacaktır. En önemlisi büyük arıza akımlarının sisteme ve sistemdeki elemanlara vereceği zararlar önlenmiş olacaktır. Bunun yanı sıra, FCL kullanılarak, artan arıza akımları seviyeleri için kullanılması gereken yeni ve maliyetli sistem elemanlarının tesis edilmesine gerek kalmayacaktır. Böylece FCL'nin kullanımı sistemin maliyeti, kararlılığı, güvenilirliği ve güvenliği açısından büyük bir öneme sahiptir.

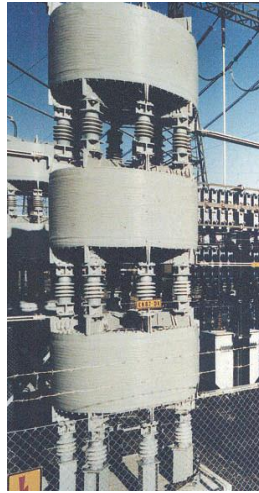
2.2.1. Akım Sınırlayıcı Reaktörler

Akım sınırlayıcı reaktörler (CLR-Current Limiting Reactors), akım sınırlandırma yöntemleri arasındaki en pratik ve en iyi bilinen yaklaşımdır. Akım sınırlayıcı reaktörler arıza akımını sınırlamak için devreye bağlanan seri reaktörlerdir [26, 27]. Fazlara seri olarak bağlanan bu reaktörler devrenin toplam empedansını arttırdığı için arıza akımının genliği azalmaktadır. Böylece baralarda, izolatörlerde, devre kesicilerinde ve diğer sistem elemanlarında oluşan zorlayıcı etkiler azaltılmış olur. Kısaca CLR ile arıza akımı uygun seviyelere indirilerek sisteme ve sistemdeki elemanlara verebileceği zararlar önlenmiş olur.

Bu yöntem güç sisteminde gerilim düşümlerine ve reaktif güç kayıplarına yol açmasına rağmen diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha ekonomiktir. Transformatör merkezleri üzerindeki etkileri ihmal edilebilir, ancak bu yerlerde güvenlik önlemleri

nedeniyle büyük alanlar kaplamaktadır. CLR gerilim kararlılığını ve geçici durum kararlılığını azaltıcı etki gösterebilmektedir. Kuru tip ve yağlı tip CLR mevcuttur. İkisinin de birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Uygulama yapılacak sistemin özelliklerine bağlı olarak seçim yapılır. Kuru tip, bakır veya alüminyum sargılı hava çekirdekli bir reaktördür. CLR'de doyma ihtimali sebebiyle genellikle demir çekirdek kullanılmaz. Bu cihaz ana devreye seri olarak bağlandığından, özellikle arıza durumunda demir çekirdeğin doyma ihtimali çok yüksektir. Bu nedenle, hava çekirdekli kuru tip reaktörler güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Bu cihazla ilgili temel sorunlardan biri, CLR etrafındaki alanda dağılan manyetik akıdan dolayı oluşan güvenlik problemleridir. Bu yüzden, CLR'nin çevresi personel güvenliği açısından çitlerle çevrilmelidir. Genellikle yağlı tip reaktörlerin özellikleri, kuru tip reaktörlerin özelliklerine benzerdir. Ancak, yağlı tip özellikle ağır kirli ortamlar için tasarlanmıştır. Şekil 2.2'de üç fazlı bir akım sınırlayıcı reaktör gösterilmiştir. Yağlı tip reaktörlerin bazı avantajları vardır [3]:

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

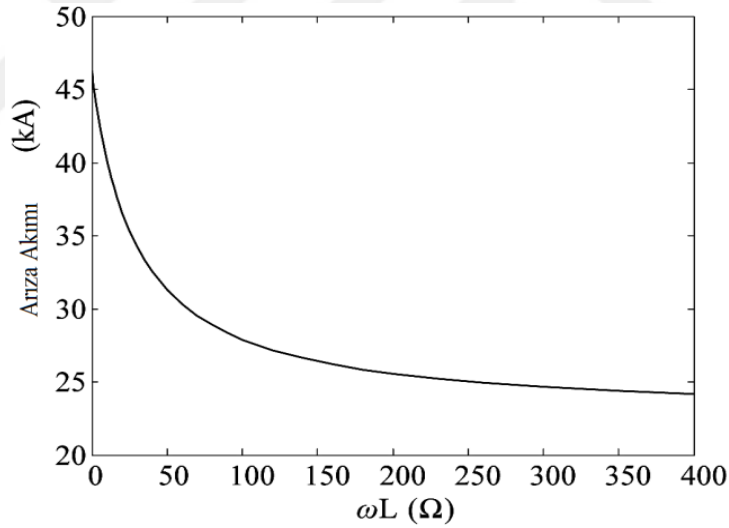


Şekil 2.2. Üç fazlı CLR [28]

CLR, analizlere göre geçici toparlanma gerilimini ve geçici toparlanma geriliminin yükselme hızını farklı şekilde etkilemektedir [29,30].

- CLR'nin geçici toparlanma geriliminin tepe noktasını azaltması bir avantajdır.
- CLR'nin toparlanma geriliminin yükselme hızını arttırması ise bir dezavantajdır. Toparlanma geriliminin yükselme hızı, geçici toparlanma geriliminden daha kritik bir öneme sahip olduğundan, CLR kurulumundan önce geçici durum incelemelerinin iyi yapılması gerekmektedir.

CLR endüktansının uygun değeri çalışan sisteme bağlıdır. Şekil 2.3'de CLR reaktansı ωL 'nin bir fonksiyonu olarak simüle edilen sistemin maksimum arıza akımı (I_a) gösterilmiştir. Şekil 2.3'e göre L arttıkça, I_a - L eğrisinin eğimi azalır. Bu nedenle ωL 'nin 50Ω 'dan büyük değerleri için, L 'nin değişimleri I_a 'yı önemli ölçüde değiştirmez. Bu simülasyonda 50Ω verimlilik sınırı olarak adlandırılan bir sınırdır. Arıza akımını azaltma açısından bakıldığında ωL için 50Ω etkili bir değerdir. Ancak, uygulamada geçici durum kararlılığı, gerilim kararlılığı ve ayrıca geçici toparlanma gerilimi kısıtlamaları göz önüne alındığından ωL 'nin mutlaka 50Ω seçilmesi zorunlu değildir [3].



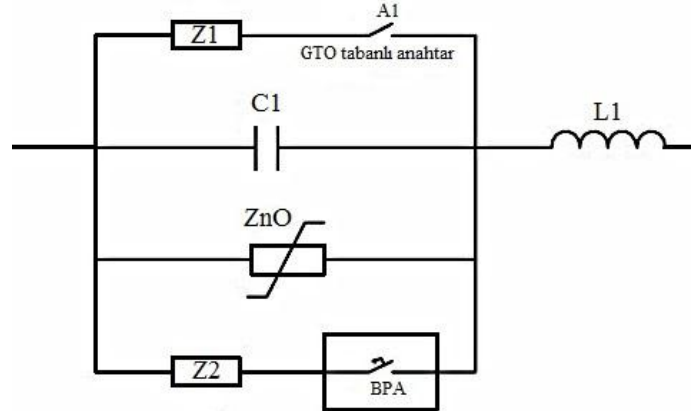
Şekil 2.3. Endüktansın arıza akımı üzerindeki etkisi [3]

2.2.2. Solid-State Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Solid-state arıza akımı sınırlayıcılar (SSFCL-Solid-State Fault Current Limiters) arıza akımının aktif kontrolünü sağlayan güç elektroniği anahtarlarını kullanan arıza akımı sınırlayıcılarıdır. SSFCL, normal çalışma durumunda sisteme gerilim düşümü ve kayıp gibi herhangi bir etkisi olmadığı için tercih edilmeye başlanmıştır [31]. Arıza durumunda ise

SSFCL arıza sınırlama empedansı göstererek arıza akımını sınırlar. Ancak, SSFCL yüksek maliyeti, düşük güvenilirliği ve karmaşık yardımcı sisteminden dolayı yaygın olarak kullanılmamaktadır [32]. Hızlı anahtarlama yanıtları ve dondurucu tankların gerekmemesi SSFCL'nin avantajlı tasarım özellikleridir. Fakat güç elektroniği ile ortak olarak yüksek güç yoğunluğundan dolayı oluşacak sistem hatalarını önlemek için iyi bir soğutma sistemi gerekmektedir [33].

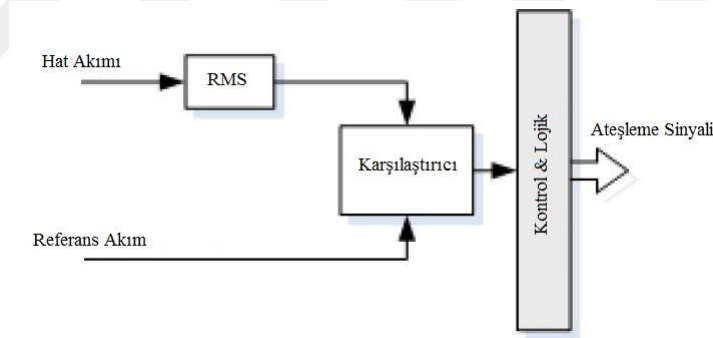
SSFCL uygulamaları için farklı yöntemler mevcuttur. Bu nedenle SSFCL'nin çalışma prensibini anlatan birçok model bulunmaktadır. Bu modellerden birinde, SSFCL; C1 kapasitör bankası, L1 reaktörü ve Gate Turn Off tristör veya hızlı kapanan A1 anahtarından oluşur. Normalde C1 kondansatörü ve L1 reaktörü sıfır empedans oluşturmak için birleşirler. Böylece devrede sıfır empedans görülür. Bir arıza meydana geldiğinde A1 anahtarı, yüksek hızda (3 ms içinde) C1 kapasitörünü bypass eder ve hemen L1 reaktörü akım sınırlayıcı olarak devreye sokulur. Z1 düşük empedansı, A1 anahtarı kapandığı zaman ani akımı sınırlar. A1 anahtarının çalışmasına yardım eden aşırı gerilim sınırlama elemanı ZnO (varistör) ve bypass anahtarı (BPA), C1 kapasitörü ile paralel bağlıdır. BPA kapandığı zaman Z2 düşük empedansı ani akımı sınırlar. Şekil 2.4'de Solid-state arıza akımı sınırlayıcının temel yapılandırması gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Solid-state arıza akımı sınırlayıcının temel yapılandırması [34]

Bu modelde SSFCL'de hızlı anahtarlama yapabilen GTO tristörler kullanılmıştır. SSFCL uygulamalarında GTO'nun yanı sıra MOSFET, IGBT gibi anahtarlama elemanları da kullanılabilir. Bu çalışmada, SSFCL uygulamasında GTO'nun yanı sıra MOSFET, IGBT gibi anahtarlama elemanları da kullanılabilir.

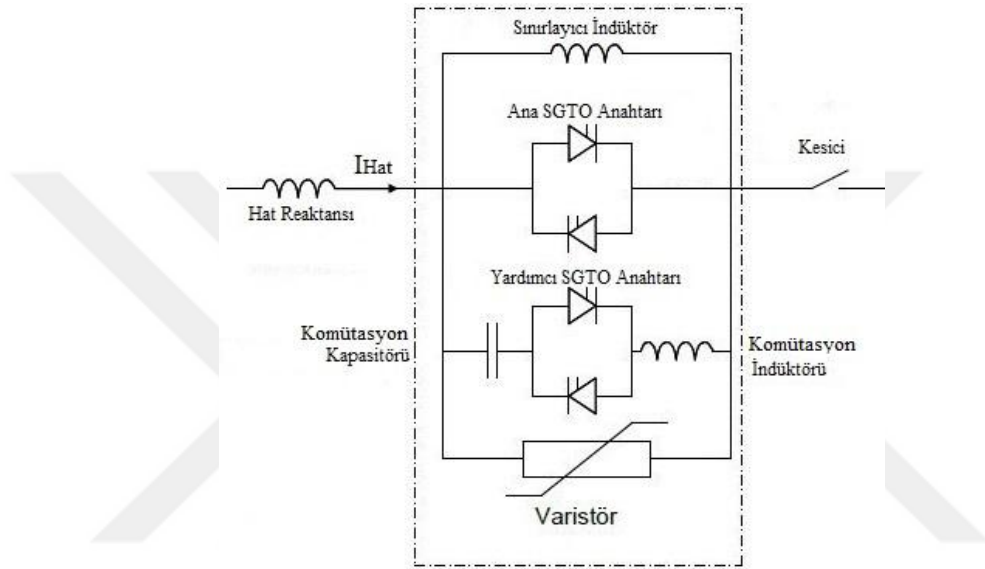
SSFCL’de aşırı akım dedektörü ve kontrol cihazı arızayı tespit eder ve GTO tristörü için kapama sinyali üretir. Şekil 2.5, SSFCL’nin kontrol diyagramını göstermektedir [35]. Kararlı durumda, GTO’lar açık konumdadır. Bir arıza meydana geldiğinde arıza akımı hemen tespit edilir. Tespit işlemi, önceden belirlenmiş bir değer ile anlık akım seviyesi karşılaştırılarak yapılır. Arıza tespit edildikten sonra, GTO’ya kapama sinyali verilir. Anahtarlama işlemi ile akım sınırlayıcı empedans akım yolu üzerine alınır. Arıza akımının ani olarak değişmesi bir aşırı gerilime sebep olabilir. Bunu önlemek için aşırı gerilim sınırlama elemanı kullanılır. Bu yöntemde arıza akımını ani akımdan ayırt etmek önemlidir. Bu problem uygun bir tespit seviyesi seçilerek çözülmüştür. Akım sınırlayıcı arıza sırasında sürekli olarak arızayı sınırlar ve arıza temizlendikten sonra normal duruma otomatik olarak geçer. Bu yüzden akımın büyüklüğü daima izlenir. Dedektör birkaç periyot süresince akımın büyüklüğünü küçük olarak tanımladığında, arızanın temizlendiğini varsayar ve GTO’ya açma sinyalini gönderir. Bu yüzden kararlı durumda sistemde sadece diğer kayıplardan çok daha küçük olan anahtarlama kayıpları görülür [36].



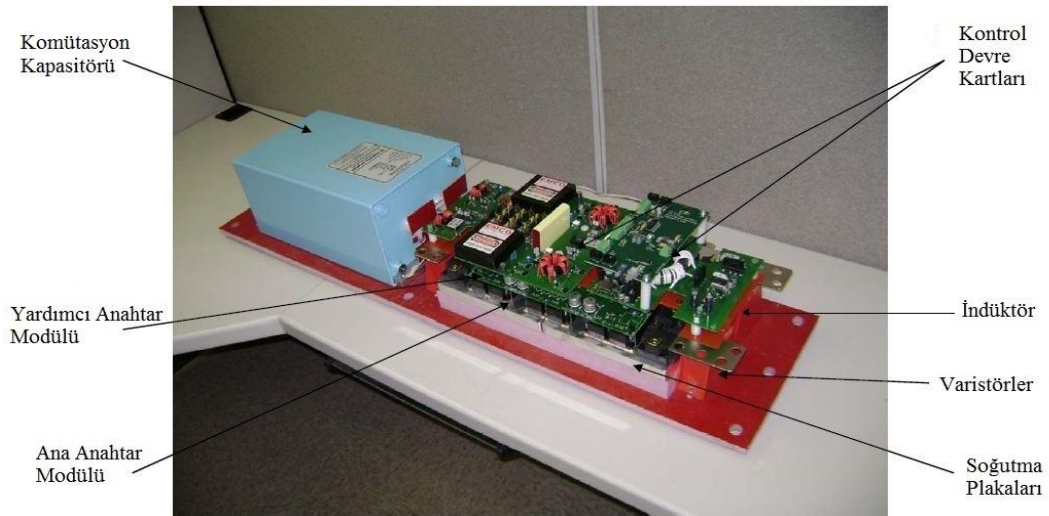
Şekil 2.5. SSFCL’nin kontrol diyagramı [35]

Başka bir modelde, normal durumda ana SGTO anahtarları hat akımını ihmal edilebilir bir gerilim düşümü ile taşırlar. Arıza durumunda yardımcı devre, ana anahtarlara düşük kapama zorluğu sağlamak için aktif hale gelir. Yardımcı SGTO’nun yüksek anahtarlama hızı ve üstün di/dt yeteneği, kapama anında ana anahtarın akımını sıfıra çekmek amacıyla, yüksek genlikli ve kısa süreli rezonans akımını (pulse) iletimdeki ana anahtara gönderen komütasyon devresine olanak verir. Böylece, ana anahtarların anahtarlama kayıplarını önemli ölçüde azaltan güvenli bir kapama sağlanır. Ana anahtarlar kapandıktan yani kesime girdikten sonra, komütasyon kapasitörü hat endüktansı ile rezonansa girer ve ana anahtarlar üzerinde küçük bir dv/dt geçici durumu sağlar. Anahtar

geriliminin, 4 kV'da varistör tarafından tutulana kadar yükselmesine izin verilir. Daha sonrasında varistörde arıza akımının tamamı görülür. Ancak, gerilimi 4 kV olan akım sınırlayıcı indüktörün akımı devralması için milisaniyenin sadece birkaç onda biri süre yeterlidir ve varistör pasif hale geçer. Bu andan itibaren arıza akımı devreye eklenen indüktör tarafından sınırlanır [37]. Bu modelin devre şeması Şekil 2.6'da ve modeldeki SSFCL ise Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. SSFCL devre şeması [38]



Şekil 2.7. SSFCL modeli [38]

2.2.3. Akım Sınırlayıcı Sigortalar

Akım sınırlayıcı sigortalar (CLF-Current Limiting Fuses), çok yüksek hızlarda selektif koruma sağlamak için yıllardır kullanılmaktadır. Bu sigortalar arıza akımının ortaya çıkardığı ısı enerjisiyle içindeki iletken eriyerek devreden akan büyük kısa devre akımlarının kesilmesini sağlayan ve aynı zamanda ayırma işlemi yaparak tekrar atlamaları önleyen koruma elemanlarıdır. Sigortaların görevi, sigortanın minimum kesme akımından daha büyük olan kısa devre akımlarının sebep olduğu termal ve dinamik etkilerden sistemi korumaktır. Şekil 2.8’de yük ayırıcısındaki bir CLF uygulaması gösterilmiştir.

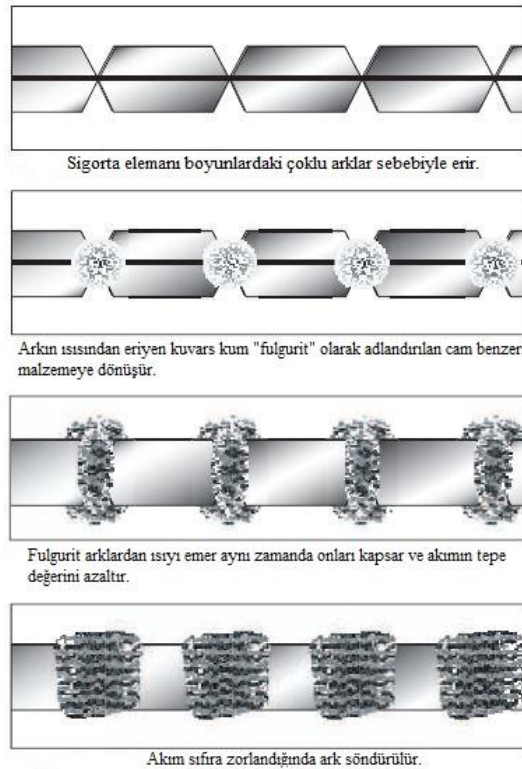


Şekil 2.8. CLF uygulaması [39]

Akım sınırlayıcı sigortalar arıza akımının büyüklüğüne bağlı olarak iki moda çalışabilir. İlk mod arıza akımının sigortanın eşik akımının altında olduğu aşırı yük modudur. Bu modda, sigorta ilk yarım periyot boyunca çalışmaz ve arıza akımını sınırlamaz. İkinci mod akımın sigortanın eşik akımının üstünde olduğu kısa devre veya akım sınırlama modudur. Bu modda, sigorta ilk yarım periyot boyunca çalışır ve arıza akımını sınırlar. Aşırı yüklenme ve kısa devre modları arasında sigortanın akım sınırlama modunda olup olmadığı belli olmayan küçük bir çakışma alanı vardır. Sigortanın bu bölgedeki performansı, devrenin güç faktörü ve arıza başlangıcının dalga şekli üzerindeki yeri gibi koşullara bağlıdır [40].

Sigorta elemanları genellikle gümüş veya bakır şeritten yapılır ve birkaç yerde enine kesit alanları azaltılarak boyun bölgeleri oluşturulur. Sigorta şeridi yalıtılmış tüpün içinde sıkıştırılmış kuvars kum ile çevrilidir.

Kısa devre meydana geldiğinde, kesiti azaltılmış alanlar (boyunlar) ısınır ve çok hızlı bir şekilde eriyerek buharlaşır. Bu bölgelerde elektriksel ark meydana gelir. Seri arkların ve kuvars kumlarının etkileşimi, akımın tepe değerini olası tepe değerinden önemli ölçüde daha küçük bir değere sınırlar ve hızlı bir şekilde artan direnci arıza devresine gösterir [40]. Bu etkileşim şekil 2.9’da gösterilmiştir. Ark başladığı anda, sigorta direnci ve gerilimi artmaya başlar ve arıza akımı, akımın dalga şeklindeki normal sıfır geçişinden önce sıfıra getirilmeye zorlanır. Kısacası arkın meydana gelişi sigortanın elektriksel olarak düşük dirençli durumdan yüksek dirençli duruma geçişine sebep olur ve bu durum arıza akımının çok hızlı bir şekilde azalmasıyla sonuçlanır. Nihayetinde sigorta şeridini çevreleyen kuvars kum vasıtasıyla ark soğutulur ve söndürülür. Bir akım sınırlayıcı sigorta, AC periyodunun yarısından daha kısa sürede (8,3 ms) açılır ve akım temizlenir [41]. Şekil 2.10, CLF kullanıldığında sistemdeki akımın değişimini göstermektedir. Bu şekildeki ark enerjisi ve erime enerjisinin toplamı arıza enerjisi ($I^2.t$) olarak adlandırılır. Bu değer ne kadar küçükse, devre kesilmeden önce oluşan zararlı termal enerji de o kadar küçüktür.



