T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE ARIZA AKIMI SINIRLAYICILARIN ETKİLERİNİN ANALİZİ

Barış KÜÇÜKAYDIN

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Temmuz, 2021

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE ARIZA AKIMI SINIRLAYICILARIN ETKİLERİNİN ANALİZİ

Barış KÜÇÜKAYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması 27.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Oktay ARIKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Recep YUMURTACI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

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

Prof. Dr. Bülent ORAL, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Oktay ARIKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Güç Sistemlerinde Arıza Akımı Sınırlayıcıların Etkilerinin Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Barış KÜÇÜKAYDIN

İmza

Bu çalışma, 119E665 nolu ve “Katı-Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı Tasarımı” isimli proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Sevgili eşime

ve

Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi birikimi ile çalışmaya yön veren ve sunduğu katkılarla destek olan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a, uygulama çalışmalarında tecrübesiyle büyük yardımları olan değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Evren İŞEN'e teşekkür ederim.

Sundukları çok değerli katkılar ile tezimin gelişmesinde büyük desteklerini gördüğüm, tez izleme jürimde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ ve Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya teşekkür ederim.

1002 Hızlı Destek Programı kapsamında, 119E665 nolu ve "Katı-Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı Tasarımı" isimli projemizi destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan ve desteğini eksik etmeyen sevgili eşim Göknur'a, eğitim hayatım boyunca sundukları maddi ve manevi destekleri ile bu güne gelmemi sağlayan anneme ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

Barış KÜÇÜKAYDIN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti ... 1

1.2 Tezin Amacı ... 10

1.3 Hipotez ... 11

2 GÜÇ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ARIZA AKIMI SINIRLAMA YÖNTEMLERİ 14

2.1 Kısa Devre Arıza Akımları ... 15

2.2 Kısa Devre Arıza Akımlarını Sınırlama Yöntemleri ... 16

2.2.1 Klasik Arıza Akımı Sınırlama Yöntemleri ... 17

2.2.2 Modern Arıza Akımı Sınırlayıcılar ... 20

3 KATI HAL ARIZA AKIMI SINIRLAYICILAR VE ÖNERİLEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICI 29

3.1 Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı Devreler ... 29

3.1.1 Köprü Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcılar ... 30

3.1.2 Empedans Anahtarlamalı Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcılar ... 31

3.1.3 Rezonans Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcılar ... 33

3.2 Önerilen Seri-Paralel Rezonans Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı ... 38

3.2.1 Çalışma Prensibi ... 39

3.2.2 Kontrol Yöntemi ... 41

3.2.3 Matematiksel Modelleme ... 42

4 MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMALARI 47

4.1 Test Sistemleri ... 47

4.2 Klasik ve Modern Arıza Akımı Sınırlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması ... 49

4.3 Seri-Paralel Rezonans Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı Simülasyonları 53

4.3.1 Tasarım Parametreleri ... 53

4.3.2 Arıza Akımı Sınırlama Performansının İncelenmesi ... 55

4.3.3 Arıza Anında Ortak Kuplaj Noktası Gerilimine Katkısı ... 56

4.4 Seri-Paralel Rezonans Tipi Arıza Akımı Sınırlayıcı ile Diğer Rezonans Tipi Arıza Akımı Sınırlayıcıların Karşılaştırılması ... 57

4.4.1 Paralel Rezonans Tipi Arıza Akımı Sınırlayıcı Devreler ... 58

4.4.2 Arıza Akımını Sınırlama Performanslarının Karşılaştırılması 60
4.4.3 Ortak Kuplaj Noktası Gerilimi Kararlılığına Etkileri 62
4.4.4 Arıza Akımı Sınırlayıcılarda Oluşan Güç Kayıpları 63
4.4.5 Arıza Anında Sınırlayıcıların Toplam Enerji Tüketimi 64
4.4.6 Paralel Rezonans Tipi Sınırlayıcıların Uygulanabilirliklerinin İncelenmesi 65

5 SERİ-PARALEL REZONANS TİPİ KATI HAL ARIZA AKIMI SINIRLAYICININ GÜÇ SİSTEMİNE KONUMLANDIRILMASININ OPTİMİZASYONU 68

5.1 SPR-AAS'nin Güç Sistemlerinde Optimum Yerleşimi ve Boyutlandırılması. 68
5.1.1 Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar 68
5.1.2 Bara Empedans Matrisi ve Thevenin Empedansı 70
5.1.3 Optimizasyon Algoritması 72
5.2 Optimizasyon Yönteminin Uygulaması 74