Şekil 2.9. Ark ve kuvars kum arasındaki etkileşim [40]

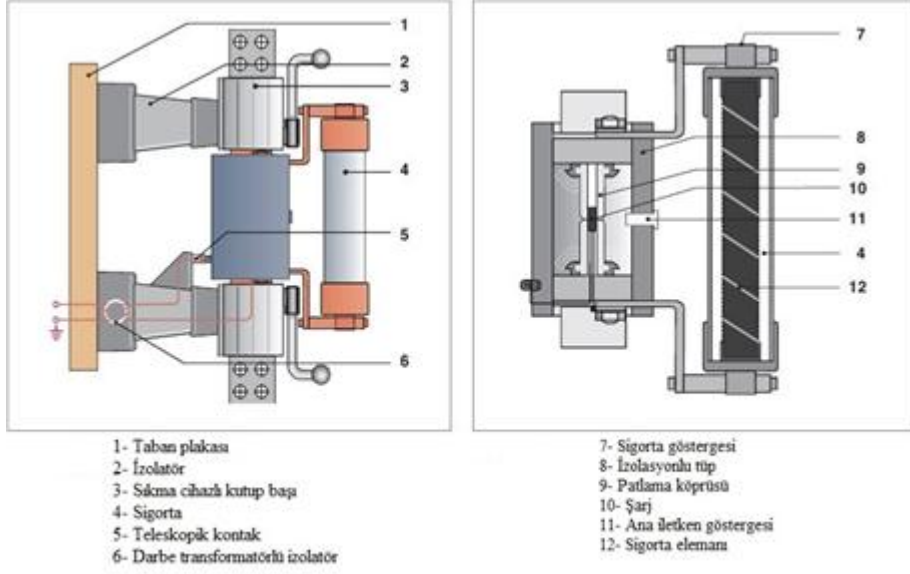
2.2.4. I_s Sınırlayıcılar

I_s sınırlayıcılar sigortaların gelişmiş bir versiyonudur. Bu cihazda normal çalışma durumunda akımın büyük bir kısmı sigorta ile paralel bir yoldan geçer. Kısa devre olduğu zaman, arıza akımının elektrodinamik kuvvetlerini kullanarak paralel yol açılır. Sonuç olarak arıza akımı sigortaya aktarılır. Bu şekilde sigortanın sınırlı nominal akımı ile ilgili problem çözülmüştür. I_s sınırlayıcıların, arıza meydana geldikten sonra 1 ms içinde 5 kA' e kadar olan arıza akımlarını kesme yeteneği vardır. Ancak bu sınırlayıcılar 40 kV anma gerilimi ile sınırlandırılmıştır [44]. Şekil 2.12'de bir I_s sınırlayıcı gösterilmiştir.



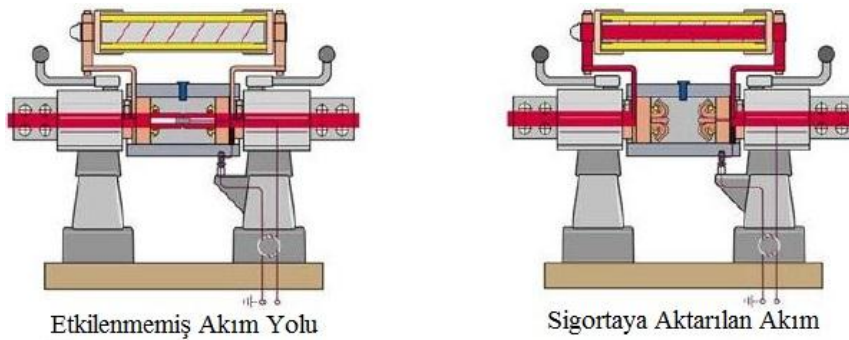
Şekil 2.12. I_s Sınırlayıcı [45]

I_s sınırlayıcı paralel iki iletken oluşmaktadır. Bunlar ana iletken ve paralelindeki sigortadır. I_s sınırlayıcı prensip olarak, yüksek nominal akımı iletebilen fakat düşük anahtarlama yeteneğine sahip olan, oldukça hızlı hareket eden bir anahtar ve paralel monte edilmiş yüksek kesme yetenekli bir sigortanın kombinasyonudur. Normal şartlar altında, yük akımı ana iletken akmaktadır. Arıza durumunda bir tetikleme cihazı ana iletkenin bağlantısını keser ve arıza akımını, akımın ilk yükselişi sırasında (1 milisaniyeden daha az sürede) sınırlayan yüksek kesme yetenekli paralel sigortaya aktarır [44]. Şekil 2.13'de 12 kV 2000 A I_s sınırlayıcının kısımları gösterilmiştir.



Şekil 2.13. I_s sınırlayıcının kısımları [45]

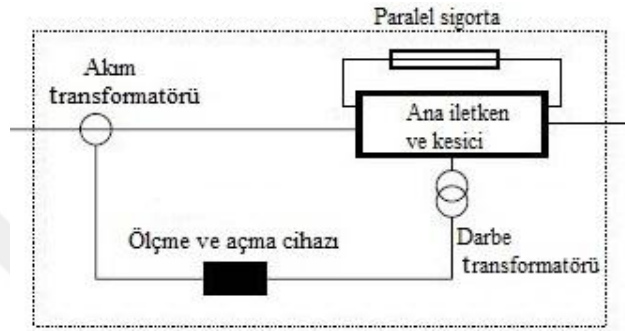
İstenen kısa açma zamanını elde etmek amacıyla, anahtarı (ana iletkeni) açmak için depolanmış enerji mekanizması olarak küçük bir şarj birimi kullanılır. Ana iletken açıldığı zaman, akım 0.6 ms içerisinde paralel sigortadan akar ve nihayetinde gerilimin sonraki sıfır geçişinde akım söndürülür [46]. Şekil 2.14’de arıza meydana geldiğinde I_s sınırlayıcıdaki akımın komütasyonu gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ana iletken kontakları açılmış ve arıza akımı sigortaya aktarılmıştır.



Şekil 2.14. Arıza sırasında I_s sınırlayıcıdaki akım komütasyonu [45]

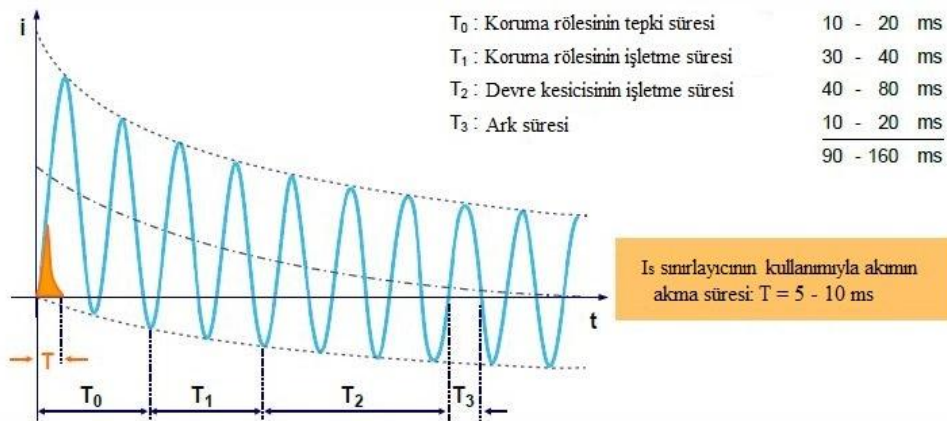
I_s sınırlayıcıdan akan akım elektronik ölçme ve açma cihazlarında takip edilir. Şekil 2.15’de I_s sınırlayıcıdaki bu sistemler gösterilmiştir. İzin verilmeyen yüksek kısa devre akımı akmaya başladığı anda açma meydana gelir. Kısa devre akımının ilk yükselişi

sırasında I_s sınırlayıcının açıp açmayacağını belirlemek gerekir. Bu yüzden ani akım ve I_s sınırlayıcı üzerindeki akımın yükselme hızı (tetikleme kriteri olarak) sürekli ölçülür ve değerlendirilir. Eğer ani akım ve akımın yükselme hızı ayar değerlerine erişir veya aşarsa aynı anda I_s sınırlayıcı açar [46]. Sonuç olarak I_s sınırlayıcı normal durumda yüksek işletme akımını neredeyse kayıpsız bir şekilde iletir, ancak arıza meydana geldiği anda sınırlayıcı tetiklenerek arıza akımının ilk yükselişi sırasında açar.



2.15. I_s sınırlayıcının genel yapısı [32]

I_s sınırlayıcılar normal kesiciye göre akımı çok hızlı bir şekilde kesme işlemi gerçekleştirir. Termik ve dinamik zorlanmaların yanı sıra çok yüksek akım seviyeleri sebebiyle, kesiciler arıza akımının ilk yükseliş süresinde arızalı devreyi açamazken, I_s sınırlayıcılar bu süre içerisinde arıza akımını kesebilmektedir. Şekil 2.16'da I_s sınırlayıcılar ile devre kesicisinin açma süreleri açısından karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.16. I_s sınırlayıcı ile kesici karşılaştırması [45]

2.2.5. Güç Sisteminin Yeniden Yapılandırılması

Arıza akımı sınırlandırma yöntemleri arasında bulunan bu yaklaşım bir dereceye kadar deneyseldir. Bu yöntem için kesin bir kural yoktur. Diğer bir deyişle bu yöntem duruma bağlıdır. Birçok durumda bu yöntem, arıza akımının seviyesinin önemli ölçüde azalmasıyla sonuçlanabilir. Ayrıca, sistemin geçici durum kararlılığı ve gerilim kararlılığı iyileştirilebilir [3].

2.2.6. Bara Ayırma Yöntemi

Bu yöntemde arıza akımının seviyesini azaltmak için bara bölüm ve/veya bara bağlantı devre kesicileri açılır. Güç sistemi operatörleri bu yönteme karşı çıkmaktadır. Çünkü bara ayırma yöntemi, transformatör merkezinin güvenilirliğini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, düşük geçici durum ve düşük gerilim kararlılığı oluşabilir ve sistemin bütünlüğü etkilenir. Ancak, arıza akımını azaltması açısından, bu yöntem CLR'den daha etkilidir. Bundan dolayı bara ayırma yöntemi sonsuz reaktanslı bir CLR uygulamasının eşdeğeridir. Bununla birlikte, bu yöntem sadece acil durumlarda kabul edilebilir geçici bir strateji olarak düşünülebilir [3].

2.2.7. Yüksek Empedanslı Transformatörler

Güç sistemlerinde kullanılan yüksek empedanslı transformatörler arıza akımı seviyelerinde önemli azalmalara sebep olurlar. Ancak, geçici durum kararlılığı ve gerilim kararlılığı üzerindeki istenmeyen etkileri büyük olabilir [3]. Aynı zamanda güç sisteminde büyük kayıplar meydana getirirler. Yüksek empedanslı transformatörlerin kullanımı tipik olarak arıza akımı seviyesini % 15 civarında azaltır [47].

2.2.7.1. Büyük Empedanslı Transformatörlerin Kullanımı

Kısa devre empedansı büyük olan transformatörler arıza akımlarının genliklerinin küçük olmasına sebep olurlar. Güç transformatörünün kısa devre empedansı kısa devre akımının aktığı yola bağlıdır. Transformatörün kısa devre empedansı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Z = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U^2}{N_n} \quad (2.4)$$

Burada;

$\frac{U_k}{100}$: Nisbi kısa devre gerilimi (% z)

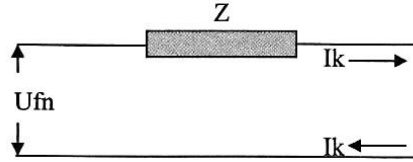
U: Kısa devre akımının hesaplanacağı fazlar arası baz gerilim (V)

N_n : Anma baz gücü (VA)

Z: Empedans (Ω)

Denklem 2.4'den görüldüğü gibi, transformatörün nisbi kısa devre gerilimi büyük olduğu zaman, kısa devre empedansı da büyük olmaktadır. Kısa devre empedansı transformatörün gücü ile ters orantılıdır.

Güç transformatörlerinin yüksek gerilim sargıları sonsuz bir şebekeden beslenirken sekonder sargı çıkışlarında üç fazlı kısa devre meydana geldiğinde, kararlı durumda akan kısa devre akımının değeri, Denklem 2.5 yardımıyla hesaplanabilir. Şekil 2.17'de transformatör sekonderindeki kısa devrenin tek hat diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Transformatör sekonderindeki kısa devrenin tek hat diyagramı [48]

U_{fn} : Faz-nötr besleme gerilimi = $\frac{U}{\sqrt{3}}$ (V)

Z: Transformatör kısa devre empedansı (Ohm)

Kısa devre akımı;

$$I_k = \frac{U_{fn}}{Z} = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{\frac{U_k}{100} \cdot \frac{U^2}{\sqrt{3} U I}} = \frac{100}{U_k} \cdot I \quad (2.5)$$

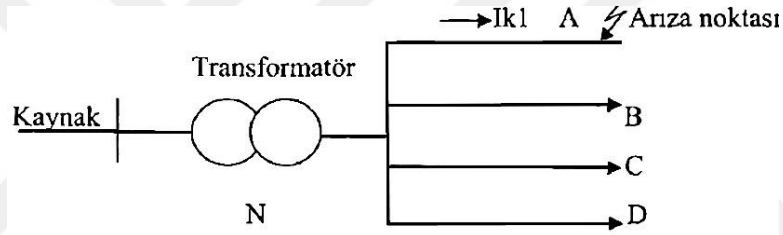
olmaktadır.

Kısa devre empedansının büyük olması, arıza akımının genliğinin küçük olmasına neden olmaktadır. Fakat transformatörün sargılarında meydana gelen reaktif güç kaybı,

yük akımının genliğinin karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Sargılardaki gerilim düşümü de devreden akan akım ile orantılı olarak artmaktadır.

2.2.7.2. Küçük Güçlü Transformatörlerin Kullanımı

Eğer sistem uygunsa, yükleri beslemek için bir adet transformatör yerine birkaç tane küçük güçlü transformatör kullanmak ve bu transformatörleri aynı baralara bağlamak suretiyle transformatörlerin kısa devre empedansları artırılabilir. Şekil 2.18’de tek transformatörün kullanıldığı sistemin prensip şeması gösterilmiştir. Yükün bir adet transformatörle beslenmesi durumunda kısa devre akımının genliği sistem empedansı ve gücüne bağlı olarak belirlenen I_k genlikli akım olacaktır.



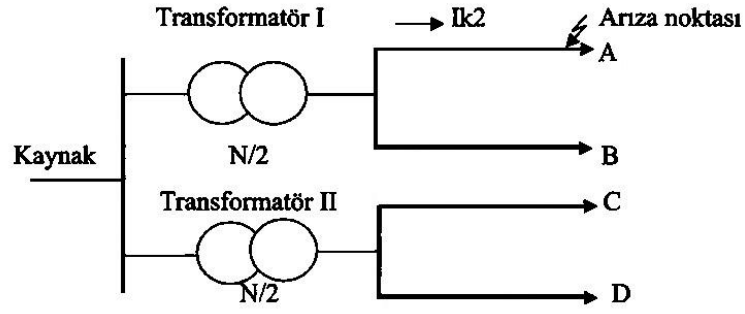
Şekil 2.18. Bir adet transformatör kullanımı [48]

A,B,C,D: Yükün bağlandığı fiderler

N: Transformatörün gücü

I_{k1} : Kısa devre akımı

Yükler ve tesis uygun ise, yüklerin iki ayrı baraya bağlanması ve müstakil baraların $N/2$ gücündeki transformatörler ile beslenmesi, kısa devre akımının genliğinin küçültülmesinde etkili olmaktadır. Müstakil baraları besleyen transformatörlerin gücünün küçük olmasından dolayı, bu transformatörlerin kısa devre empedansı büyük olmaktadır. Bu nedenle, müstakil ayrı baraya bağlı sistemde meydana gelecek kısa devrede besleme sisteminin empedansı büyük olacağı için kısa devre akımının genliği daha küçük olacaktır. Şekil 2.19’da birden fazla küçük güçlü transformatör kullanan sistemin prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Birden fazla küçük güçlü transformatör kullanımı [48]

A,B,C,D: Yükün bağlandığı fiderler

N/2: Transformatör gücü

I_{k2} : Kısa devre akımı

Bu tür bir uygulamada $I_{k2} < I_{k1}$ olmaktadır. Fakat iki adet transformatör kullanılmasının maliyeti daha fazla olmaktadır. Transformatörün empedansı büyük olacağı için reaktif güç kaybı ve bu empedanstaki gerilim düşümü de daha fazla olacaktır [48].

2.2.8. HVDC Kullanımı

İletim hatlarının HVDC bağlantılar ile değiştirilmesi, arıza akımlarının seviyesini azaltacaktır. Ancak çoğu durumda bu yöntem ekonomik değildir [3]. İletim hatlarını AC'den DC'ye çevirmek, izolator montajlarının ve iletken yapısının değişmesi anlamına gelir. HVDC bağlantı kısa devre akımına çok düşük bir katkıda bulunur. Back-to-Back (BTB) DC bağlantı aslında, AC empedans açısından açık devre gibi görünür [49]. Bu sebeple güç sistemindeki arıza akımının seviyesi sınırlanmış olur.

2.2.9. Yüksek Gerilim Seviyeli İletim Hatlarının Kullanımı

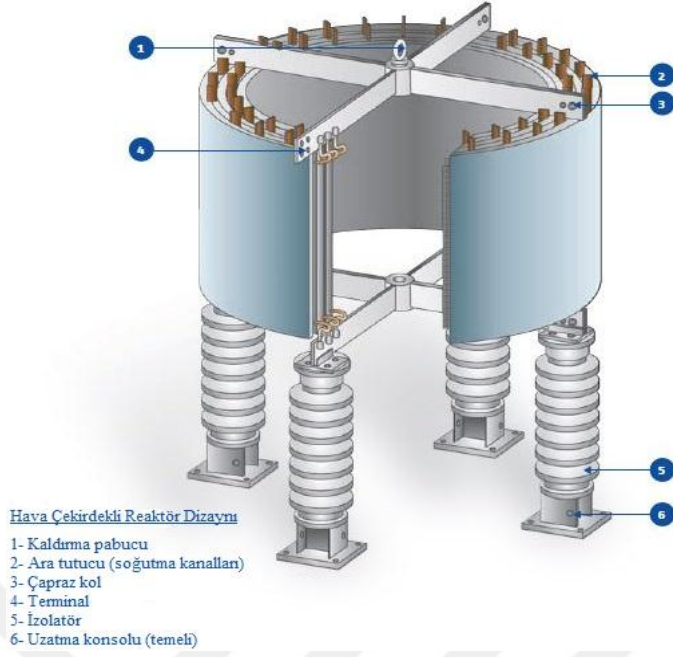
Bu yöntemde, mevcut güç sistemi birkaç adaya bölünür. Daha sonra daha yüksek bir gerilim sistemi tasarlanır ve adalar bu daha yüksek gerilimli sistem üzerinden birbirine bağlanır [50]. Sistemdeki akım, yüksek gerilime geçiş sebebiyle azaldığından arıza meydana geldiğinde de arıza akımının seviyesi azalmış olacaktır. Bu yöntem karmaşık ve pahalı olduğu gibi pratik de değildir.

2.2.10. Nötr Reaktörlerin Kullanımı

Transformatörlerin nötrlerindeki reaktör uygulaması, toprak arıza akımı seviyesini sınırlar. Arızaların çoğunluğu toprak arızası olduğundan bu yöntem etkili bir yaklaşımdır [50]. Nötr reaktörü, sistem toprak arızası altındayken, faz-toprak akımını istenen bir değere sınırlamak için toprak ile güç sisteminin nötrü arasına bağlanır [51]. Genellikle transformatörlerde, generatörlerde ve topraklama transformatörlerinde toprak ile nötr arasına bağlanırlar. Nötr topraklama reaktörleri bir yandan arıza akımlarını elemanlara zarar vermeyecek seviyelerde sınırlarken, diğer yandan da koruma rölelerine yeterli akımı sağlayarak bu sayede arızanın giderilmesini sağlarlar [52]. Şekil 2.20’de hava çekirdekli nötr reaktörler gösterilmiştir. Hava çekirdekli reaktörler, yağlı tip reaktörlere göre hafiflik, kolay montaj işlemi, daha küçük boyut, sızdırmazlık, minimum bakım gereksinimi ve düşük maliyet gibi birçok avantaja sahiptirler. Şekil 2.21’de hava çekirdekli nötr reaktör yapısı gösterilmiştir.



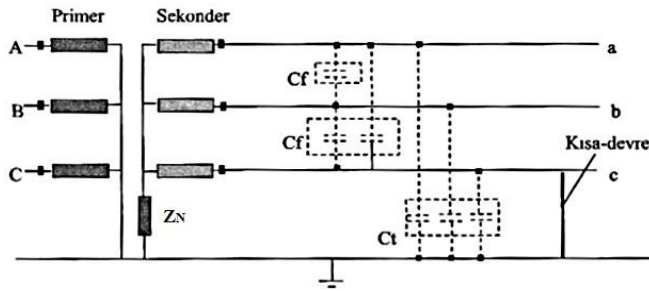
Şekil 2.20. Hava çekirdekli nötr reaktörleri [53]



Şekil 2.21. Hava çekirdekli nötr reaktörünün yapısı [53]

2.2.10.1. Transformatör Nötrünün Reaktörle Topraklanması

Sekonder sargısı yıldız bağlı ve nötr noktası doğrudan topraklı transformatörün beslediği sistemde meydana gelen bir faz-toprak kısa devresinde arıza akımının seviyesi istenmeyen büyüklüklere ulaşabilir. Arıza akımının seviyesini sınırlandırmak için güç transformatörünün nötr noktası reaktör üzerinden topraklanır. Şekil 2.22’de nötr reaktörü ile topraklanan sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Nötr reaktörü ile topraklanan sistem [48]

Z_N : Nötr reaktörü

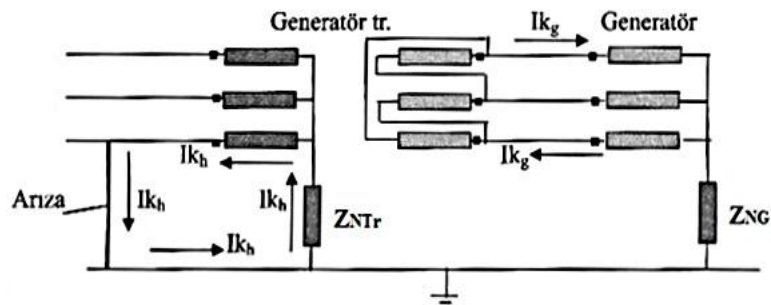
C_f : Fazlar arası kapasite

C_t : Fazlar ile toprak arası kapasite

Sekonder sargısının nötr noktası reaktör ile topraklanan güç transformatörünün sekonder sargısından beslenen sistemde meydana gelen bir faz-toprak arızasında, arıza akımı nötr reaktörü üzerinden akacaktır. Nötr noktası direnç veya reaktör üzerinden topraklı ya da nötrü izole transformatörün beslediği sistemlerde meydana gelen faz-toprak arasındaki arızalarda, fazlar arasındaki gerilimin genliği yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Örnek olarak 34.5 kV şebekede nötr noktasının 20Ω direnç ile topraklandığı durumda bir faz toprak arızası akımının genliği yaklaşık 1000 A olacaktır. Arızanın devam süresince arızalı fazın toprağa göre gerilimi azalacak, diğer arızasız iki fazın toprağa göre gerilimleri yaklaşık 34,5 kV yükselecektir. Nötr ile toprak arasına bağlanan reaktörler genellikle orta gerilimde kullanılmaktadır [48].