6 ARIZA AKIMI SINIRLAYICI PROTOTİP UYGULAMASI 79

6.1 Normal Çalışma 87
6.2 Kısa Devre Arıza Testleri 87
6.2.1 Sınırlayıcısız Durumda Kısa Devre Arızaları 88
6.2.2 SPR-AAS Prototipi Kısa Devre Arıza Testleri 89

7 SONUÇ VE ÖNERİLER 99

KAYNAKÇA 105

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 120

SİMGE LİSTESİ

J	Akım yoğunluğu
r_b	Arıza akımı sınırlama direnci
M_H	Arıza akımı sınırlayıcı empedansına bağlı birim maliyet katsayısı
H	Arıza akımı sınırlayıcının uygulandığı hat
L_b	Arıza akımı sınırlayıcı reaktör
Z_{AAS}	Arıza akımı sınırlayıcı sınırlama empedansı
V_b	Arıza öncesi bara gerilimi
Z_{min}^{eski}	Bara empedans matrisindeki elemanların eski değerleri
Z_{min}^{yeni}	Bara empedans matrisindeki elemanların yeni değerleri
Z_{bb}	Bara empedans matrisinin b numaralı diyagoneli
ZnO	Çinko oksit varistör
L_{dc}	Doğru akım bobini
E	Elektrik alan
φ_n	Faz farkı
V_{pccA}, V_{pccB}	Fazların ortak kuplaj noktası gerilimleri
Z_g	Generatör empedansı
V_g	Generatör gerilimi
V_m	Gerilim kaynağının maksimum değeri
i_L	Hat akımı
R_L	Hat direnci
Z_{Hat}	Hat empedansı
L_L	Hat endüktansı
V_L	Hat sonu gerilimi
Z_H	H hattına uygulanan arıza akımı sınırlayıcının empedans büyüklüğü
R_s	Kaynak direnci
L_s	Kaynak endüktansı
I_A	Kısa devre arıza akımı
Z_a	Kısa devre arıza empedansı
φ_f	Kısa devre arızası anındaki faz farkı
L_f	Kısa devre arızası anındaki sistemin toplam endüktansı
R_f	Kısa devre arızası anındaki toplam sistem direnci
I_{kr}	Kritik akım seviyesi

J_c	Kritik akım yoğunluğu
R_{max}	Maksimum direnç değeri
L_{max}	Maksimum endüktans değeri
R_{min}	Minimum direnç değeri
L_{min}	Minimum endüktans değeri
Z_n	Normal işletim koşullarındaki sistem empedansı
R_n	Normal işletim koşullarındaki sistemin toplam direnci
L_n	Normal işletim koşullarındaki sistemin toplam endüktansı
R_{pr}	Paralel rezonans direnci
C_{pr}	Paralel rezonans kondansatörü
C_{sr}	Seri rezonans kondansatörü
L_{sp}	Seri ve paralel rezonans endüktansı
$I_{A(AAS)}$	Sınırlayıcı uygulanması durumundaki arıza akımı
HS	Sistemdeki toplam hat sayısı
f_s	Şebeke frekansı
ω	Temel bileşen açısal frekansı
AS_1, AS_2, AS_3	Uygulama test devresinde kullanılan akım sensörleri
GS_1, GS_2, GS_3	Uygulama test devresinde kullanılan gerilim sensörleri
K_1, K_2	Uygulama test devresinde kullanılan üç fazlı kontaktörler
P_g	Üretilen aktif güç
Q_g	Üretilen reaktif güç
G_A, G_B, G_C	Yarıiletken anahtarın kontrol sinyalleri
S, S_1, S_2, SW	Yarıiletken anahtarlar
i_{LA}	Yük akımı
$R_{yük}$	Yük direnci
$Z_{yük}$	Yük empedansı
$L_{yük}$	Yük endüktansı
P_L	Yükün aktif gücü
Q_L	Yükün reaktif gücü