2.2.10.2. Generatör Transformatörünün Nötrünün Reaktörle Topraklanması

Generatör transformatörünün yüksek gerilim sargısı yıldız bağlı ve nötr izolasyonu uygunsa, yüksek gerilim sisteminde meydana gelen faz-toprak kısa devre akımlarının seviyesini sınırlandırmak için transformatörün sargı nötr noktası reaktör üzerinden topraklanabilir. Yüksek gerilimde meydana gelecek bir faz-toprak kısa devresinde arızasız fazların toprağa göre gerilimleri, arıza süresince faz-toprak değerinden fazlar arası değerine kadar yükselebilir. Nötr reaktörü üzerinde meydana gelen gerilim düşümü de faz-toprak gerilimine yükselebilir. Sonuçta yüksek gerilimde kullanılacak reaktör maliyeti artar. Bu nedenle nötr reaktörü uygulaması genelde orta gerilimde yapılır [48]. Şekil 2.23'de generatör transformatörünün nötr reaktör ile topraklanması gösterilmiştir.



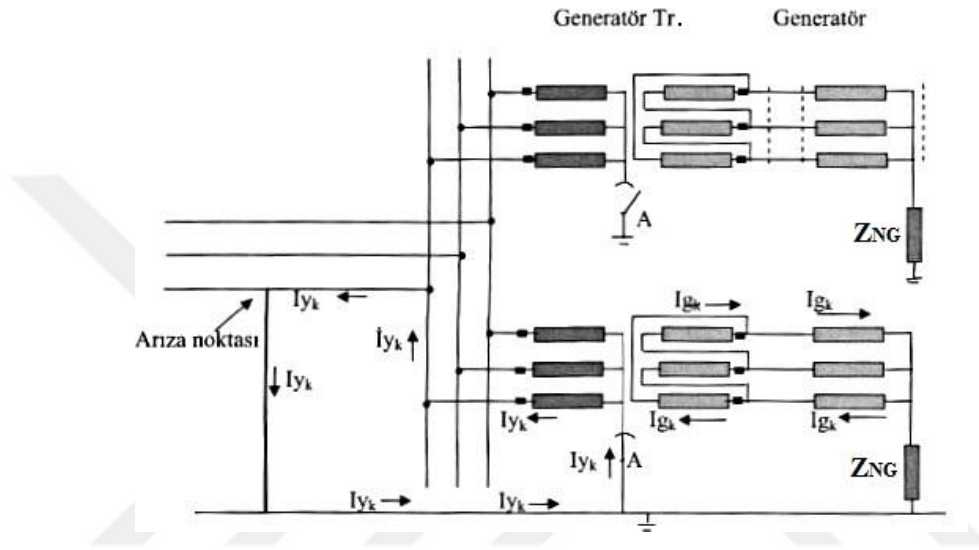
Şekil 2.23. Generatör transformatörünün nötr reaktör ile topraklanması [48]

Z_{NTr} : Transformator nötr reaktörü

Z_{NG} : Generatör nötr reaktörü

2.2.11. Nötr Noktası İzoleli Sistem

Yüksek gerilim iletim sistemlerinde meydana gelen bir faz-toprak kısa devresinde, kısa devre akımının seviyesini sınırlandırmak için, sistemi besleyen santrallerde birden fazla generatör varsa, bu generatörlerin yükseltici transformatörlerinin bazılarının YG sargı nötrü izole edilir [48]. Şekil 2.24’de bu sistemin prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Nötr noktası izoleli sistem [48]

A: Ayırıcı

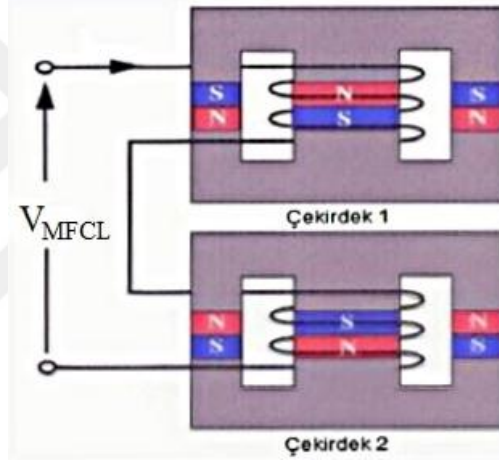
I_{yk} : Yüksek gerilim faz-toprak kısa devre akımı

I_{gk} : Generatör kısa devre akımı

Bu işlemin yapılabilmesi için generatör transformatörünün nötr izolasyonunun bu uygulamaya uygun olması gerekmektedir. Ayrıca, YG terminallerinden transformatöre gelebilecek transient gerilimlerin genliklerinin de nötr noktasında ve sargı içinde transformatörün temel izolasyon seviyesini (BIL) aşmaması gerekir. Faz-toprak kısa devre akımlarının sınırlandırıldığı durumlarda, en olumsuz koşullarda da sistemin tüm koruma rölelerinin tam güvence ile çalışabileceği arıza akımının akması gerektiği dikkate alınarak sınırlandırma yapılmaktadır. Şekil 2.24’de A ile gösterilen toprak ayırıcılarından biri açılarak faz-toprak kısa devre akımı sınırlandırılmıştır. Yani generatörlerden biri kısa devreyi beslerken diğer generatörden faz-toprak arıza akımı akmamaktadır [48]. Böylece sistemde meydana gelen arıza akımının seviyesi azaltılmış olur.

2.2.12. Manyetik Arıza Akımı Sınırlayıcılar

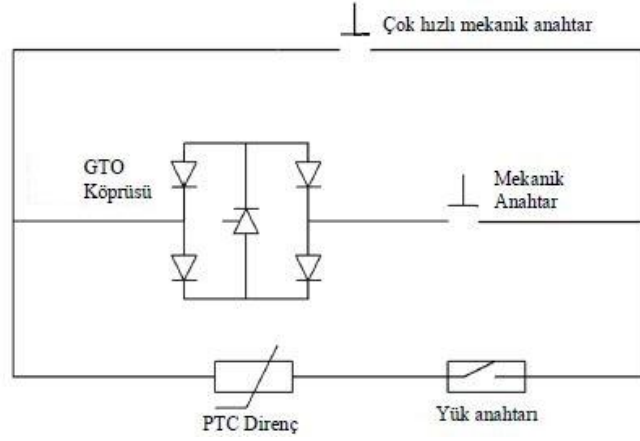
Manyetik FCL iki adet çekirdekten meydana gelmektedir. Çekirdekler içinde çekirdeği doymuş hale getirmek için kalıcı mıknatıslar bulunmaktadır. Mıknatıslar sayesinde normal işletme koşullarında çekirdek doymuş haldedir, dolayısıyla empedans çok düşüktür. Manyetomotor kuvvetin yönü ve alternatif akım, birinci çekirdeğe girip ikinci çekirdekten çıkar. Arıza meydana gelmesi durumunda kısa devre akımı yarım periyotta çekirdeğin bir tarafını doymuş hale getirirken, ikinci kısım ise doymamış olarak kalır. Bunun sonucunda empedans yükselerek arıza akımı sınırlanır [54]. Manyetik arıza akım sınırlayıcının eşdeğer devresi Şekil 2.25’de gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Manyetik FCL eşdeğer devresi [54]

2.2.13. Hibrit Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Hibrit FCL, SFCL ile SSFCL'nin bir arada kullanılması ile elde edilir. Normal işletme durumunda tüm anahtarlar kapalı konumdadır. GTO köprüsü devrededir. Arıza durumunda çok hızlı mekanik anahtar birkaç yüz mikro saniyeler mertebesinde açılır. Daha sonra GTO köprüsü devre dışı kalır ve arıza akımı PTC üzerinden akar. GTO köprüsüne seri olan anahtar yardımı ile GTO üzerinde oluşacak aşırı gerilimler önlenir. Sistemin korunması için sınırlandırılmış arıza akımı yük anahtarı tarafından kesilir [55, 56]. Hibrit FCL'ye ait eşdeğer devre modeli Şekil 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.26. Hibrit FCL eşdeğer devresi [4]

2.3. Arıza Akımı Sınırlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Güç sistemlerinde kullanılan ve giderek kullanımı yaygınlaşan arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar	Maliyet
Şebeke Rekonfigürasyonu	Tüm arıza problemleri çözülür ve gelecekteki genişlemeye uyum sağlanır.	Pahalı ve yapım süresi uzun	Çok yüksek
Bara Ayırma	Arızayı açan kesici sayısını düşürür.	Sistem kararlılığını azaltır.	Yüksek
CLR	Kolay montaj	Gerilim düşümü ve güç kayıpları mevcuttur. Sistem kararsızlığına sebep olabilir. Bu nedenle kompanzatörlere ihtiyaç duyulur.	Düşük veya orta
Nötr Reaktörü	Kolay montaj	Sadece toprak arıza akımları sınırlanır. Koruma röle ayarlarının güncelleştirilmesi gerekir.	Düşük veya orta

I _s Sınırlayıcı	Kolay montaj	Her çalışmadan sonra değiştirilmesi gereklidir.	Düşük
SSFCL	Normal işletme sırasında sistem üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi yoktur.	Karmaşık kontrol sistemlerine sahiptir.	Çok yüksek
SFCL	Normal işletme sırasında sistem üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi yoktur.	Özel soğutma sistemine ihtiyaç duyar.	Çok yüksek
Yüksek Empedanslı Transformatörler	Etkili bir sınırlandırma	Gerilim düşümü ve güç kayıpları mevcuttur.	Çok yüksek

Literatürde bulunan tüm arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinin ortak amacı, meydana gelen arızalarda yüksek genlikli akımların zararlı termal ve dinamik etkilerini en aza indirmektir. Birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları olan yöntemler için en önemli kriterler, arıza öncesinde sistemde herhangi bir olumsuz etki oluşturmaması ve akım sınırlandırma görevini etkili bir şekilde yerine getirdikten sonra arıza öncesi durumuna hızlı geçiş yapabilmesidir. Bu sebeple maliyetleri diğer yöntemlere göre yüksek olsa da, bahsedilen kriterler bakımından çok iyi performans gösterdikleri için, SFCL, SSFCL gibi modern sınırlandırma yöntemlerinin uygulamaları yakın zamanda yaygınlaşacaktır. Çünkü sürekli büyüyen güç sistemlerinde verimlilik de arıza akımlarını iyi bir şekilde sınırlandırmak kadar kritik bir öneme sahiptir.

3. SÜPERİLETKEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICILAR

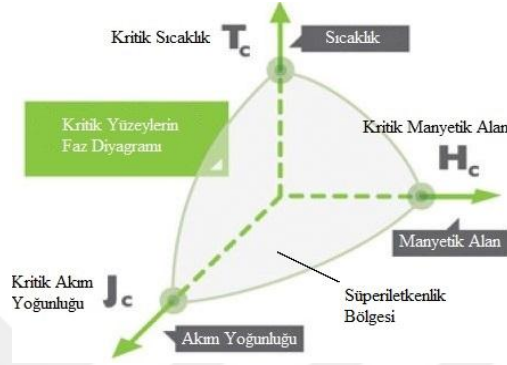
3.1. Giriş

Süperiletken tabanlı arıza akımı sınırlayıcıları, güç sistemindeki arıza seviyelerini kontrol etmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar (SFCL-Superconductor Fault Current Limiters), reaktörlerin veya yüksek empedanslı transformatörlerin aksine, normal çalışma sırasında devreye empedans eklemeyen arıza akımını sınırlarlar.

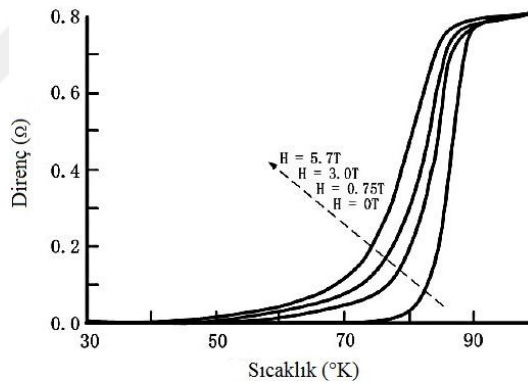
Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes 1908 yılında Helyum'u sıvı hale dönüştürmeyi başarmıştır. Bu başarı 4,2°K'e kadar olan düşük sıcaklıklarda, fiziksel özelliklerin araştırılmasını mümkün hale getirmiştir. Metallerin elektriksel dirençlerinin bu düşük sıcaklık bölgelerindeki değişimi yine ilk defa Onnes tarafından incelenmiştir. Sıvı Helyum'un keşfinden 3 yıl sonra Onnes, civa metalinde DC elektriksel direncin kritik sıcaklık (T_c) olarak adlandırdığı sıcaklık ve altındaki sıcaklıklarda ölçülemeyecek kadar küçük bir değere düştüğünü gözlemlemiştir. Bu değer daha sonra yapılan ölçümlerle sıfır olduğu anlaşılmıştır. Yapılan bu gözlem süperiletkenliğin keşfi olarak bilinmektedir [57].

SFCL çalışması, süperiletken malzemenin süperiletkenlik durumu ve süperiletken olmayan durum arasında geçiş yapabilme (faz değiştirme) yeteneğine dayanır. Süperiletkenler belirli bir kritik akım değeri aşıldığı zaman, dirençlerini sıfırdan yüksek bir değere otomatik olarak değiştiren malzemelerdir. Eskiden SFCL'nin işletimi, çok düşük sıcaklıklarda (-269 °C) çalışabilen süperiletken malzemelere dayandığından, süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarının elektrik tesislerindeki geniş çaplı kullanımları çok pahalı olmaktadır. Yirmi beş yıl kadar önce yüksek sıcaklıklı süperiletkenlerin (HTS-High Temperature Superconductors) keşfi ile soğutma problemi büyük ölçüde azalmıştır. Bu yeni HTS malzemeler çok daha yüksek sıcaklıklarda (-196 °C) çalıştırılabilir ve sıvı nitrojen (LN_2) kullanılarak basitçe soğutulabilir [58]. Bu malzemeler, sıcaklıkları kritik sıcaklık (T_c) olarak bilinen bir sıcaklığın altında olduğu sürece, pratik olarak kayıpsız şekilde akımı taşırlar. Bu kritik sıcaklığın değeri kullanılan süperiletkenin türüne bağlıdır. Bununla birlikte bu fiziksel olgu, akım yoğunluğu ve manyetik alan şartlarından da etkilenir. Sıcaklık, akım ve manyetik alan kendi kritik değerlerinden düşük olduğu sürece

süperiletkenlik durumu elde edilir [59]. Bu kritik değerler aşıldığı takdirde süperiletken malzeme artık süperiletkenlik özelliği göstermeyecek ve direnci arttığı için arıza akımını sınırlayacaktır. Şekil 3.1’de süperiletkenlik olgusunun kritik yüzeylerinin faz diyagramı gösterilmiştir. Şekil 3.2’de ise YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) süperiletken malzemenin dış manyetik alandaki sıcaklık-direnç eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Süperiletkenlik kritik yüzeylerinin faz diyagramı [59]



Şekil 3.2. YBCO'nun dış manyetik alandaki sıcaklık-direnç eğrisi [60]

SFCL, kritik sıcaklığı altında soğutulmuş mevcut süperiletken malzemenin yük akımının akmasına direnç göstermemesi sayesinde, normal çalışmada sistemde bir kayıp meydana getirmez. Arıza meydana geldiği zaman akım artar ve süperiletken malzemenin faz değişimine neden olan eşik değerin üstüne çıkar. Bu durumda arıza akımının ilk yarım periyodu içerisinde sisteme direnç gösterilmeye başlanır ve arıza akımı ilk tepe değerine ulaşmadan azaltılmış olur. Anlaşılacağı üzere SFCL, arıza akımının ilk periyodu içerisinde arıza akımı seviyesini azaltma yeteneğine sahiptir. SFCL tarafından arıza akımının ilk periyodunda bastırılması, kararlı bir şekilde yüksek güç taşıyan güç sisteminin geçici

durum kararlılığının artması ile sonuçlanır [61]. Bu işlem sırasında süperiletken malzeme ısınır. Kısa bir toparlanma aşamasında süperiletken malzeme soğutularak süperiletkenlik durumu tekrar sağlanır ve SFCL normal durum çalışmasına dışarıdan müdahale olmadan kendiliğinden dönmüş olur. Bu durum Denklem 3.1’de formüllerle ifade edilmiştir.

$$R_{SFCL} = \begin{cases} 0 & (t_0 > t) \\ R_m \left[1 - e^{\left(\frac{t-t_0}{T_{si}}\right)} \right]^{1/2} & (t_0 \leq t < t_1) \\ a_1(t - t_1) + b_1 & (t_1 \leq t < t_2) \\ a_2(t - t_2) + b_2 & (t_2 \leq t) \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada;

R_m : SFCL maksimum direnci

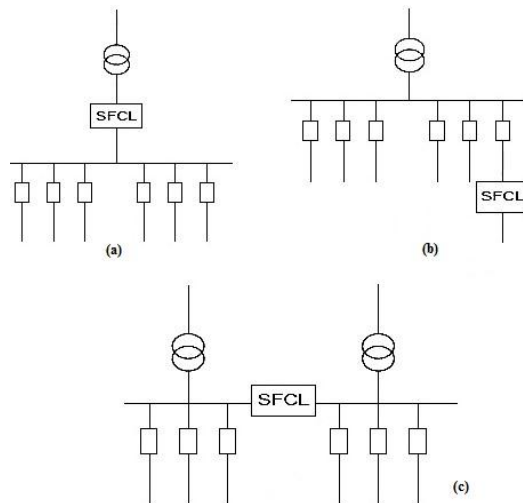
T_{si} : Zaman sabiti

t_0 : Rezistif bölgeye geçiş başlangıcı

t_1, t_2 : Birinci ve ikinci toparlanma süresi

a_1, a_2, b_1, b_2 : Birinci mertebeden lineer fonksiyonun katsayıları [62].

SFCL, dağıtım ve iletim sistemlerinde birçok farklı yerde uygulanabilir. Şekil 3.3’de SFCL’nin güç sistemlerindeki bazı tipik uygulama yerleri gösterilmiştir. SFCL, Şekil 3.3 (a)’da transformatör çıkışında, Şekil 3.3 (b)’de fider çıkışında ve Şekil 3.3 (c)’de bara bölüm pozisyonunda bulunmaktadır.



Şekil 3.3. SFCL'nin uygulama yerleri [59]

3.2. İdeal SFCL Karakteristikleri

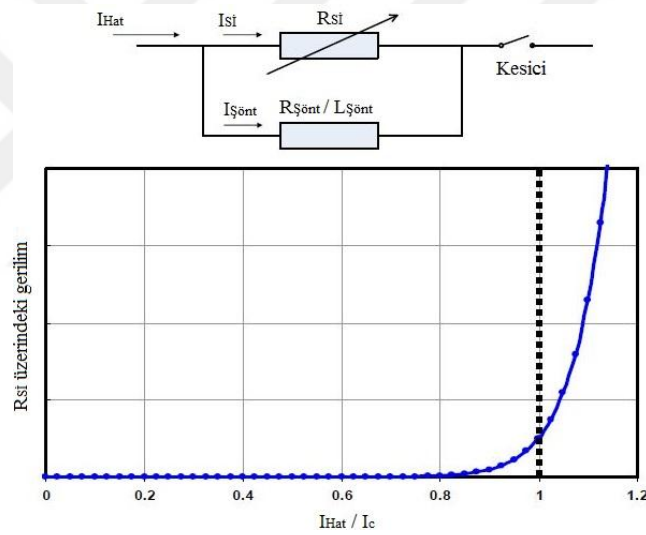
- Normal çalışma durumunda sıfır veya düşük bir empedans, sıfır gerilim düşümü ve güç kaybı
- Arıza durumunda büyük empedans
- Arıza olduğu zaman empedansın hızlı gösterilmesi
- Bir periyottan veya 16 milisaniyeden daha az bir süre içerisinde hızlı bir algılama ve sınırlama eylemini başlatma (60 Hz için)
- Arıza ortadan kaldırıldıktan sonra hızlı bir toparlanma (yarım periyot veya 8 ms) gösterme (60 Hz için)
- Belirlenen arıza akımında güvenilir şekilde akım sınırlama
- İyi bir güvenilirlik [63].

3.3. SFCL Tipleri

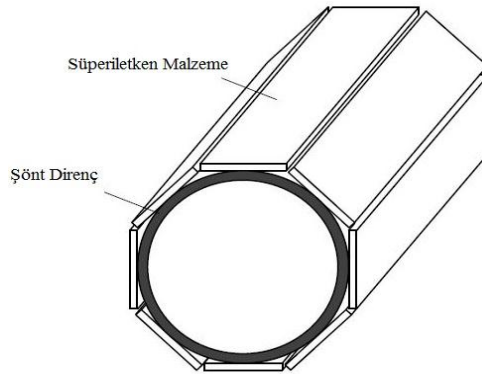
3.3.1. Rezistif SFCL

SFCL'nin bu tipi, diğer tiplere göre daha basit yapı, daha küçük boyut ve daha düşük yatırım maliyeti gibi avantajlara sahiptir. Normal çalışma sırasında, süperiletken malzeme süperiletkenlik durumunda ve normal yük akımı teorik olarak kayıpsız olarak iletilmektedir. Arıza durumunda, akım hızla yükselir ve süperiletken malzeme süperiletkenlik bölgesinden çıkar. Böylece nonlineer direncin belli bir değeri kendiliğinden meydana gelir ve bunun sonucunda arıza akımı sınırlanmış olur [64]. Dirençteki hızlı artış, süperiletken üzerinde bir gerilim oluşturur ve arıza akımının, süperiletkenin paralelindeki indüktör ve direnç bileşimine transferine sebep olur. Bu durum süresince, şönt kol süperiletken üzerindeki gerilim artışını sınırlar. Aslında süperiletken, yük akımını şönt empedansa iletmeyi sağlayan milisaniyelik tepkiler ile bir anahtar gibi davranmaktadır. İdeal olarak, yeni başlayan arıza akımı bir periyottan daha kısa sürede sınırlanır. Şekil 3.4'de rezistif SFCL devresi ve cihaz akımı I_{Hat} 'ın süperiletken malzemenin kritik akımı I_c 'ye oranının bir fonksiyonu olarak süperiletken direnci R_{si} üzerindeki gerilim gösterilmiştir. Burada süperiletken üzerindeki akım ve direnç arasındaki nonlineer ilişki görülmektedir. Bu eğri için veriler, süperiletken sabit manyetik alan ve sabit sıcaklıktayken

ölçülmüştür. Günümüzde HTS malzemeler için iletken boyunca gözlemlenen $1.0 \mu\text{V/cm}$ gerilim düşümüne neden olan akım, kritik akım olarak tanımlanır [1]. Kısaca, normal işletmede süperiletken malzeme yaklaşık olarak sıfır direnç gösterir ve teorik olarak gerilim düşümü veya enerji kaybına sebep olmaz. Ancak, arıza durumunda akım, süperiletkenin kritik akımından büyük bir değere ulaştığında malzeme rezistif bölgeye geçiş yapar. Böylece arıza akımının genliği çok kısa sürede sınırlanır. Arıza ortadan kalktıktan sonra, süperiletken malzemenin arıza öncesindeki karakteristiğine getirilmesi için çok hızlı şekilde soğutulması gerekmektedir. Aksi takdirde sistemde gerilim düşümüne ve kayıplara yol açacaktır. Soğutma sistemi maliyetli olup normal işletme sırasında SFCL'nin enerji harcamasına neden olmaktadır. Şekil 3.5'de şönt direnç kullanılan rezistif SFCL malzemesinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Rezistif SFCL devresi ve I_{Hat}/I_c 'nin fonksiyonu olan R_{si} üzerindeki gerilim [1]



Şekil 3.5. Şönt dirençli rezistif SFCL malzemesinin yapısı [42]

3.3.2. İndüktif SFCL

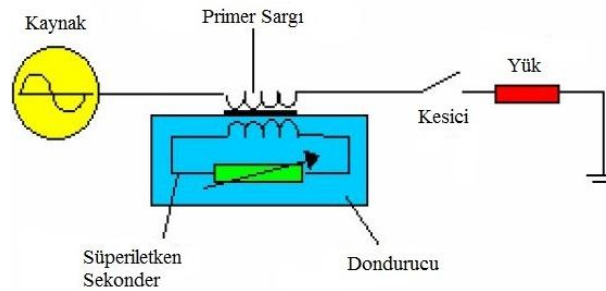
İndüktif SFCL uygulamaları iki başlık altında sınıflandırılabilir.

- Korumalı Çekirdekli İndüktif SFCL (Shielded-Core Inductive SFCL)
- Doyurulabilir Çekirdekli İndüktif SFCL (Saturable-Core Inductive SFCL)

3.3.2.1. Korumalı Çekirdekli İndüktif SFCL

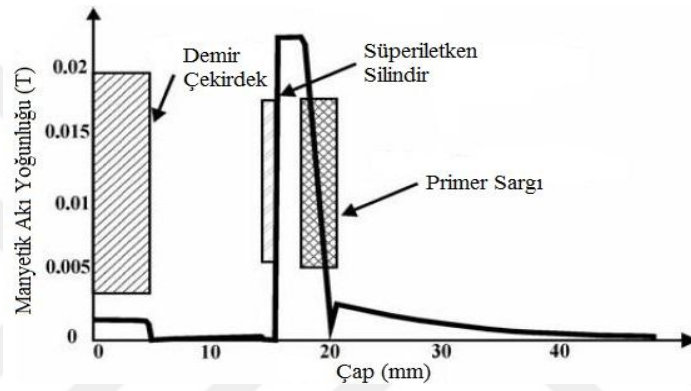
Korumalı çekirdekli indüktif SFCL'nin çalışma prensibi de süperiletken malzemenin süperiletkenlik durumundan rezistif duruma olan hızlı geçişine dayanır. Manyetik olarak indüklenen akım, süperiletkenin kritik akımını geçtiği zaman bu geçiş gerçekleşir. Bu tip indüktif SFCL, sekonder sargıları kısa devre edilmiş transformatör gibi tasarlanır.

Sekonder sargı genellikle HTS bir silindiridir ve bunun görevi normal durumda demir çekirdeği, sınırlayıcının primer sargısı tarafından üretilen akıdan korumaktır. Primer sargı genellikle elektrik devresiyle doğrudan bağlantılı bakırdan yapılır. Eğer sekonder sargı kritik akımından fazla bir akımla karşılaşır rezistif duruma geçer. Bunun sonucunda primer sargıdan çıkan akı demir çekirdeğe girer. Böylece primer sargının indüktansı ve dolayısıyla empedansı hızlı bir şekilde artar [65]. Kısaca, süperiletkene paralel olan transformatörün mıknatıslanma indüktansı tarafından oluşturulan sınırlayıcı empedansı dönüştürme oranının karesiyle primer tarafa yansıtılır. Sınırlayıcı empedansının direnç veya indüktif karakteristiğini başlıca tasarım parametreleri belirler. [66]. Sonuç olarak SFCL'nin indüktansı sayesinde devredeki arıza akımı sınırlanır. Şekil 3.6'da korumalı çekirdekli indüktif SFCL devresi gösterilmiştir.

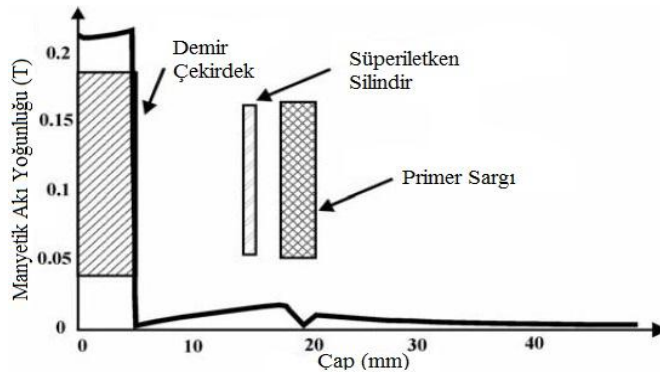


Şekil 3.6. Korumalı çekirdekli indüktif SFCL devresi [32]

Normal durumda, HTS silindir formundaki sekonder sargı süperiletkenlik durumundadır ve çekirdeğin kalkanı gibi davranır. Demir çekirdek üzerindeki HTS silindir normal durumda düşük bir kaçak indüktansa ve dolayısıyla istenmeyen gerilim düşümlerine sebep olur [66]. Arıza altında manyetik kaynaklı akım, süperiletken silindirin kritik akımını geçer ve rezistif duruma geçilir. Bunun sonucunda manyetik alanın demir çekirdeğe nüfuzu, sınırlayıcı empedansının artmaya devam etmesine olanak sağlar. Şekil 3.7’de aksenal kesitte süperiletkenlik durumunda manyetik indüksiyon gösterilmiştir. Şekil 3.8’de ise aksenal kesitte rezistif durumda manyetik indüksiyon gösterilmiştir.



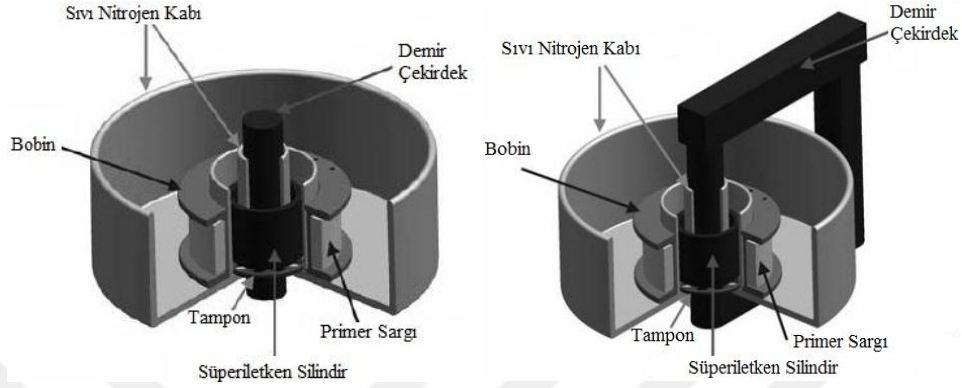
Şekil 3.7. Aksenal kesitte süperiletkenlik durumunda manyetik indüksiyon [6]



Şekil 3.8. Aksenal kesitte rezistif durumda manyetik indüksiyon [6]

Korumalı çekirdekli indüktif SFCL'nin yapısında açık veya kapalı demir çekirdek kullanılabilir. Bu iki çekirdek tipinin de çalışma prensibi aynıdır ve açık çekirdekli SFCL ile kapalı çekirdekli SFCL'nin sınırlama performansları oldukça benzerdir. Ayrıca, açık çekirdek yapısı kompakt, ekonomik ve verimli olma özelliklerine sahiptir. Ancak,

yakındaki hassas cihazların çalışmasına bozucu etkiye bulunan manyetik alan girişimine neden olmaktadır [66]. Şekil 3.9 (a)'da açık çekirdekli, Şekil 3.9 (b)'de ise kapalı çekirdekli indüktif SFCL gösterilmiştir.

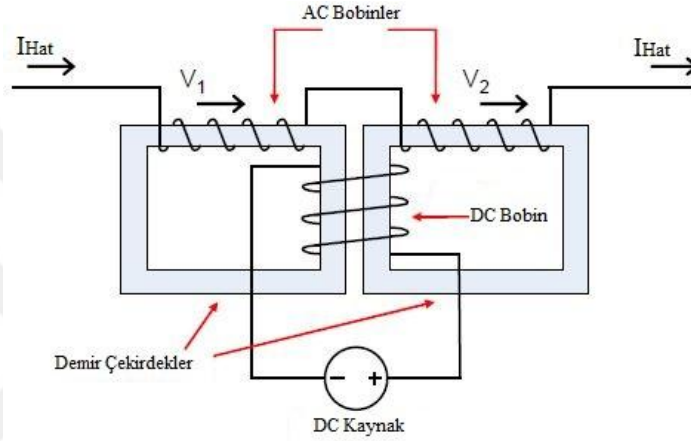


Şekil 3.9. İndüktif SFCL a) Açık çekirdekli b) Kapalı çekirdekli [6]

3.3.2.2. Doyurulabilir Çekirdekli İndüktif SFCL

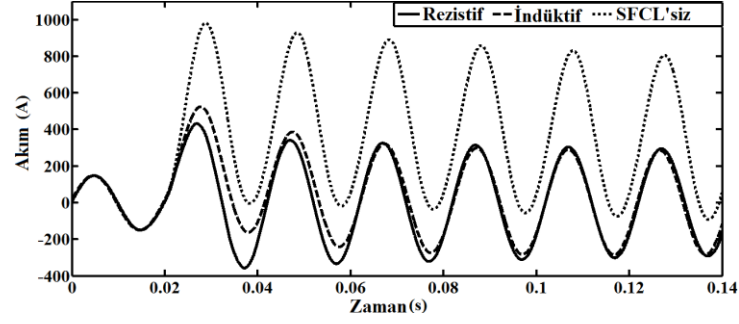
Rezistif ve korumalı çekirdekli indüktif SFCL'nin aksine, AC hatta indüktif reaktansı değiştirmek için demir çekirdeğin manyetik özelliklerinin dinamik davranışını kullanır. Bu yapı iki demir çekirdek ve her faz için iki AC sargı kullanır. AC sargılar, AC hat ile seri bir indüktans oluşturmak için çekirdeğin etrafına sarılmış olan iletkenlerden yapılır. Demir çekirdek, ayrıca manyetik bias sağlayan sabit akımlı süperiletken sargılara da sahiptir. Nominal durumda (AC akım sistemin maksimum anma akımını aşmadığı zaman), HTS bobin (DC bobin) DC uyarımla çekirdeği nispi geçirgenliği "1" olacak şekilde tamamen doyurur. AC bobinlere göre, demir çekirdek hava gibi davranır. Bu yüzden AC empedans (indüktif reaktans) hava çekirdekli bir reaktöre benzerdir. Arıza şartları altında, akımın negatif ve pozitif tepe değeri, çekirdeği her yarım periyot boyunca artan hat empedansı ile sonuçlanan doyumdan çıkarmaya zorlar. Sonuçta arıza akımının tepe değerinde önemli bir azalma olur. Sınırlama eylemi sırasında çekirdeğin doyumu (saturasyonun) içine ve dışına olan ani dinamik hareketi, akımın dalga şeklinde harmonikler üretir. Ancak normal şartlar altında, gerilim ve akımın dalga şekilleri, doyurulabilir çekirdekli indüktif SFCL tarafından etkilenmez. Aslında bu tip SFCL normal durumda, hava çekirdekli reaktörün empedansına ve arıza durumunda ise çok yüksek empedansa sahip olan değiştirilebilir indüktanslı demir çekirdekli reaktördür. Süperiletken

bileşenlerin soğutulması için sınırlama eylemleri arasında süre gereken rezistif SFCL'nin aksine, doyurulabilir çekirdekli SFCL ile art arda birçok eylem yapılabilir. Çünkü doyurulabilir çekirdekli SFCL'de süperiletkende geçiş olayı meydana gelmez. Gerçekte bu tip SFCL, süperiletken bobin kullanmaya ihtiyaç duymaz. Ancak, HTS DC alan sargılarının kullanımı işletme kayıplarını azaltır. Bu tip SFCL'nin en büyük dezavantajı demir çekirdekten kaynaklı büyük hacminin ve ağırlığının olmasıdır. [1]. Şekil 3.10'da doyurulabilir çekirdekli indüktif SFCL devresi gösterilmiştir.



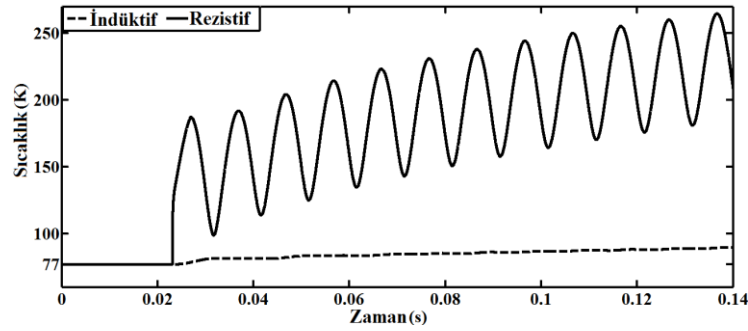
Şekil 3.10. Doyurulabilir çekirdekli indüktif SFCL devresi [1]

Rezistif ve indüktif SFCL'nin amacı ortak olsa da arıza akımı sınırlama yetenekleri arasında belirli bir fark bulunmaktadır. Şekil 3.11, YBCO süperiletkeni kullanılan rezistif ve indüktif SFCL'li ve SFCL'siz bir kısa devre durumundaki akımın dalga şeklini göstermektedir. SFCL'siz durumda arıza akımı, nominal akımın yaklaşık yedi katıdır. Bu değer sistem elemanlarına zarar verebilecek düzeydedir. Rezistif SFCL kullanılarak arıza akımı, ilk periyot içinde nominal akımın üç katından daha küçük bir değere sınırlanır ve arıza temizlenmeden önce nominal akımın iki katına kadar azalmaya devam edecektir. İndüktif SFCL kullanılarak arıza akımının ilk tepe değeri nominal akımın dört katından daha küçük bir değere sınırlanır ve arıza temizlenmeden önce nominal akımın iki katına kadar azalmaya devam edecektir. Bu durum rezistif SFCL'nin akımın ilk tepe değerini sınırlamada indüktif SFCL'den daha iyi olduğunu açıklamaktadır [14].

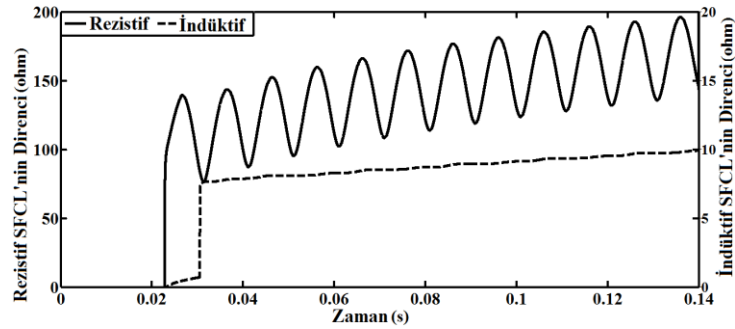


Şekil 3.11. Kısa devre akımının dalga şekilleri [14]

Şekil 3.12, iki SFCL tipinin sıcaklığını göstermektedir. Rezistif SFCL’de sıcaklık ilk periyotta kritik sıcaklığı ($T_c = 90^\circ\text{K}$) aşar ve daha yüksek değerlere çıkmaya devam eder. Ancak indüktif SFCL’de sıcaklık tüm arıza süresince kritik sıcaklığın altında kalır. Şekil 3.13’de gösterildiği gibi rezistif SFCL’ye kıyasla indüktif SFCL’nin daha küçük dirence sahip olduğu anlaşılmaktadır. Süperiletkenlerin düşük sıcaklık değerlerine sahip olması malzemenin ömrünü artırır ve sınırlayıcıyı üst üste meydana gelen arızalar için elverişli hale getirir. Bu durum indüktif SFCL’yi, ardışık arızalar ve uzun ömür açısından rezistif SFCL’ye göre daha tercih edilir hale getirir [14].



Şekil 3.12. Sıcaklık dalga şekilleri [14]



Şekil 3.13. Direnç dalga şekilleri [14]

3.4. SFCL Uygulamaları

YBCO, NbTi, MgB₂, Bi-2212, Bi-2223 gibi süperiletken malzemeler kullanılarak sınırlama işlemi gerçekleştirilir. OG ve YG seviyesinde uygulamaları mevcuttur. Birleşik Krallık Lancashire’da ve Almanya Boxberg’de 12 kV’luk prototip rezistif SFCL uygulamaları bulunmaktadır. Ayrıca, Çin’de 35 kV 90 MVA Saturable-Core SFCL uygulaması bulunmaktadır [1].

Şekil 3.14’de şalt sahasındaki SFCL uygulaması, Şekil 3.15’de Kaliforniya’daki Shandin transformatör merkezindeki 15 kV’luk prototip Saturable-Core SFCL uygulaması gösterilmiştir.

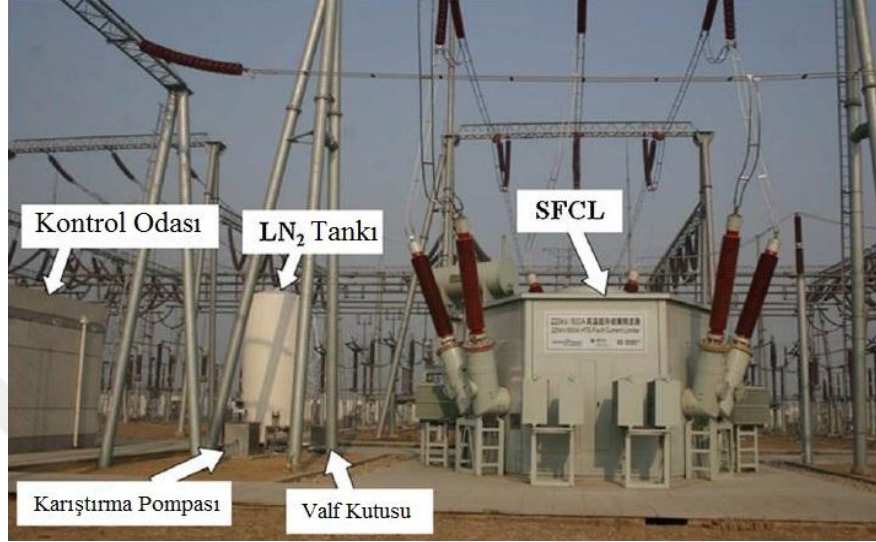


Şekil 3.14. SFCL uygulaması



Şekil 3.15. 15 kV Saturable-Core SFCL uygulaması [1]

Şekil 3.16’da Çin’deki Shigezhuang transformatör merkezindeki 220 kV 300 MVA SFCL gösterilirken, Şekil 3.17’de ise Almanya’da Vattenfall Linyit Güç Santrali’ndeki 12 kV 800 A’lik SFCL uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 3.16. 220 kV 300 MVA SFCL [5]



Şekil 3.17. 12 kV 800 A SFCL [67]

Şekil 3.18’de Almanya Saksonya’daki Boxberg Linyit Güç Santrali’ndeki 12 kV 800 A’lik SFCL, Şekil 3.19’da ise 12 kV 2400 A SFCL uygulaması gösterilmiştir. Şekil 3.20’de ise Siemens tarafından geliştirilen rezistif SFCL gösterilmiştir.



Şekil 3.18. 12 kV 800 A SFCL [68]



Şekil 3.19. 12 kV 2400 A SFCL [69]



Şekil 3.20. Rezistif SFCL uygulaması [70]

Şekil 3.20’de, “1” numara SFCL’yi, “2” numara LN₂ tankını, “3” numara izolatörleri, “4” numara baraları ve “5” numara ise gerilim dönüştürücüyü göstermektedir.

3.5. SFCL ve Diğer Arıza Akımı Sınırlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Arıza akımı sınırlandırma yöntemleri arasında, CLR en çok bilinen yöntemdir. Bu yöntem sistemdeki seri empedansı arttırdığı için arıza akımının genliğini sınırlar. Ancak CLR, sürekli sistemde olduğu için gerilim düşümlerine ve güç kayıplarına sebep olur. Ayrıca geçici toparlanma geriliminin yükselme hızını arttırdığı için sistem elemanlarında yalıtım problemleri meydana gelebilir. Bu olumsuz özelliklerine rağmen SFCL'ye göre daha küçük, daha ekonomik ve daha pratik olduklarından yaygın olarak kullanılırlar.

SSFCL hızlı anahtarlama yapabilen güç elektroniği elemanlarını kullanarak arıza akımını sınırlar. Normal durumda, sistemde herhangi bir gerilim düşümü ve kayıp göstermezler. SFCL'nin gerektirdiği soğutma sistemine ve toparlanma süresine ihtiyaç duymazlar. SFCL gibi büyük hacimli olabilirler. Arıza durumunda ise birkaç milisaniyede yüksek empedans göstererek arıza akımının genliğini düşürürler. Ancak SSFCL kullanımı, yüksek maliyet ve yardımcı kontrol sistemlerinin karmaşıklığı sebebiyle henüz yaygınlaşmamıştır.

SFCL, bünyesinde bulunan süperiletken malzemenin süperiletkenlik ve rezistif durum arasındaki geçişine dayalı bir yöntemdir. SFCL normal çalışma sırasında, süperiletkenlik sebebiyle teoride yaklaşık olarak sıfır direnç gösterir. Arıza durumunda kritik akım değeri aşıldığı anda malzeme rezistif duruma geçer ve arıza akımı ilk yarım periyodu içerisinde sınırlanır. SSFCL gibi güç elektroniği anahtarları içermez ve kontrol sistemi karmaşık değildir. Ayrıca SFCL, SSFCL ile karşılaştırıldığında harici uyarma sistemi ve arıza tespit ünitesi gerektirmediğinden daha yaygın olarak kullanılır. Süperiletkenlik durumu için önemli olan soğutma sistemi 77 °K'deki LN₂ ile sağlanır. Bu sistem dondurucu tanklar, pompalar, iletim boruları gibi yapılar içerir ve maliyetlidir. Soğutma sisteminin ihtiyacından dolayı normal çalışma sırasında belirli bir enerji kaybı olmaktadır ancak bu değer, CLR ve yüksek empedanslı transformatördeki kayıplara göre düşüktür. Soğutma sistemindeki herhangi bir aksaklık, rezistif durumda kalmaya haliyle gerilim düşümüne ve kayıplara sebep olacaktır. Bu nedenle çok hızlı bir toparlanma süresi gerekmektedir. Süperiletken malzemenin üretimi zor ve maliyetlidir. Ayrıca kolay kırılabilirler. SFCL, yüksek yatırım maliyeti sebebiyle yaygınlaşmasa da uygulamaları mevcuttur.

CLF'de, arıza akımının büyüklüğüyle orantılı olarak açığa çıkan ısı enerjisinin sigorta telini eritmesiyle arıza akımı olası tepe değerine ulaşmadan önce daha küçük bir

değere sınırlanır. Bir kez açma yaptığında yenisiyle değiştirilmesi gerektiğinden sık tekrar kapama gereken durumlarda kullanılamaz. Normal çalışma sırasında meydana getirdiği kayıplar SFCL'ye göre ihmal edilebilir. SFCL'ye göre daha küçük, daha basit ve daha ucuz olduğundan uygulamada yaygın olarak kullanılırlar.