KISALTMA LİSTESİ

AF	Amaç fonksiyonu
ADC	Analog-dijital dönüştürücü
AAS	Arıza akımı sınırlayıcı
DFIG	Çift beslemeli indüksiyon generatörü
OKN	Ortak kuplaj noktası
SPR-AAS	Seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı
SB	Süperiletken bobin

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Arıza akımı sınırlayıcılar 14
Şekil 2.2 Kısa devre akımına AAS'nin etkisi 15
Şekil 2.3 Doyurulabilir çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı [115] 23
Şekil 2.4 Akı kilitlemeli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı [121] 25
Şekil 2.5 Korumalı çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı [32] 26
Şekil 2.6 Sabit mıknatıslı manyetik arıza akımı sınırlayıcı [125] 26
Şekil 2.7 Neodimyum hibrid arıza akımı sınırlayıcı [20] 27
Şekil 3.1 L-R empedanslı köprü tipi arıza akımı sınırlayıcı [126] 30
Şekil 3.2 Köprü tipi arıza akımı sınırlayıcı [127] 30
Şekil 3.3 Empedans anahtarlamalı arıza akımı sınırlayıcı [50] 32
Şekil 3.4 Anahtarlamalı tip arıza akımı sınırlayıcı [134] 33
Şekil 3.5 Tristör kontrollü seri reaktörlü arıza akımı sınırlayıcı [135] 34
Şekil 3.6 Seri rezonans arıza akımı sınırlayıcı [139] 34
Şekil 3.7 Paralel rezonans arıza akımı sınırlayıcı [142] 35
Şekil 3.8 Tristör kontrollü rezonans akım sınırlayıcı [142] 36
Şekil 3.9 Paralel rezonans arıza akımı sınırlayıcı [143] 36
Şekil 3.10 Seri ve paralel rezonansın uygulandığı devre [144] 37
Şekil 3.11 Seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı 39
Şekil 3.12 Normal çalışma için devrenin akım yolu 40
Şekil 3.13 Arıza durumundaki devrenin akım yolu 40
Şekil 3.14 Kontrol devresi 42
Şekil 3.15 İki baralı güç sistemi modeli 43
Şekil 4.1 IEEE'nin 9 baralı sisteminin tek hat diyagramı [147] 47
Şekil 4.2 İki baralı güç sistemi 49
Şekil 4.3 Kontrollü katı hal seri reaktör tipi arıza akımı sınırlayıcı 51
Şekil 4.4 Normal işletim koşullarındaki bara gerilimleri 52
Şekil 4.5 Farklı sınırlayıcılar kullanılması durumunda arıza akımı değerleri 53
Şekil 4.6 Üç faz arızasındaki hat akımı; a) Sınırlayıcısız durum, b) SPR-AAS'li durum, faz-faz arızasındaki hat akımı; c) Sınırlayıcısız durum, d) SPR-AAS'li durum, faz-toprak arızasındaki hat akımı; e) Sınırlayıcısız durum, f) SPR-AAS'li durum 55
Şekil 4.7 Üç faz arızasında OKN gerilimi; a) Sınırlayıcısız durum, b) SPR-AAS'li durum, faz-faz arızasında OKN gerilimi; c) Sınırlayıcısız durum, d) SPR-AAS'li durum, faz-toprak arızasında OKN gerilimi; e) Sınırlayıcısız durum, f) SPR-AAS'li durum 57
Şekil 4.8 a) Önerilen SPR-AAS devresi [149], b) Paralel LC rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [128], c) Kontrollü rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [142], d) Kontrollü paralel rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [150], e) IGBT kontrollü rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [151], f) Rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [143] 58
Şekil 4.9 Üç faz arızasındaki arıza akımlarının değişimi 60
Şekil 4.10 Faz-toprak arızasındaki arıza akımlarının değişimi 60
Şekil 4.11 Arıza akımlarının sınırlandığı maksimum değerler 61
Şekil 4.12 Üç faz arızasındaki OKN gerilimlerinin değişimi 62
Şekil 4.13 Faz-faz arızasındaki OKN gerilimlerinin değişimi 63