I_s sınırlayıcılar, sigortalara göre daha gelişmiş elemanlardır. Normal şartlarda gerilim düşümü olmadan yük akımını iletirken, arıza durumunda ana iletkenin kontakları akımın ilk yükselişi sırasında (1 milisaniyeden daha az sürede) açılır ve arıza akımı sigortadan akmaya başlar. Bu yöntemde sigortadan farklı olarak ölçme ve açma cihazları, akım transformatörü ve darbe transformatörü bulunur. I_s sınırlayıcılar arıza akımı sınırlamada kullanılan pratik bir yöntemdir fakat kullanımları OG ile sınırlıdır. SFCL'ye göre daha küçük, daha basit ve daha ucuz olmalarına rağmen YG'de kullanılamamaları dezavantajdır.

Güç sisteminin yeniden yapılandırılması arıza durumuna bağlı olan deneysel bir yöntemdir. Yeniden yapılandırma mevcut sistem içerisinde yapılırsa, ekonomik sorunlar yaşanmadan arıza akımının seviyesi azaltılabilir. SFCL'ye göre karmaşık ve zor bir yöntemdir. Bu yöntem yeni elemanlar kullanılarak yapılırsa maliyet sorunları da ortaya çıkacaktır.

Bara ayırma yöntemi, CLR'den daha etkili bir yöntemdir. Çünkü bu işlemden sonra sonsuz reaktanslı bir durum meydana gelir. Ancak, bu yöntem geçici durum kararlılığını ve gerilim kararlılığını olumsuz etkileyebilir. SFCL'ye göre ucuz bir yöntemdir ancak sistemin güvenilirliğini negatif yönde etkilemektedir.

Yüksek empedanslı transformatörler arıza akımı sınırlamada etkili bir yöntemdir. Geçici durum kararlılığını ve gerilim kararlılığını olumsuz etkileyebilirler. Aynı zamanda sistemde yüksek kayıplara sebep olurlar. Bu kayıplar SFCL'nin soğutma sisteminin gereksiniminden kaynaklı kayıplara göre oldukça yüksektir. SFCL gibi büyük hacimli olabilirler. Soğutma için LN_2 'ye ihtiyaç duymazlar. Yatırım maliyetleri de SFCL gibi yüksektir.

HVDC kullanımı arıza akımı seviyelerini azaltacak bir yöntem olmasına rağmen, yüksek maliyeti sebebiyle tercih edilen bir yöntem değildir ve SFCL'ye göre uygulanması zor bir yöntemdir.

Yüksek gerilim seviyeli iletim hatlarının kullanılması arıza akım seviyelerini azaltır, ancak sistem elemanlarının değişmesi gibi yüksek maliyet sorunları vardır ve pratik değildir. Bu sebeplerden dolayı SFCL'ye göre karmaşık ve maliyetli bir yöntemdir.

Nötr reaktör kullanımı arıza akımı sınırlandırmada sık kullanılan bir yöntemdir. Transformator veya generatörlerin nötr noktaları bu reaktörler üzerinden topraklandığı için toprak arızası akımlarının genlikleri önemli ölçüde azaltılır. YG'de kullanılan reaktörler pahalı olduğundan kullanımlarına genellikle OG'de rastlanır. Nötr noktası izoleli sistemlerde, nötr noktası sonsuz empedans ile topraklanmış gibi olduğundan arıza akımları sınırlanır. SFCL'ye göre daha küçük, daha ekonomik ve daha pratik olduklarından yaygın olarak kullanılırlar.

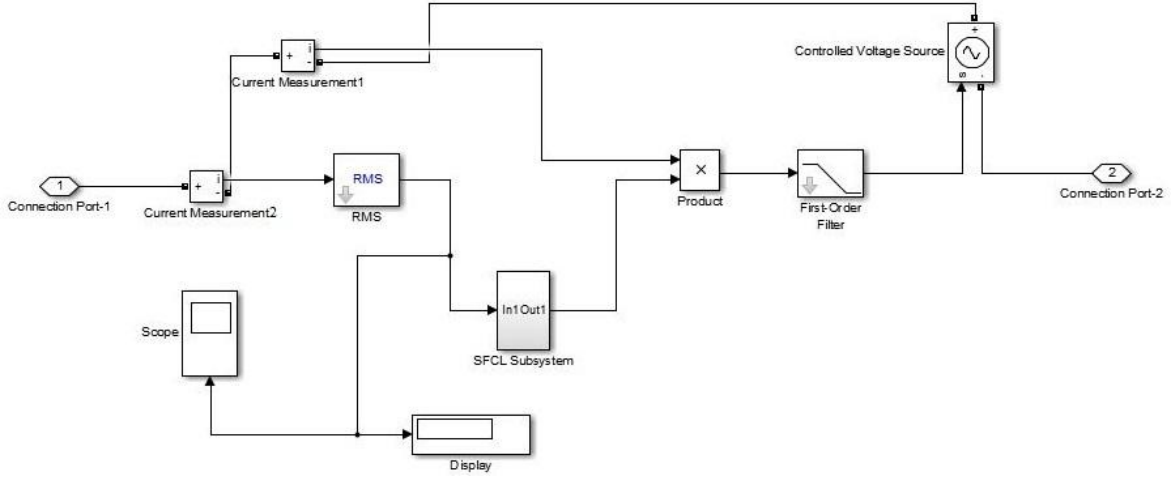


4. SFCL’NİN İLETİM SİSTEMLERİNDE KULLANIMI

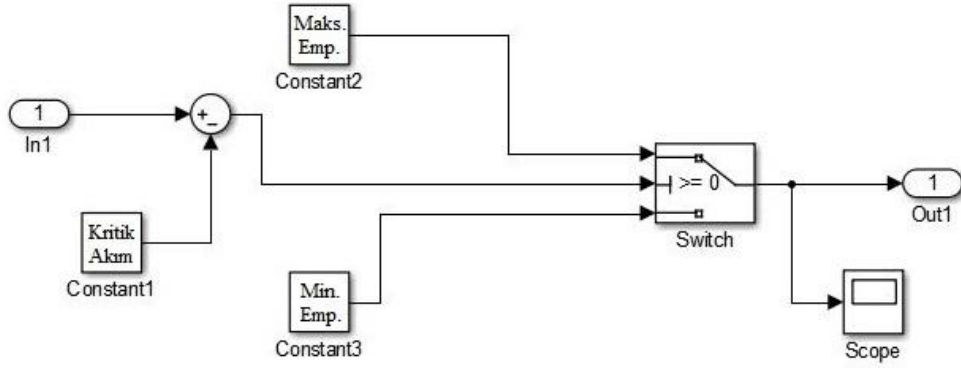
Son yıllarda, elektrik enerjisi kullanımındaki artış güç sistemlerinin giderek büyümesine ve dolayısıyla arıza sayılarının artmasına neden olmaktadır. Genellikle yüksek genlikli olan arıza akımlarını ortadan kaldırmak mümkün olmadığından, sistem üzerindeki zararlı etkilerini azaltmak için çeşitli arıza akımı sınırlandırma yöntemleri geliştirilmiştir. SFCL, yüksek gerilim sistemlerinde arıza akımının genliğini azaltmak için kullanılan yenilikçi koruma elemanlarından biridir. Bu tez çalışmasında rezistif SFCL, arıza akımlarının genliklerini sınırlandırmak amacıyla MATLAB-Simulink’de modellenmiştir ve sistem içinde meydana gelen arızalardaki sınırlama işlemi dalga şekilleri ile gösterilmiştir.

4.1. SFCL’nin Modellenmesi

Rezistif SFCL’nin modellenmesi için 3. Bölüm’de anlatılan çalışma prensibinden yararlanılmıştır. Normal işletme sırasında sistemde, SFCL yaklaşık olarak sıfır gerilim düşümü ve sıfır kayıpla yani sistem üzerinde etkisi olmadan, aynı zamanda nominal işletme akımında herhangi bir sınırlandırma yapmadan bulunmaktadır. Sistemin herhangi bir noktasında arıza meydana geldiği anda ise arıza akımının genliği SFCL’de kullanılan süperiletken malzemenin karakteristiğine özgü kritik akım değerini aştığında, SFCL artan direnç göstererek arıza akımını sınırlanmış olacaktır. Oluşturulan rezistif SFCL modelinde sistem akımının efektif değeri her an süperiletken malzemenin kritik akım değeriyle karşılaştırılır. Normal durumda kritik akım aşılmadığından SFCL tarafından minimum empedans gösterilir. Arıza durumunda sistemden akan akım, kritik akımı aştığı anda süperiletken malzeme de faz değişimi olur ve bunun sonucunda direnci yükselir. Modelde bu direnç değeri maksimum empedans olarak belirtilmiştir. Arıza sona erdiğinde SFCL’deki süperiletken malzeme LN₂ kullanılan soğutma sistemi ile hızlı bir şekilde soğutulup tekrar süperiletkenlik bölgesine geçer ve minimum empedans gösterir. Şekil 4.1’de tek faz rezistif SFCL Simulink modeli gösterilirken, Şekil 4.2’de rezistif SFCL Simulink alt sistemi gösterilmiştir.



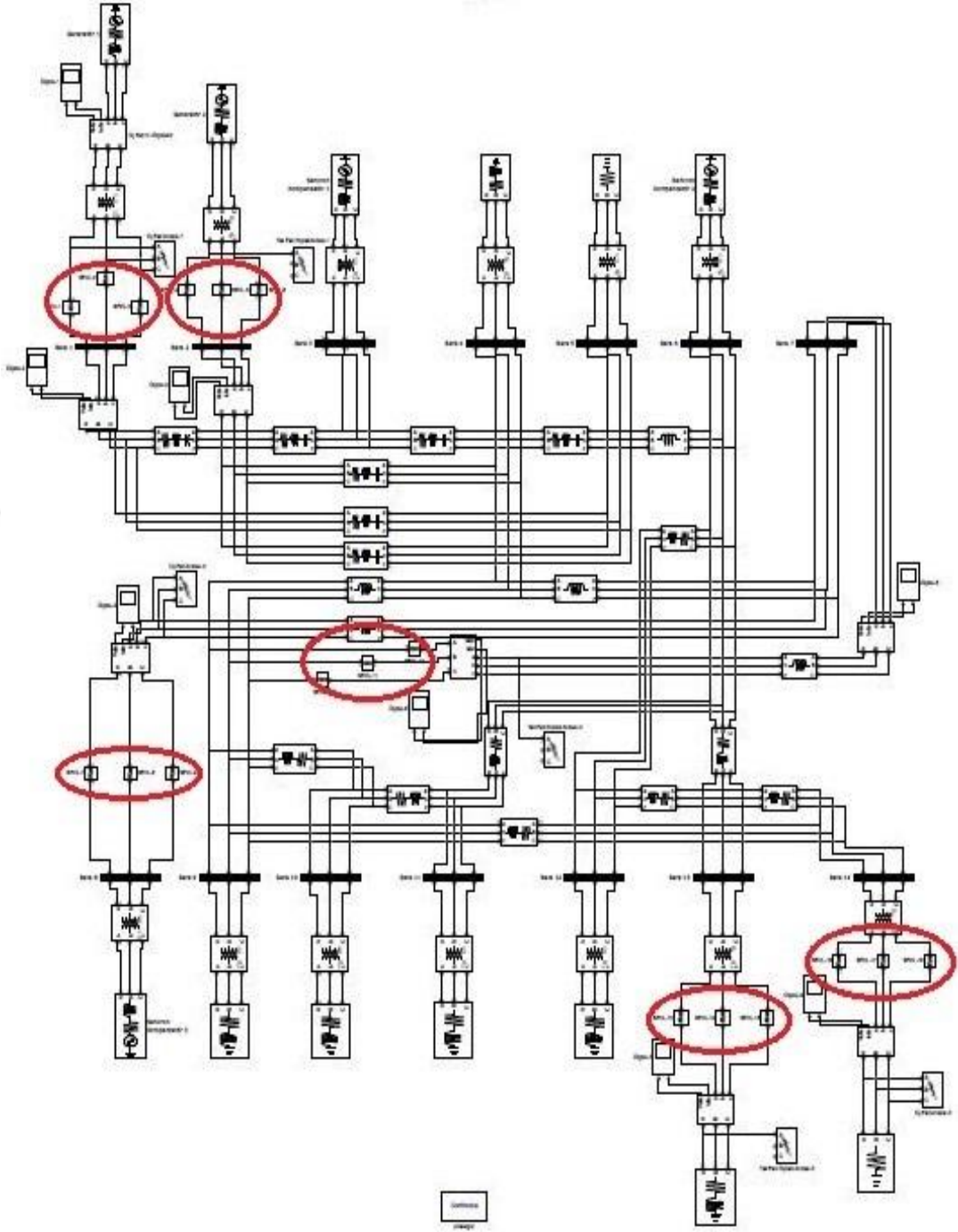
Şekil 4.1. Rezistif SFCL Simulink modeli



Şekil 4.2. Rezistif SFCL Simulink alt sistemi

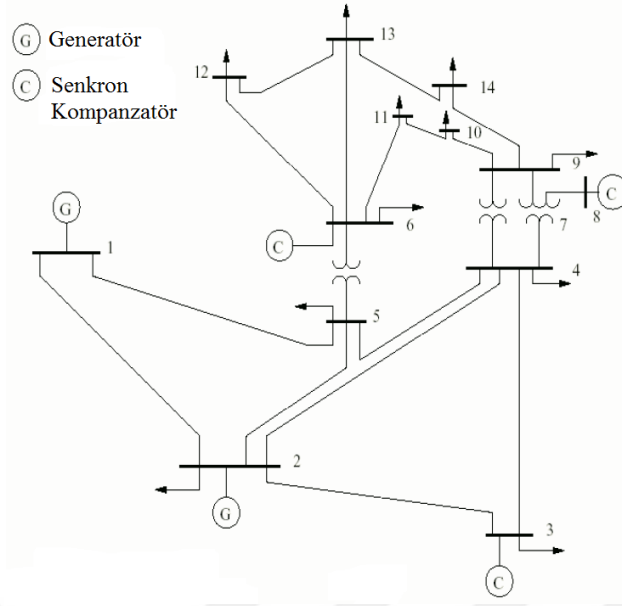
4.2. Uygulama

Rezistif SFCL'nin uygulanacağı güç sistemi olarak IEEE 14 baralı sistem seçilmiş ve MATLAB-Simulink SimPowerSystem ile modellenmiştir. Terminal gerilimleri 14.4 kV olan farklı güçlerdeki generatörlerin çıkışlarına, 14.4 kV/154 kV yükseltici transformatörler yerleştirilmiştir. 154 kV'luk iletim sistemlerinin sonuna da farklı güçlerde yükler ve bu yükler için 154 kV/14.4 kV düşürücü transformatörler yerleştirilmiştir. Modellenen sistemde; baralarda, iletim sisteminde ve yüklerde üç faz arızası ve tek faz-toprak arızası oluşturulmuş ve bu arızalarda akım sınırlayıcı olarak rezistif SFCL ve CLR kullanılmıştır. Şekil 4.3'de MATLAB-Simulink'de modellenen 14 baralı sistem gösterilmiştir. Bu şekilde kırmızı daireler rezistif SFCL'nin ve CLR'nin bulunduğu yerleri göstermektedir.



Şekil 4.3. IEEE 14 baralı sistem

Modellenen IEEE 14 baralı sistemin tek hat şeması Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

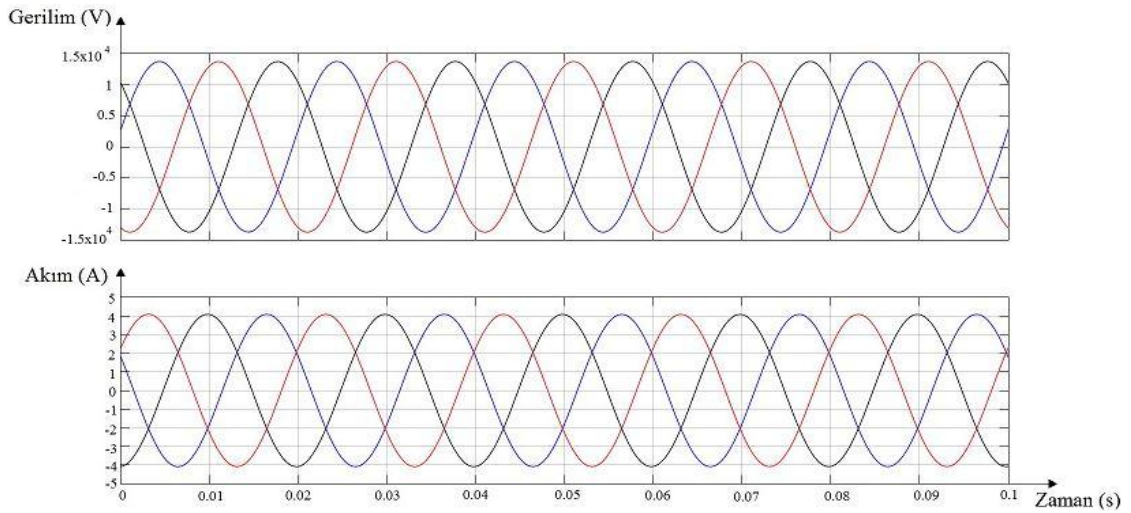


Şekil 4.4. IEEE 14 baralı sistemin tek hat şeması [71]

4.2.1. Yükte Arıza Durumu

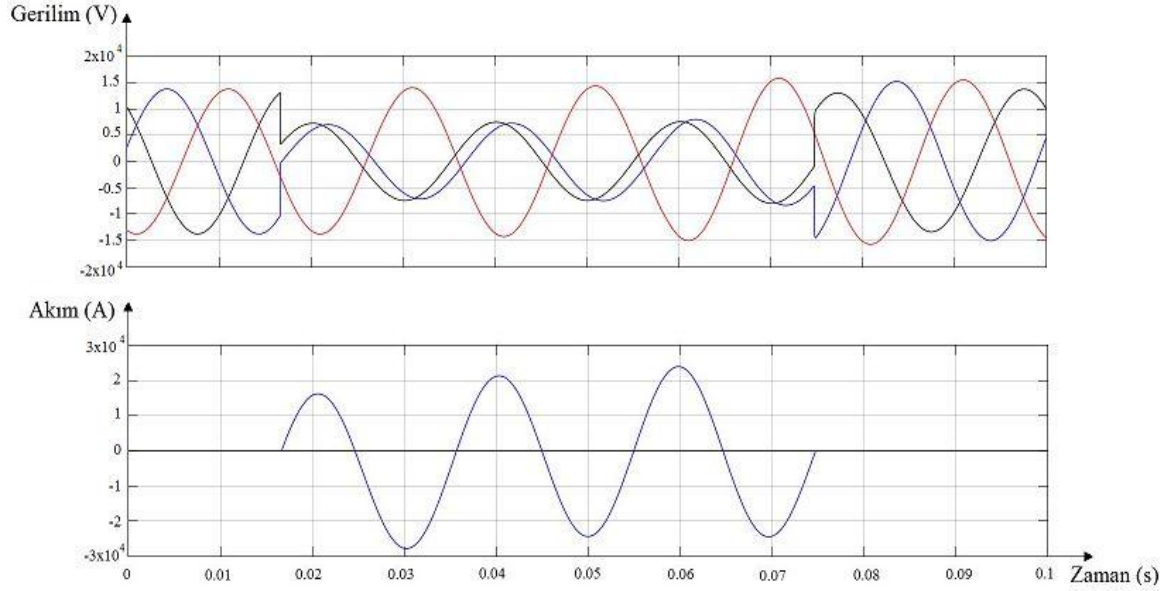
Tek Faz-Toprak Arızası

14 baralı sistemde elde edilen tüm dalga şekillerinde A fazı mavi çizgiyle, B fazı kırmızı çizgiyle ve C fazı da siyah çizgiyle gösterilmiştir. Arızalar 0.016 ile 0.074 saniyeleri arasında gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir arıza meydana gelmeden önce yani normal işletme durumundaki yük gerilimi ve akımı Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



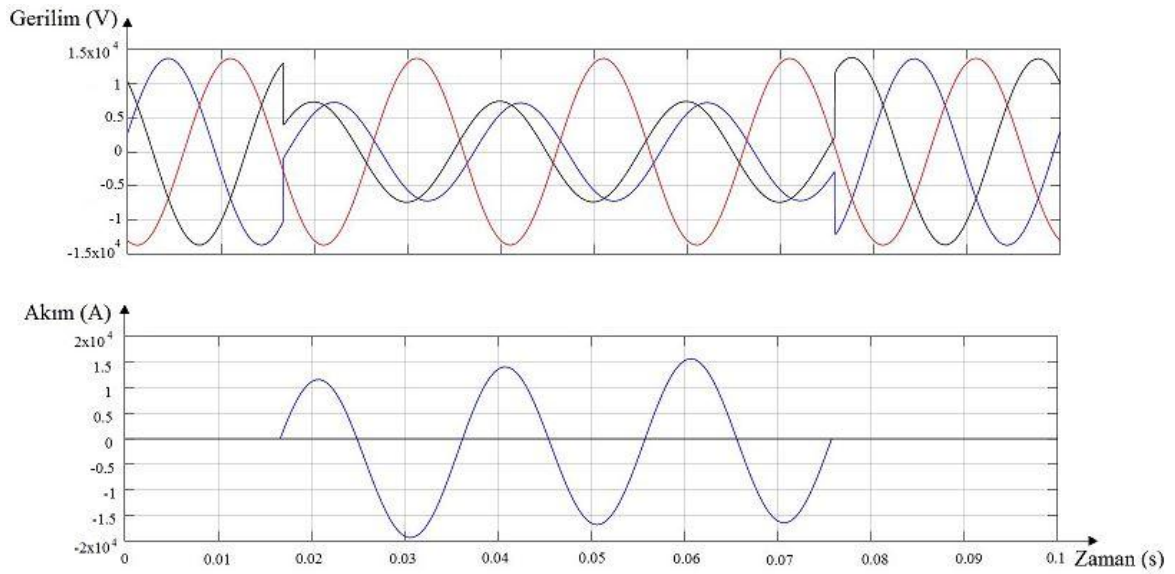
Şekil 4.5. Yükün arızasız durumdaki gerilimi ve akımı

Sistemde herhangi bir FCL olmadığı zaman yükte tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde, yük gerilimi ve akımı Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



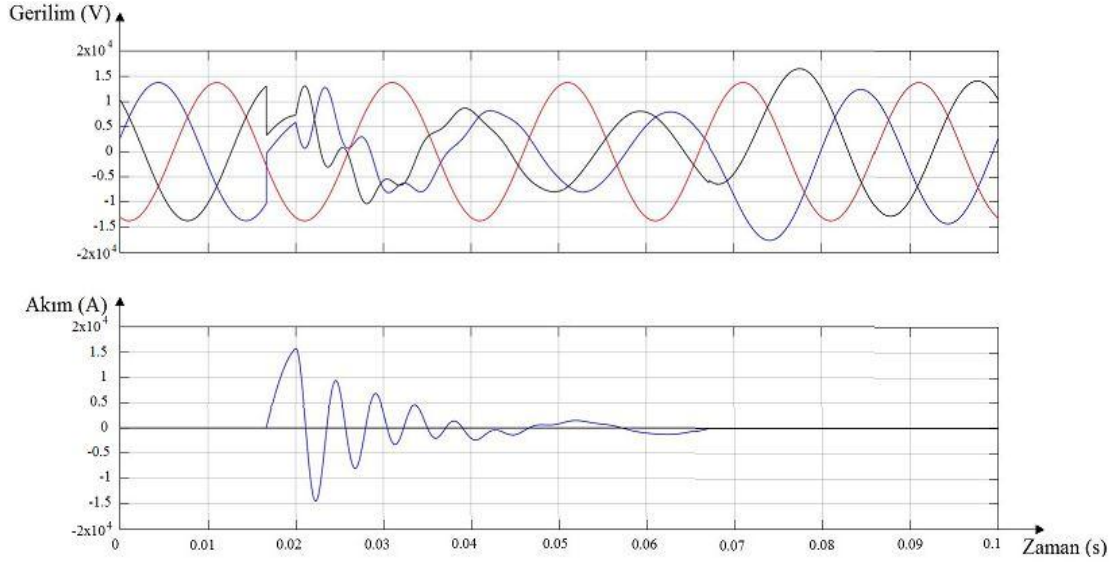
Şekil 4.6. Yükte FCL olmadığı durumda tek faz-toprak arızası

Sistemde CLR varken, yükte tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde yük gerilimi ve akımı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Yükte CLR’li durumda tek faz-toprak arızası

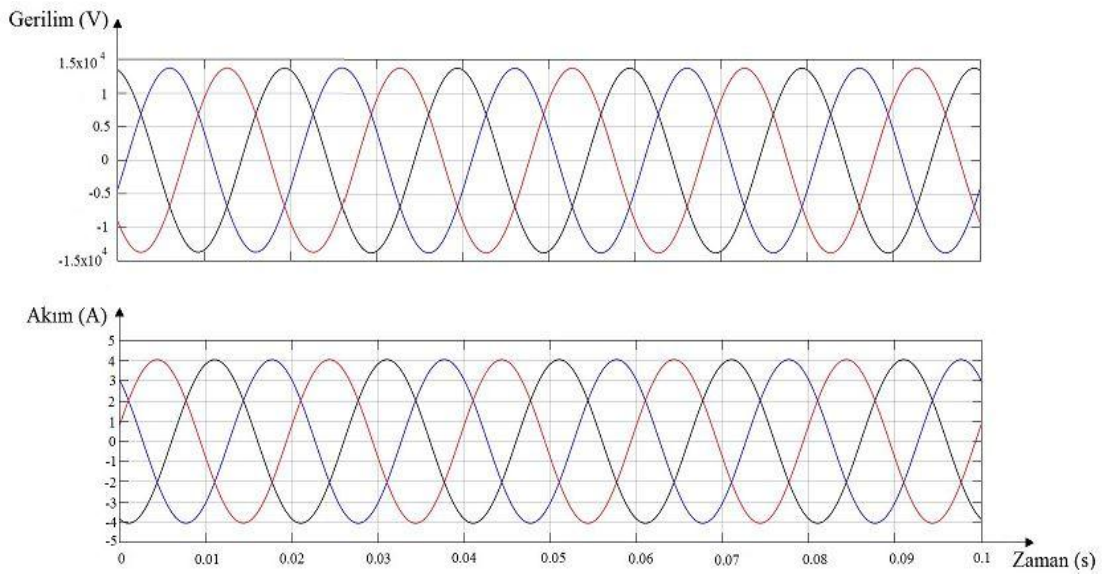
Sistemde SFCL varken, yükte tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde yük gerilimi ve akımı Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Yükte SFCL’li durumda tek faz-toprak arızası

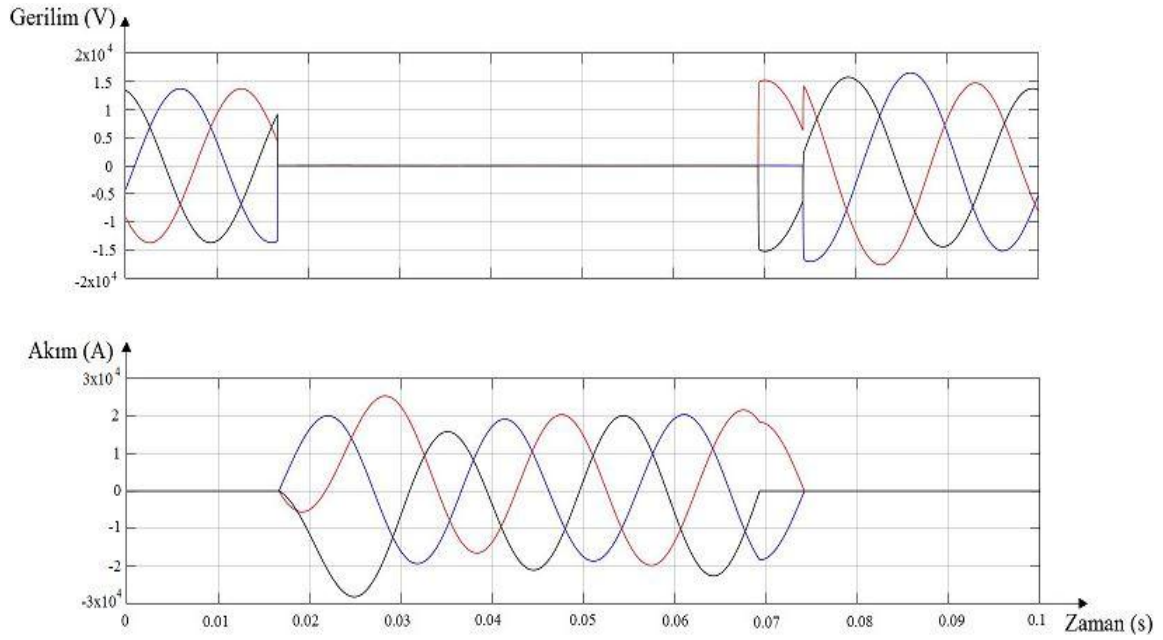
Üç Faz Arızası

Herhangi bir arıza meydana gelmeden önce yani normal işletme durumundaki yük gerilimi ve akımı Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



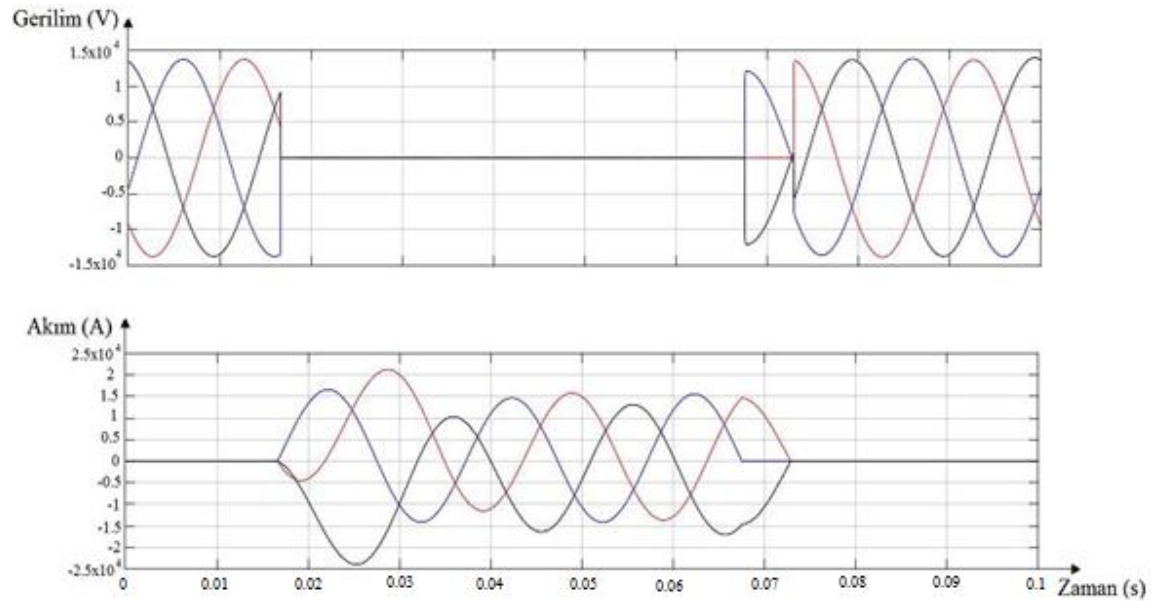
Şekil 4.9. Yükün arızasız durumundaki gerilimi ve akımı

Sistemde herhangi bir FCL olmadığı zaman, yükte üç faz arızası meydana geldiğinde, yük gerilimi ve akımı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



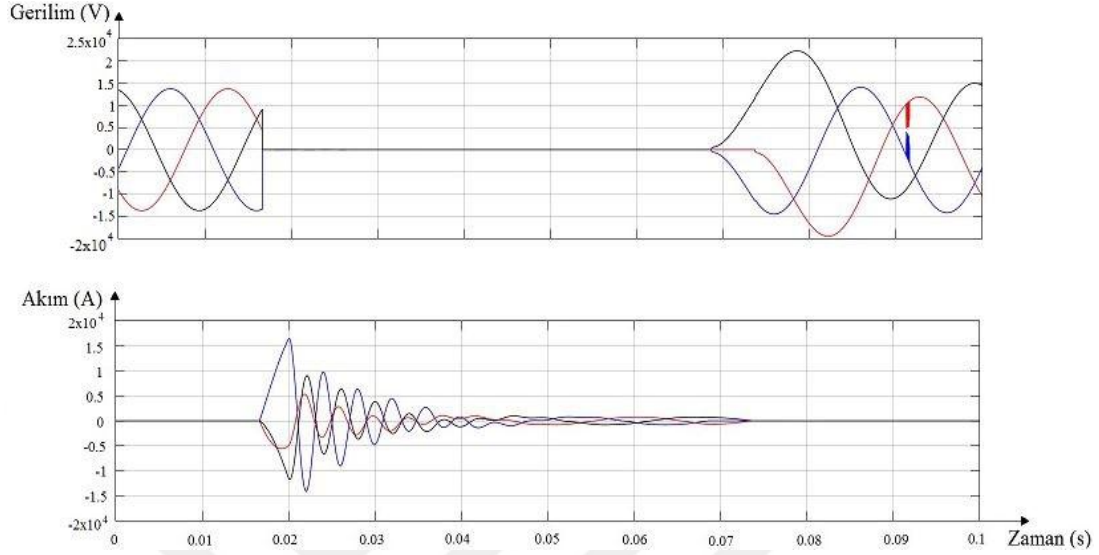
Şekil 4.10. Yükte FCL olmadığı durumda üç faz arızası

Sistemde CLR bulunduğu takdirde, yükte üç faz arızası meydana geldiğinde, yük gerilimi ve akımı Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Yükte CLR'li durumda üç faz arızası

Sistemde SFCL bulunduğu takdirde, yükte üç faz arızası meydana geldiğinde, yük gerilimi ve akımı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

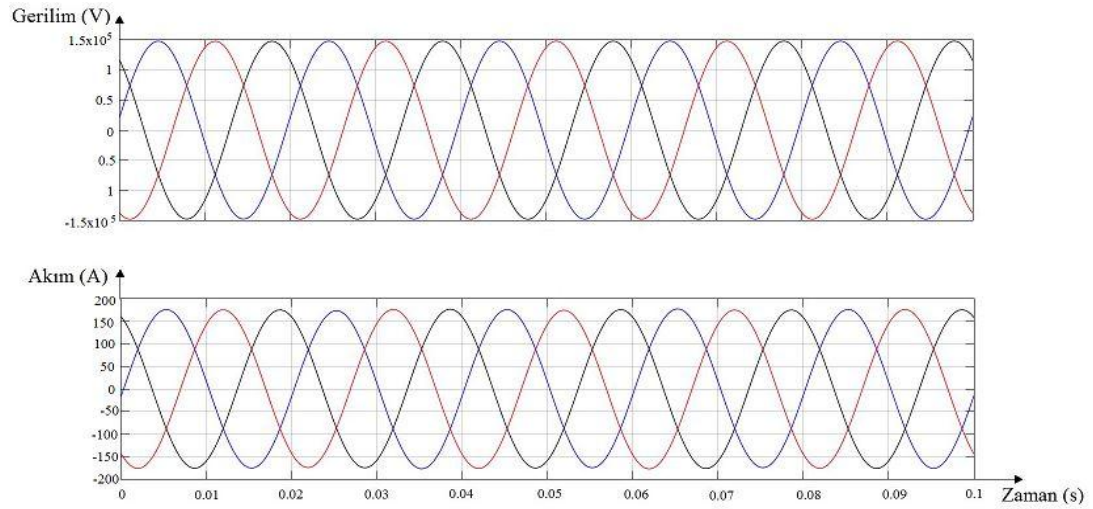


Şekil 4.12. Yükte SFCL’li durumda üç faz arızası

4.2.2. Barada Arıza Durumu

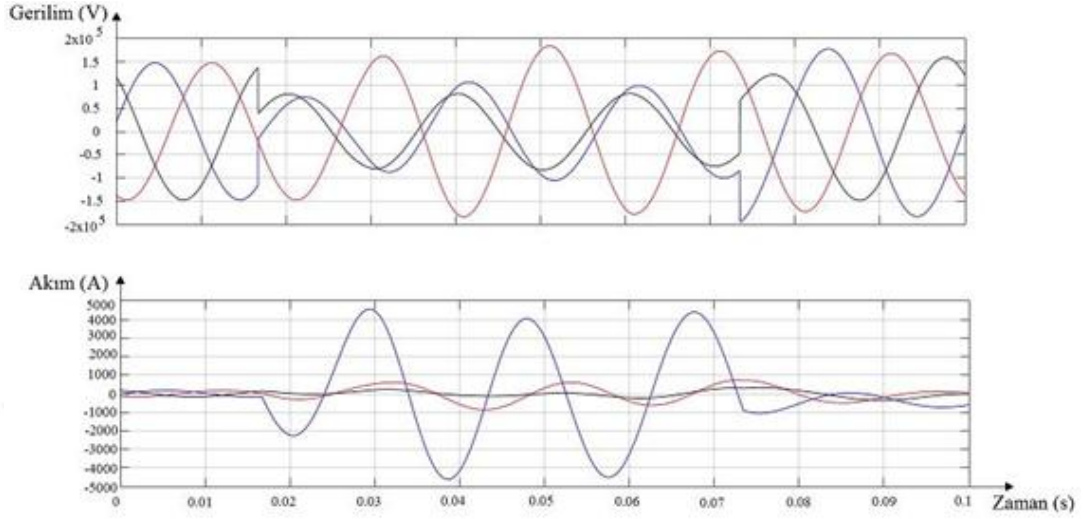
Tek Faz-Toprak Arızası

Herhangi bir arıza meydana gelmeden önce baranın gerilimi ve akımı Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



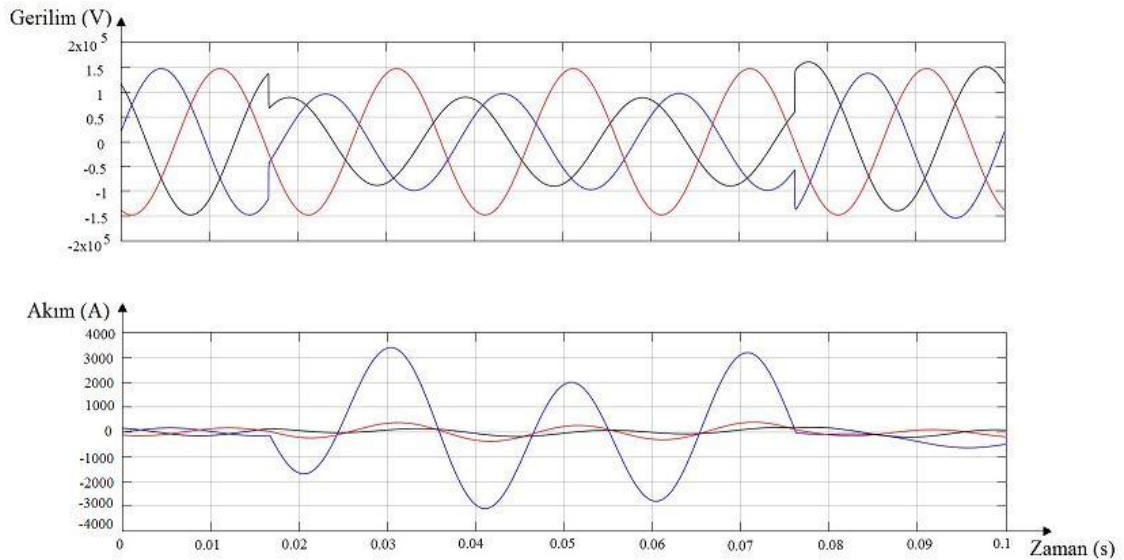
Şekil 4.13. Baranın arızasız durumdaki gerilimi ve akımı

Sistemde herhangi bir FCL yokken, barada tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde bara gerilimi ve akımı Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



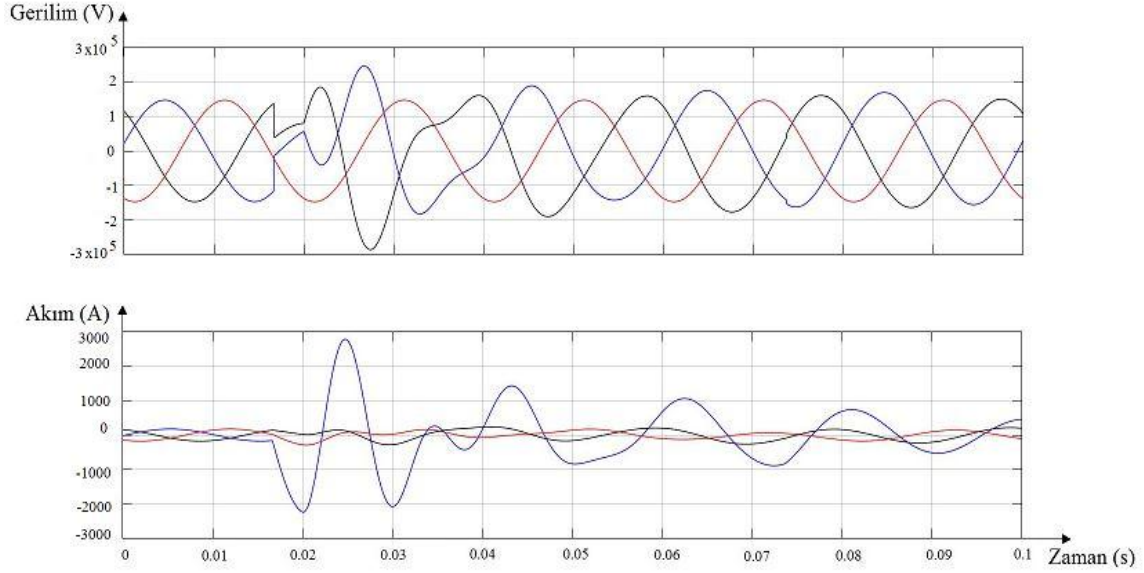
Şekil 4.14. Barada FCL olmadığı durumda tek faz-toprak arızası

Sistemde CLR varken, barada tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde, bara gerilimi ve akımı Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Barada CLR’li durumda tek faz-toprak arızası

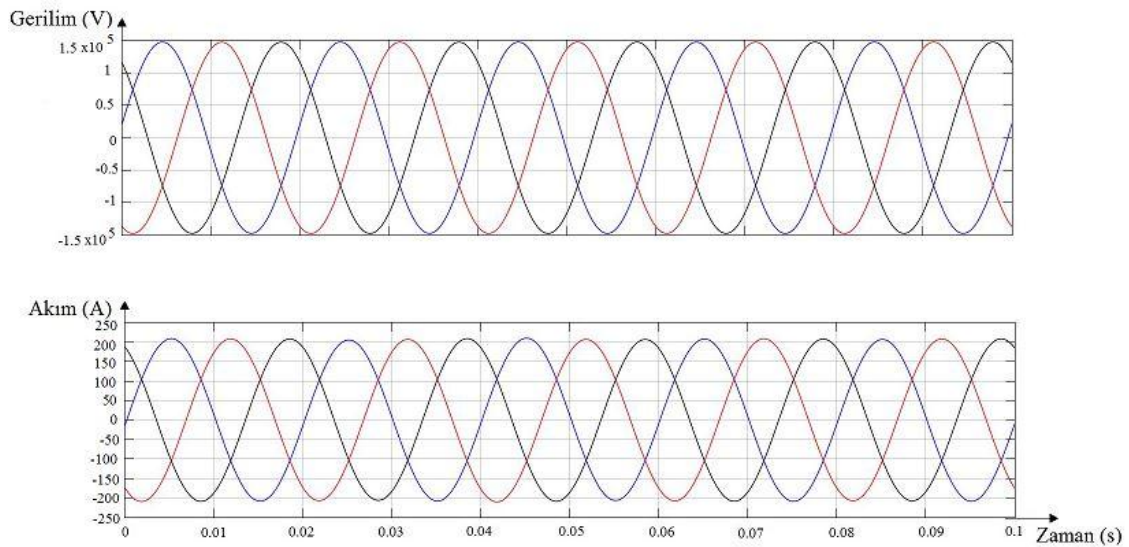
Sistemde SFCL varken, barada tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde, bara gerilimi ve akımı Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Barada SFCL'li durumda tek faz-toprak arızası

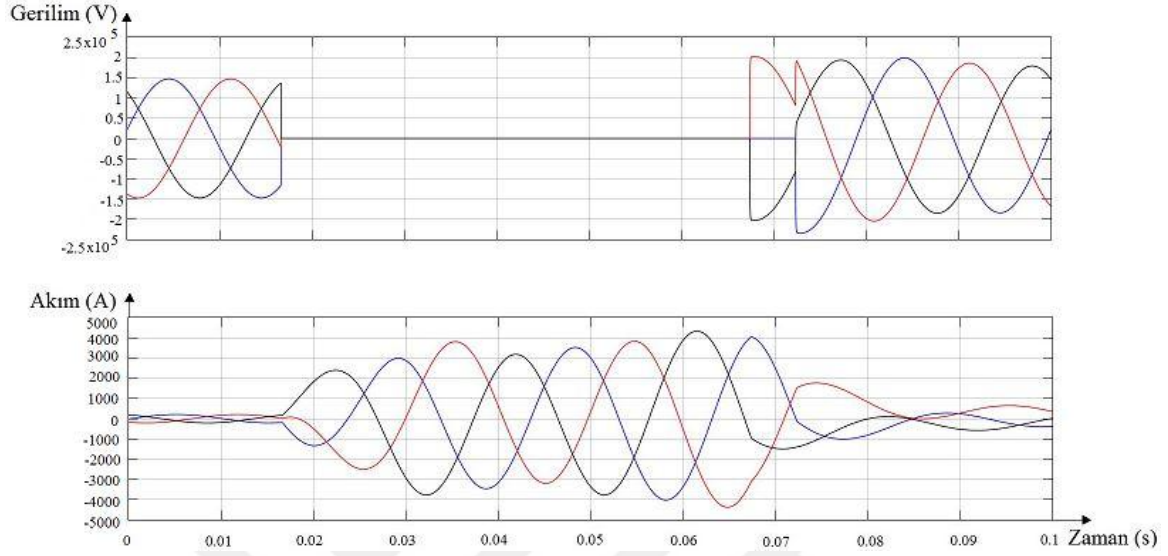
Üç Faz Arızası

Herhangi bir arıza meydana gelmeden önce bara gerilimi ve akımı Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



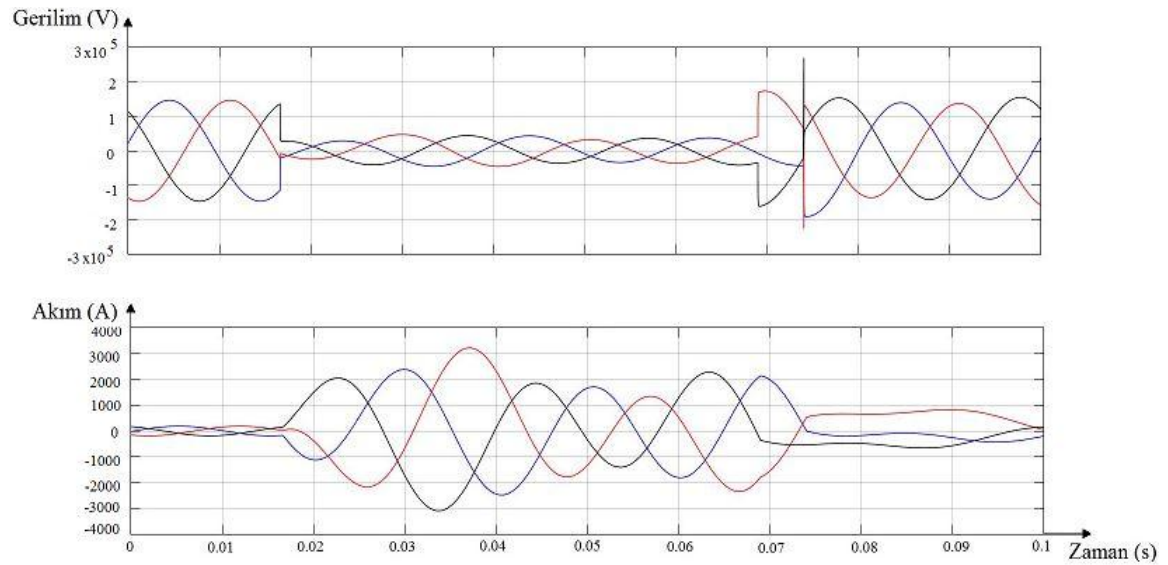
Şekil 4.17. Baranın arızasız durumdaki gerilimi ve akımı

Sistemde herhangi bir FCL olmadığı zaman, barada üç faz arızası meydana geldiğinde bara gerilimi ve akımındaki değişim Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



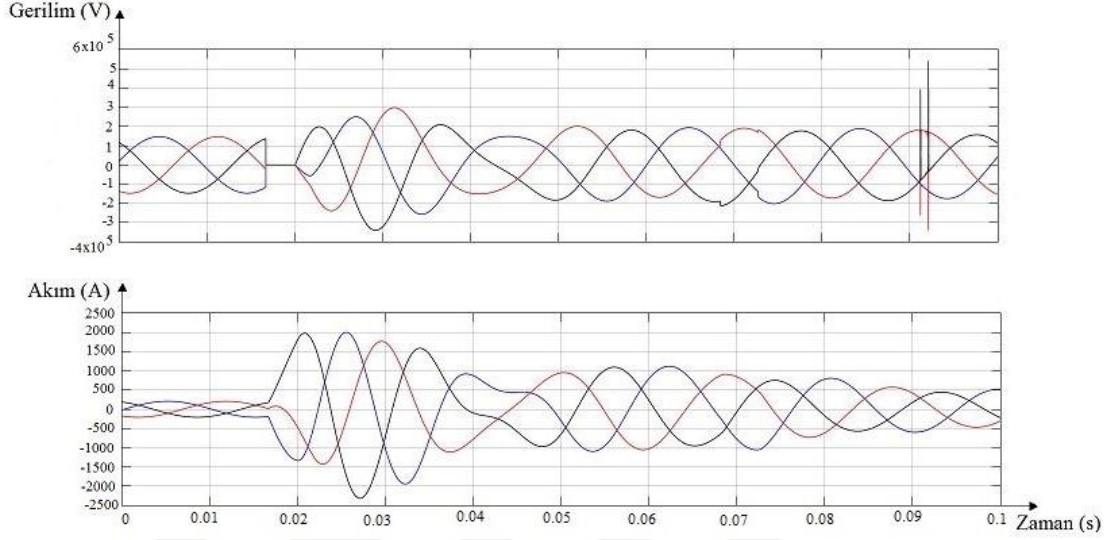
Şekil 4.18. Barada FCL olmadığı durumda üç faz arızası

Sistemde CLR varken, barada üç faz arızası meydana geldiğinde, bara gerilimi ve akımını Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Barada CLR'li durumda üç faz arızası

Sistemde SFCL varken, barada üç faz arızası meydana geldiğinde, bara gerilimi ve akımı Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

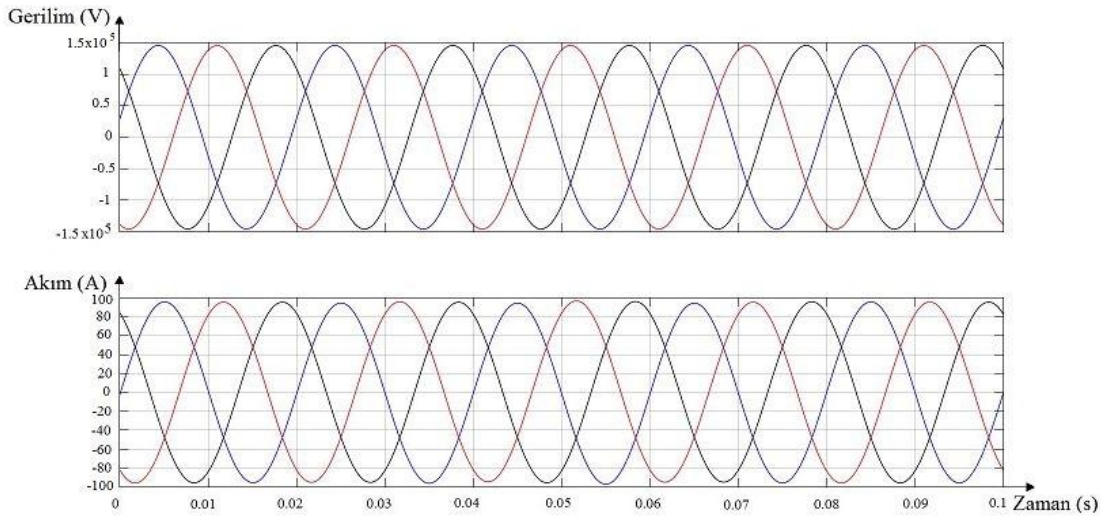


Şekil 4.20. Barada SFCL’li durumda üç faz arızası

4.2.3. İletim Hattında Arıza Durumu

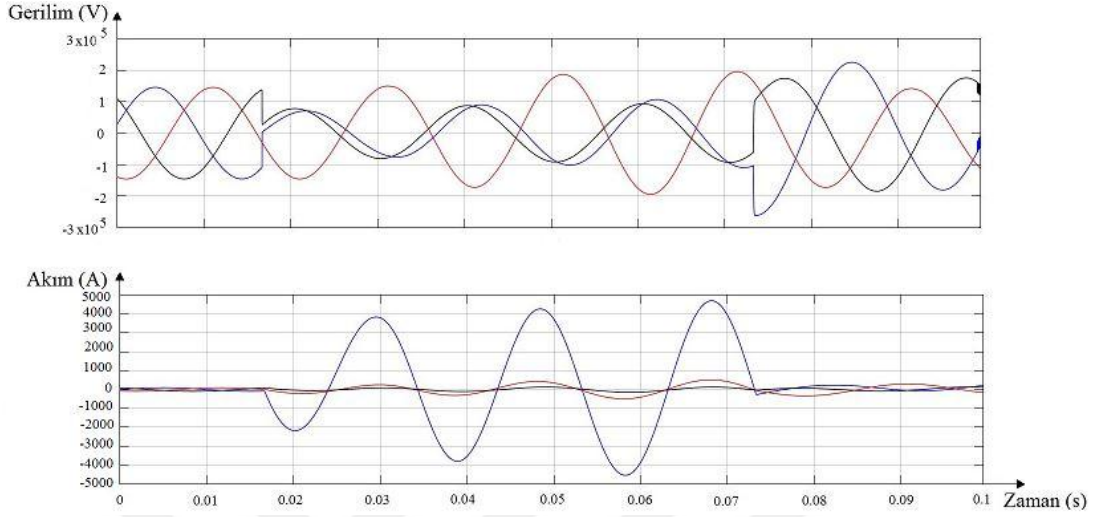
Tek Faz-Toprak Arızası

Herhangi bir arıza meydana gelmeden önce iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



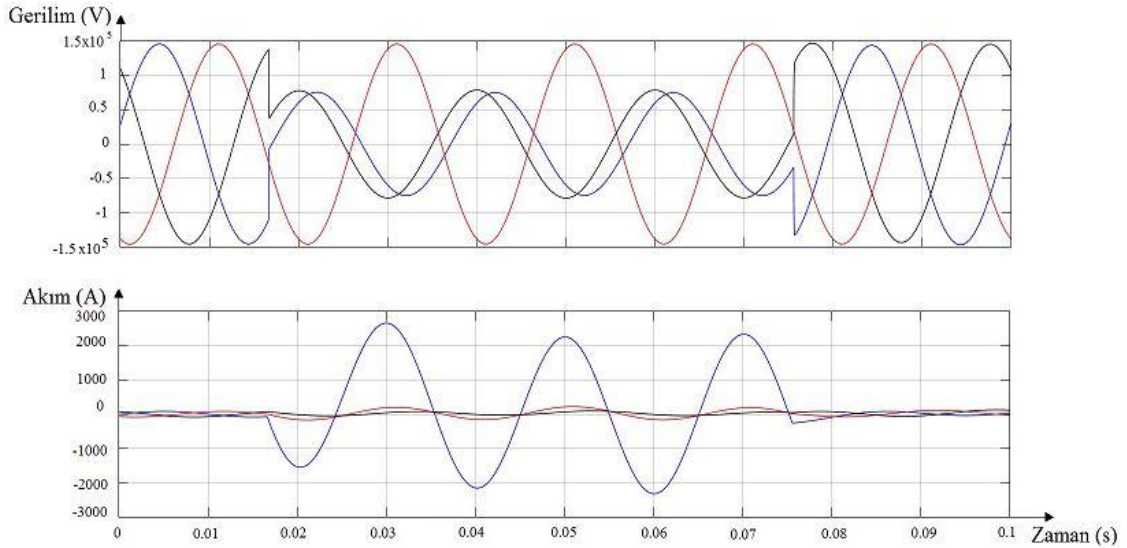
Şekil 4.21. İletim hattının arızasız durumdaki gerilimi ve akımı

Sistemde herhangi bir FCL olmadığı zaman, iletim hattında tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde, iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



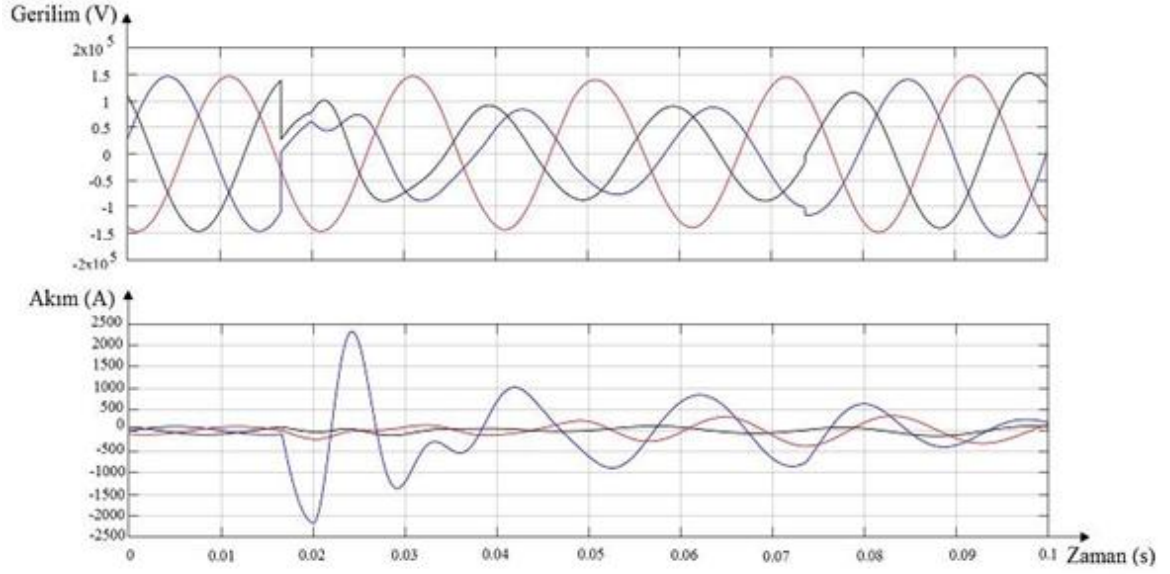
Şekil 4.22. İletim hattında FCL olmadığı durumda tek faz-toprak arızası

Sistemde CLR varken, iletim hattında tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde, iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. İletim hattında CLR'li durumda tek faz-toprak arızası

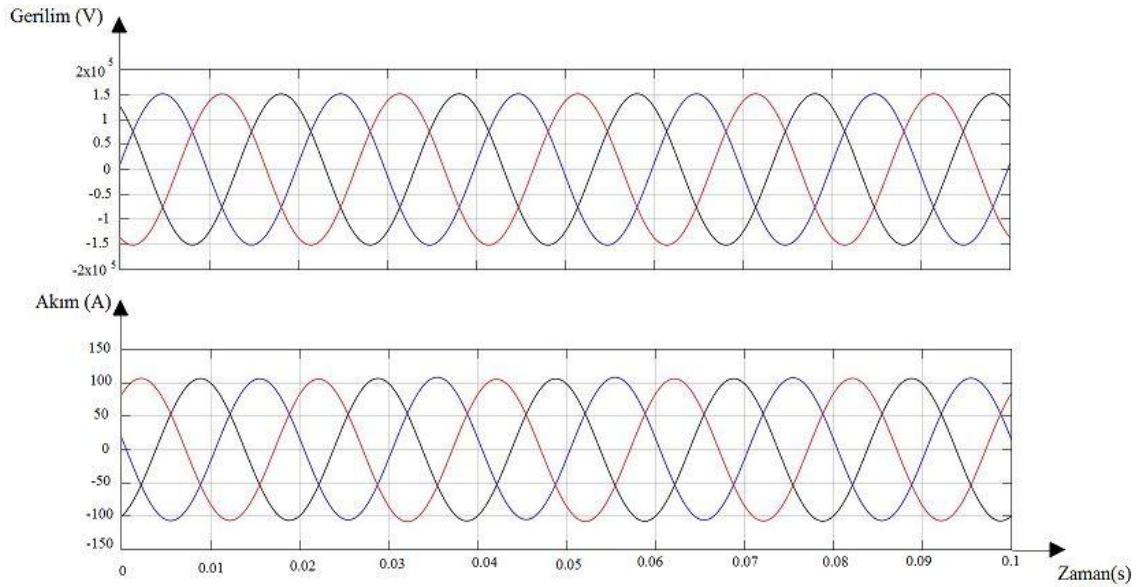
Sistemde SFCL varken, iletim hattında tek faz-toprak arızası meydana geldiğinde, iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. İletim hattında SFCL’li durumda tek faz-toprak arızası

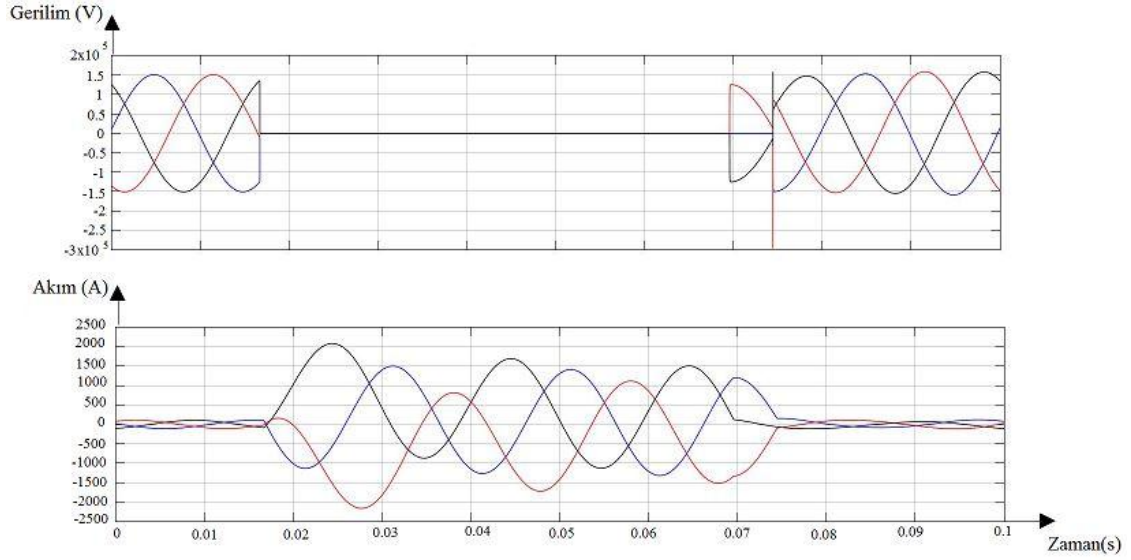
Üç Faz Arızası

Herhangi bir arıza meydana gelmeden önce iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.25’de gösterilmiştir.



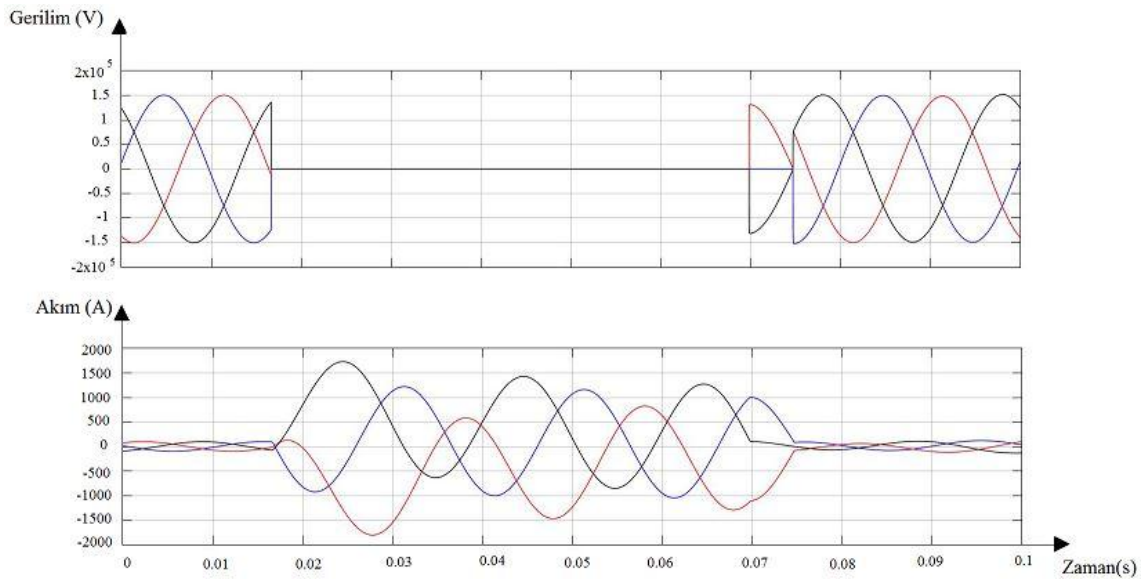
Şekil 4.25. İletim hattının arızasız durumdaki gerilimi ve akımı

Sistemde herhangi bir FCL olmadığı zaman, iletim hattında üç faz arızası meydana geldiğinde, iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



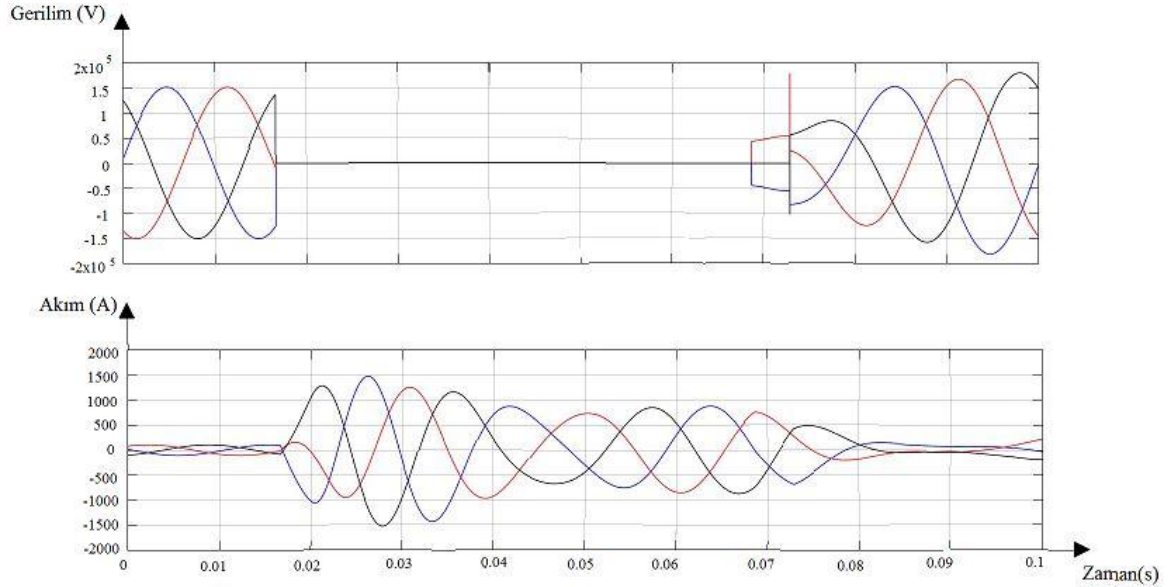
Şekil 4.26. İletim hattında FCL olmadığı durumda üç faz arızası

Sistemde CLR varken, iletim hattında üç faz arızası meydana geldiğinde, iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. İletim hattında CLR'li durumda üç faz arızası

Sistemde SFCL varken, iletim hattında üç faz arızası meydana geldiğinde, iletim hattının gerilimi ve akımı Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. İletim hattında SFCL’li durumda üç faz arızası

4.3. Sonuçlar ve Yorumlar

MATLAB-Simulink’de yapılan simülasyonlarda öncelikle arızasız durumdaki gerilim ve akım dalga şekilleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen arıza sonucundaki dalga şekilleri önce sistemde FCL kullanılmadığında, daha sonra ise CLR ve SFCL kullanıldığında olmak üzere üç farklı şekilde gözlemlenmiştir. Sistemde arıza meydana geldiğinde FCL’siz ve SFCL’li durumlar arasında belirgin farklar bulunmaktadır. CLR arızasız durumda da sürekli olarak devrede olup sistem empedansını arttırdığı için gerilim düşümlerine ve kayıplara yol açmaktadır. Bu sebeple arıza olmadan önce sistemin nominal akım değeri CLR’li durumda SFCL’li duruma göre daha düşüktür. Bu olumsuz durumlar SFCL’de görülmemektedir. Çünkü arızasız durumda kritik akım değeri aşılmadığından, SFCL ihmal edilebilir bir direnç göstermektedir. Arızalı durumda CLR arıza akımlarının tepe değerlerini azaltmaktadır, ancak dalga şekillerinden görüldüğü gibi, SFCL’nin yaptığı gibi etkili bir sınırlandırma özelliği gösterememektedir. Sistemde SFCL olmadığı zaman yani FCL’siz ve CLR’li durumlarda meydana gelen arızalarda arıza akımının genlikleri yüksek ve hemen hemen arıza temizleninceye kadar aynı seviyelerde olmasına rağmen,

sistemde SFCL bulunduğu zaman arıza akımlarının tepe değerleri ilk periyot içerisinde önemli ölçüde azalmaktadır. Ayrıca arıza temizleninceye kadar akımın genliği giderek azalmaktadır. Bu durum güç sistemi kesicileri için avantaj olmakla beraber en önemlisi arıza akımının sistemi ve sistem elemanları üzerindeki zararlı etkileri azaltılmaktadır.

Yükte meydana gelen tek faz-toprak arızasında FCL'siz ve SFCL'li durumda arıza akımlarının ilk tepe değerleri arasındaki fark Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Yük için tek faz-toprak arızası tepe değer karşılaştırması

Arıza Tipi	Arızalı Faz	Arıza Akımının İlk Tepe Değeri (kA)		
		FCL'siz	CLR'li	SFCL'li
Tek Faz-Toprak	A	16.5	11.9	15.4

Yükte meydana gelen üç faz arızasında FCL'siz ve SFCL'li durumda arıza akımlarının ilk tepe değerleri arasındaki fark Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Yük için üç faz arızası tepe değer karşılaştırması

Arıza Tipi	Arızalı Faz	Arıza Akımının İlk Tepe Değeri (kA)		
		FCL'siz	CLR'li	SFCL'li
Üç Faz	A	20	16.3	16.7
	B	25	21	5.6
	C	28.7	24.8	12.1

Barada meydana gelen tek faz-toprak arızasında FCL'siz ve SFCL'li durumda arıza akımının ilk tepe değeri arasındaki fark Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Bara için tek faz-toprak arızası tepe değer karşılaştırması

Arıza Tipi	Arızalı Faz	Arıza Akımının İlk Tepe Değeri (A)		
		FCL'siz	CLR'li	SFCL'li
Tek Faz-Toprak	A	2260	1832	2238

Bu arızada, akımların ilk tepe değerleri arasındaki azalma miktarı düşük olsa da arıza akımının ikinci tepe değeri FCL'siz durumda 4550 A'e yakın iken, SFCL'li durumda yaklaşık olarak 2790 A'dir. Sınırlama işlemi yine arıza akımının ilk yarım periyodu içerisinde başlamıştır. İkinci tepe değerini geçtikten sonra arıza akımının genliği arıza temizleninceye kadar azalarak devam etmiştir.

Barada meydana gelen üç faz arızasında FCL'siz ve SFCL'li durumda arıza akımlarının ilk tepe değerleri arasındaki fark Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Bara için üç faz arızası tepe değer karşılaştırması

Arıza Tipi	Arızalı Faz	Arıza Akımının İlk Tepe Değeri (A)		
		FCL'siz	CLR'li	SFCL'li
Üç Faz	A	1415	1050	1378
	B	2500	2169	1496
	C	2470	2000	2000

İletim hattında meydana gelen tek faz-toprak arızasında FCL'siz ve SFCL'li durumda arıza akımının ilk tepe değeri arasındaki fark Tablo 4.5'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5. İletim hattı için tek faz-toprak arızası tepe değer karşılaştırması

Arıza Tipi	Arızalı Faz	Arıza Akımının İlk Tepe Değeri (A)		
		FCL'siz	CLR'li	SFCL'li
Tek Faz-Toprak	A	2240	1592	2217

Bu arızada da, akımların ilk tepe değerleri arasındaki azalma miktarı düşük olsa da arıza akımının ikinci tepe değeri FCL'siz durumda 3885 A'e yakın iken, SFCL'li durumda yaklaşık olarak 2350 A'dir. Sınırlama işlemi yine arıza akımının ilk yarım periyodu içerisinde başlamıştır. İkinci tepe değerini geçtikten sonra arıza akımının genliği arıza temizleninceye kadar azalarak devam etmiştir.

İletim hattında meydana gelen üç faz arızasında FCL'siz ve SFCL'li durumda arıza akımlarının ilk tepe değerleri arasındaki fark Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. İletim hattı için üç faz arızası tepe değer karşılaştırması

Arıza Tipi	Arızalı Faz	Arıza Akımının İlk Tepe Değeri (A)		
		FCL'siz	CLR'li	SFCL'li
Üç Faz	A	1185	984	1124
	B	2200	1765	976
	C	2140	1733	1265

Tablolarda görüldüğü gibi SFCL, arıza akımlarının ilk tepe değerlerini azaltmakta ve ilk yarım periyot içerisinde sınırlama işlemini gerçekleştirmektedir. Bazı durumlarda CLR, arıza akımının ilk tepe değerini SFCL'den daha fazla azaltmasına rağmen, bu sınırlandırma işlemini arıza süresi boyunca giderek artan bir şekilde yapamadığından, arıza akımının zararlı etkileri arıza temizleninceye kadar görülmektedir. Şebekemizdeki kesicilerin arıza meydana geldikten sonra ilk yarım periyot içerisinde devreyi açması mekaniksel olarak mümkün değildir. Çünkü kesicilerin arıza akımını kesmeleri için gereken süre 5-15 periyottan fazladır [72]. Bunun sonucunda kesici kontakları yüksek genlikli arıza akımlarına maruz kalacaktır ancak yine de kesme görevini kusursuzca yerine getirmek zorundadır. SFCL kullanımı ile birlikte ilk yarım periyot içerisinde sınırlama işlemi gerçekleşeceğinden, kesiciler için kesme olayının zorlayıcı etkileri azalmış olacaktır. Böylece güç sisteminde SFCL uygulamaları ile daha düşük kesme akımı yeteneklerine sahip kesiciler kullanılabilir duruma gelmektedir. Sonuç olarak SFCL'siz duruma göre SFCL'li durumda kesiciler için ve en önemlisi sistem açısından arıza akımının zorlayıcı termal ve dinamik etkileri en aza inmektedir.

5. SONUÇLAR

Günümüzde giderek artan enerji tüketimini karşılamak amacıyla güç sistemlerinin sürekli büyümesi, arıza akımlarının seviyelerinin artmasına sebep olmakta ve bu durum sistemin işletilmesi açısından önemli sorunlar oluşturmaktadır. Arıza akımı seviyelerinin mevcut kesme cihazlarının yeteneklerini yakın zamanda aşacak olması bu sorunlardan biridir. Sistemdeki mevcut elemanları, yenileriyle değiştirmenin ekonomik külfetleri sebebiyle, arıza akımı seviyelerinin azaltılması bu soruna uygun bir çözüm olacaktır. Büyük arıza akımlarının termal ve dinamik etkileri sistem elemanlarına ciddi hasarlar verebilir. Bu nedenle sistemdeki arıza akımı kısa sürede ortadan kaldırılmalıdır. Kesiciler, arıza akımını hızlı bir şekilde kesmeye çalışırlarsa daha büyük akımlarla karşılaşacaklardır. Bu nedenle çok kısa sürelerde açma işlemi yapamazlar ve genellikle 90-160 ms boyunca arıza akımı sistemden akar. Bu süre zarfında sistem elemanları için tehlike devam edecektir. Bu olumsuz durumların önüne geçmek için arıza akımlarının seviyeleri çok kısa sürelerde sistem için tehlike arz etmeyecek seviyelere indirgenmelidir.

Bu amaçla arıza akımının ilk yarım periyodu içerisinde sınırlama işlemi yapan SFCL'ler uygun bir tercih olacaktır. CLR'nin aksine normal işletme durumunda sisteme gerilim düşümü ve güç kaybı gibi herhangi bir olumsuz etkisi olmayan SFCL, sadece arıza durumunda direnç göstererek arıza akımının genliğini sınırlar. Böylece sistem ve sistem elemanları korunur ve kesiciler için kesme işlemi daha az zorlayıcı bir durum alır. Arıza temizlendikten sonra özel soğutma sistemi ile tekrar süperiletkenlik durumuna geçiş sağlanır ve direnç değeri tekrar ihmal edilebilecek kadar küçük bir değer alır.

Yüksek yatırım maliyetleri ve özel soğutma sistemi dışında yaklaşık olarak güç transformatörleri kadar yer kaplayan SFCL'nin Türkiye Elektrik Enerjisi İletim Sistemi'nde kullanılması, ülkemizin şebekesini arızalara karşı daha kararlı ve dayanıklı duruma getirecektir. Böylece kesintiler olmaksızın enerji sürekliliği sağlanarak tüketiciye herhangi bir sorun aksettirmeden arızalar ortadan kaldırılmış olacaktır. Önümüzdeki yıllarda süperiletken teknolojisinin giderek gelişmesi ve artan talep ile birlikte seri üretime geçilmesi ilk yatırım maliyetini düşürerek SFCL uygulamalarını daha yaygın hale getirecektir. Şebekemizde uygulamaları mevcut ve en iyi bilinen arıza akımı sınırlandırma yöntemi olan CLR ile kıyaslanabilir maliyetlere ulaştıktan sonra, normal işletme sırasında bile kayıplara sebep olan bu yöntem yerine, arızasız durumda sistemde hiçbir olumsuz

tesiri bulunmayan SFCL kullanımı ile gereksiz kayıp ve gerilim düşümü sorunları ortadan kaldırılacaktır. Böylece tüketicinin ödediği işletme kaynaklı kayıp bedelleri azalacaktır. Arıza sırasında akımı çok hızlı bir şekilde sınırlaması gibi birçok avantaja sahip olan SFCL'nin şimdilik en büyük dezavantajları maliyeti ve özel soğutma sisteminin gerekliliğidir. Ayrıca, soğutma sistemindeki herhangi bir aksaklık süperiletkenlik durumuna geçişi sağlayamazsa, SFCL arıza temizlendikten sonra dahi sisteme karşı direnç gösterir. Bunun sonucunda enerji kaybına ve gerilim düşümlerine yol açması gibi kritik sorunlarla da karşılaşılabilir. Ancak, genel açıdan bakıldığında, ilerleyen yıllarda SFCL gibi modern arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinin kullanılmaması durumunda sürekli büyüyen enterkonnekte sistemlerde geleneksel yöntemlerinin arızasız durumdaki etkilerinin meydana getirdiği sorunların üstesinden gelmek giderek zorlaşacaktır.

Sonuç olarak SFCL'nin amacı sistemin ve sistemdeki elemanların güvenliğini sağlamaktır. Arıza akımlarının istenen seviyelere düşürülmesi sistem işletmesinin sürekliliğini ve güvenilirliğini arttırmaktadır. Böylece sistemin kesintiye uğramadan işletmeye devam etmesi ile tüketicilerin enerji ihtiyaçlarının karşılanması sağlanır. Gelişen teknoloji ve artan gereksinimlerle birlikte önümüzdeki yıllarda SFCL uygulamaları hem Dünya'da hem de ülkemizde giderek yaygınlaşacaktır.

KAYNAKLAR

1. Eckroad, S., 2009. Superconducting Fault Current Limiters Technology Watch 2009. 1017793 Technical Update.
2. Roininen, T., Solver, C. E., Nordli, H., Bosma, A., Jonsson, P., Alfredsson, A., ABB Live Tank Circuit Breakers, Application Guide.
3. Seyed, H., Tabei, B., 2012. Appropriate Placement of Fault Current Limiting Reactors in Different HV Substation Arrangements Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4. Akay N., Karacasu Ö., İletim Sistemlerinde Arıza Akımları Kısıtlayıcı Önlemler ve Uygulamaları Hakkında Rapor. Tübitak MAM Enerji Enstitüsü.
5. Hong, H., Su, B., Niu, G. J., Cui, J. B., Tian, B., Li, Q., Wang, L. Z., Wang, Z. H., Zhang, K., Xin, Y., 2014. Design, Fabrication, and Operation of the Cryogenic System for a 220 kV/300 MVA Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, No. 5.
6. Janowski, T., Kozak, S., Malinowski, H., Wojtasiewicz, G., Kucewicz, B. K., Kozak, J., 2002. Properties Comparison of Superconducting Fault Current Limiters with Closed and Open Core.
7. Mohamed F. K., Leigh J., Edward A. Y., Robert G. S., 2015. Comparison of Superconducting Fault Current Limiters against Traditionally Employed Practices in the Management of Fault Levels in the South African National Grid. IEEE/CSC Superconductivity News Forum.
8. Kafarski M., Adamczyk Ł., Kozak S., Kozak J., Majka M., 2012. Influence of Heating of Inductive Superconducting Fault Current Limiter Windings On Current Limiting Performance.
9. Moscrop J., Hopkins S., Development and Performance Analysis of a Saturated Core High Temperature Superconducting Fault Current Limiter.
10. Abbott S. B., Robinson D., Perera S., Darmann F. A., Hawley C. J., 2006. Simulation of HTS Saturable Core-Type FCLs for MV Distribution Systems.
11. Hekmati A., Vakilian M., Fardmanesh M., 2011. Flux-Based Modeling of Inductive Shield-Type High-Temperature Superconducting Fault Current Limiter for Power Networks. IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 4.
12. Dixit M., Kedia S., Kulkarni S., Andrews L., 2013. High Temperature Superconductor Based Fault Current Limiter For Distribution Systems. 22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm.

- 13.** Bocchi M., Rossi V., 2007. Electrical Testing of 1 MVA-Class Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter Prototypes.
- 14.** Mohamed E. A., 2012. Comparison Between Resistive and Inductive Superconducting Fault Current Limiter for Fault Current Limiting. IEEE International Conference on Computer Vision.
- 15.** Kozak S., Janowski T., 2002. Physical and Numerical Models of Superconducting Fault Current Limiters.
- 16.** Belkhiat S., 2012. Modeling and Simulation of Resistive Superconducting Fault-Current Limiters. Article in Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.
- 17.** Fedasyuk D., Serdyuk P., 2006. Simulation of Superconducting Fault Current Limiter Behaviour in Matlab/Femlab/Simulink Environment. Proceedings of the International Conference on Computer Science and Information Technologies, Ukraine.
- 18.** Rai S., Prasad U., Jain V. K., 2015. Application of Superconducting Fault Current Limiters in Smart Grid System. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 7.
- 19.** Mahajan P., Shah P.J., 2015. Designing and Analysis of Power System with SFCL Module. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, ISSN: 2321-8169. Volume: 3, Issue: 2, 78–82.
- 20.** Kovalsky L., 2005. Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems. IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2.
- 21.** Srisophonphan S., 2014. A Combined Operation of Superconducting Fault Current Limiter and Static Var Compensator for Power System Transient Stability Improvement. Proceedings of the International Electrical Engineering Congress.
- 22.** Mansour D. E. A., 2014. Effect of Fault Resistance on the Behavior of Superconducting Fault Current Limiter in Power Systems. IEEE International Conference Power & Energy.
- 23.** Büyüksaraç, H.C., 1992, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, ODTÜ.
- 24.** Alperöz, N., 1987, Elektrik Enerjisi Dağıtımı.
- 25.** Rowley, A. T., 1995. Superconducting fault current limiters. The Institution of Electrical Engineers.
- 26.** Alstom, Air Core Reactor, www.tde.alstom.com.
- 27.** ETSU/DTI, 2001. Likely Changes to Network Design as a Result of Significant Embedded Generation, EA Technology Ltd.

28. Trench, Reactors, www.trenchgroup.com.
29. Amon, J., Fernandez, P. C., Rose, E. H., D'ajuz, A., Castanheira, A., 2005. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation, International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, 215- 220.
30. Geng, Z. X., Lin, X., Xu, J. Y., Tian, C., 2008. Effects of Series Reactor on Short-circuit Current and Transient Recovery Voltage, 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, 524-526.
31. Wanmin, F., Yanli, Z., 2006. A novel IGBT-based Half-controlled Bridge Type Fault Current Limiter. Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC '06. CES/IEEE 5th International, 1-5.
32. Wu, X., Mutale, J., Jenkins, N., Strbac, G., 2003 An investigation of Network Splitting for Fault Level Reduction. Tyndall Centre for Climate Change Research Project.
33. Warzoha, R., Fleischer, A. S., 2011. Thermal Management of High Density Power Electronics Modules Using Dielectric Mineral Oil With Applications in the Electric Utility Field for Smart Grid Protection. Journal of Thermal Science and Engineering Applications.
34. Zou, J., Chen, J., Dong, E., 2002. Study of Fast-closing Switch Based Fault Current Limiter With Series Compensation, Electrical Power and Energy System.
35. Shahriari, S. A., Abapour, M., Yazdian, A., Haghifam, M. R., 2010. Minimizing the Impact of Distributed Generation on Distribution Protection System by Solid State Fault Current Limiter. IEEE PES on Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1-7.
36. Begam, K. M., Karthikeyan, T., Ramani, K., 2014. Suppression of Fault Currents on DG Using Various Fault Current Limiters in Distribution Network. J Electr Electron Syst Volume 2, Issue 2, 1000115 ISSN: 2332-0796 JEES.
37. Smedley, K., Abramovitz, A., 2011. Development of Fault Current Controller Technology. Final Project Report. University of California, Irvine.
38. Sundaram, A., Gandhi, M., 2008. EPRI Solid-State Fault Current Limiters (SSFCL). Annual DOE Peer Review Meeting. Washington.
39. www.elimsan.com/urunler/sigortalar/. Elimsan. Orta Gerilim Sigortalar Kataloğu.
40. www.eaton.com. 2011. Current Limiting Fuses Volume 14-Fuses CA08100016E.
41. www.littelfuse.com. 2007. Using Current-limiting Fuses to Increase Short Circuit Current Ratings of Industrial Control Panels. Littelfuse POWR-GARD Products.

- 42.** Chen, S., 2013. A Non-superconducting Fault Current Limiter (NSFCL) A Thesis Submitted to The Department of Electrical and Computer Engineering. Northeastern University, Boston, Massachusetts.
- 43.** IEEE Guide for the Application, Operation, and Coordination of High-Voltage Current-Limiting Fuses, 2012. IEEE Std C37.48.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.48.1-2011), 1-87.
- 44.** Hartung, K. H., 2002. “ I_s -limiter, the Solution for High Short- Circuit Current Applications,” ABB Calor Emag.
- 45.** www.abb.com/mediumvoltage. 2012-2014. I_s -limiter ABB AG - Calor Emag Medium Voltage Products.
- 46.** Hartung, K. H., Grafe, V., 2011. Calculation of the Tripping Value for Applications of I_s -Limiters.
- 47.** Berry, J., Murdoch, N., 2015. Standardised Connections and the Economic Benefits of Fault Current Limiters on Distribution Networks. 23rd International Conference on Electricity Distribution. 1129.
- 48.** Kaya, A., 2013. Elektrik Tesisleri Kitabı.
- 49.** Gilany, M., Al-hasawi, W., Reducing the Short Circuit Levels in Kuwait Transmission Network. (A Case Study) College of Technological Studies. Kuwait.
- 50.** Nasiri, A., Barahmandpour, H., 2006. Fault Current Limitation of Ramin Power Plant, 21st International Power System Conference (PSC), Tehran, 1640-1646.
- 51.** IEC 60076-6 Standartları.
- 52.** www.hilkar.com/tr/notrtopraklamareaktorleri.html.
- 53.** www.grid.alstom.com/contactcentre. Air-Core Neutral Grounding Reactors.
- 54.** Mukhopadhyay S. C., A lecture on Current Limiter. School of Engineering and Advanced Technology Massey University.
- 55.** CIGRE, 2012. Application and Feasibility of Fault Current Limiters in Power Systems.
- 56.** Lei F., Ruifeng G., Wanrong Z., Xiaoping Y., 2011. Type and Characteristic Analysis of Fault Current Limiter. 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology.
- 57.** tr.wikipedia.org/wiki/Süperiletken.

- 58.** Lawal, O. K., Umar, I., Abubakar, B., Mahmood, M. K., 2014. Performance Analysis of Surge Current Protection Using Superconductors. European Scientific Journal July 2014 edition vol.10, No.19.
- 59.** Mehairjan, V. S., Popov, M., Geschiere, A., Kling, W. L., 2011. Transient Analysis of a 150 kV Fault Current Limiting High Temperature Superconducting Cable. International Conference on Power Systems Transients (IPST2011).
- 60.** Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., Chu, C. W., 1987. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. Physical Review Letters, vol. 58, 908-910.
- 61.** Mohana, U. M., Suganthi, S.T., 2012. Performance Analysis of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Single Phase and Three Phase Systems. International Journal of Communications and Engineering, Vol. 1(1), 56-61.
- 62.** Bongale M., Desai R., Gupta P., 2015. Performance Analysis of Resistive Superconducting Fault Current Limiter in Power System Network. International Conference on Intelligent Systems and Control.
- 63.** www.seminalsoonly.com, 2006. Surge current protection using superconductor.
- 64.** Firouzi, M., Aslani, S., Gharehpetian, G. B., Jalilvand, A., 2012. Effect of Superconducting Fault Current Limiters on Successful Interruption of Circuit Breakers: European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality. International Conference on Renewable Energies and Power Quality.
- 65.** Janowski, T., Stryczewska H. D., Kozak, S., Surdacki, P., Kucewicz, B. K., Wojtasiewicz, G., Kozak, J., Malinowski, H., 2013. Bi-2223 and Bi-2212 Tubes for Small Fault Current Limiters.
- 66.** Heydari H., Abrishami A., 2013. Comprehensive Analysis for Magnetic Shield Superconducting Fault Current Limiters. IEEE Transactions on Applied Superconductivity.
- 67.** Novak, G., Bock, J., 2011. Superconducting Fault Current Limiters. Nexans.
- 68.** www.bine.info/en/newsoverview/news/supraleitende-strombegrenzer-in-sachsen/
- 69.** www.bine.info/en/newsoverview/news/supraleiter-geht-in-den-testbetrieb/
- 70.** Franke S. A., 2012. Fault Current Control in the Transmission Network. DELFT University of Technology.
- 71.** fglongatt.org/OLD/Test_Case_IEEE_14.html
- 72.** Bock J., Hobl A., 2012. Superconducting Fault Current Limiters-A New Device for Future Smartgrids. International Conference on Electricity Distribution.

ÖZGEÇMİŞ

Buğra YILMAZ

Fırat Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Elazığ

E-posta: bugrayilmazeem@gmail.com

- 1992 : Elazığ'da doğdu.
- 2006-2010 : Elazığ Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi'ni bitirdi.
- 2010-2014 : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı.
- 2014 : Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Tesisleri Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.