Şekil 4.14 Sınırlayıcıların arıza boyunca toplam enerji tüketimleri 64
Şekil 4.15 Yarıiletken anahtarların maruz kaldığı maksimum gerilim seviyeleri .. 66
Şekil 4.16 Yarıiletken anahtarların taşıdıkları maksimum akım değerleri 67
Şekil 5.1 Optimizasyon algoritması akış diyagramı 73
Şekil 5.2 IEEE'nin 9 baralı sistemi ve SPR-AAS uygulanabilecek noktalar 74
Şekil 5.3 Bir ve iki adet sınırlayıcı uygulanması durumları için generatör baraları arıza akımlarının değişimi 76
Şekil 5.4 Bir ve iki adet sınırlayıcı uygulanması durumları için bara arıza akımlarının değişimi 76
Şekil 5.5 Sınırlayıcı yerleştirilen baralarda arıza akımlarının değişimi 77
Şekil 5.6 Sınırlayıcı bulunmayan baralarda arıza akımlarının değişimi 78
Şekil 6.1 SPR-AAS'nin üç fazlı test devresi 79
Şekil 6.2 Test devresinin tek fazının üç boyutlu modeli 82
Şekil 6.3 SPR-AAS prototipi ve uygulandığı test devresinin tek faz görüntüsü 82
Şekil 6.4 Üç fazlı SPR-AAS prototipi ve test devresinin genel görünümü 83
Şekil 6.5 Sürme devresi 83
Şekil 6.6 Akım sensörü bağlantıları; a) Hat akımı sensörü (AS_1), b) Yük akımı sensörü (AS_2) 84
Şekil 6.7 Gerilim sensörü bağlantıları; a) OKN gerilim sensörü (GS_1), b) Yük barası gerilim sensörü (GS_2) 85
Şekil 6.8 Sensör besleme devresi 86
Şekil 6.9 Simülasyon ve uygulama devrelerinin nominal akımları 87
Şekil 6.10 Sınırlayıcısız durumdaki üç faz arızasında arıza akımlarının değişimi . 89
Şekil 6.11 Üç faz kısa devresinde arıza akımının değişimi 90
Şekil 6.12 Üç faz arızasında A fazındaki arıza akımınının değişimi 91
Şekil 6.13 Üç faz arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması 92
Şekil 6.14 Üç faz-toprak kısa devre arızasında arıza akımının değişimi 92
Şekil 6.15 Üç faz-toprak arızasında A fazındaki arıza akımının değişimi 93
Şekil 6.16 Üç faz-toprak arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması 94
Şekil 6.17 İki faz-toprak arızasında arıza akımının değişimi 94
Şekil 6.18 İki faz-toprak arızasında A fazındaki arıza akımının değişimi 95
Şekil 6.19 İki faz-toprak arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması 96
Şekil 6.20 Faz-toprak arızasında arıza akımının değişimi 97
Şekil 6.21 Faz-toprak arızasında A fazındaki arıza akımının değişimi 97
Şekil 6.22 Faz-toprak arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması 98

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 IEEE'nin 9 baralı test sisteminde bulunan iletim hatları ile transformatörlerin özellikleri 48
Tablo 4.2 Bara gerilimleri ve generatör güçleri 48
Tablo 4.3 İki baralı güç sisteminin özellikleri 49
Tablo 4.4 Normal çalışma ve arıza durumundaki hat akımları 50
Tablo 4.5 Farklı eleman büyüklükleri için tasarım parametrelerinin değerleri 54
Tablo 4.6 Paralel rezonans tipi sınılayıcıların önerildiği referans yayınlar 59
Tablo 4.7 Sınırlayıcılar üzerinde oluşan anlık en yüksek güç kayıpları 63
Tablo 4.8 Sınırlayıcıların çeşitli parametreler bakımından karşılaştırılması 66
Tablo 5.1 SPR-AAS uygulanmadığında oluşan arıza akımları 75
Tablo 5.2 Optimum SPR-AAS parametreleri 76
Tablo 6.1 Farklı arıza tiplerinde sistemde oluşan akım ve gerilim değerleri 80
Tablo 6.2 Prototip uygulamasında kullanılan elemanların özellikleri 81
Tablo 6.3 Sınırlayıcısız durumda arıza akımlarının maksimum değerleri 89
Tablo 6.4 Üç faz arızasındaki arıza akımı sınırlama oranları 91
Tablo 6.5 Üç faz-toprak arızasındaki arıza akımı sınırlama oranları 93
Tablo 6.6 İki faz-toprak arızasındaki arıza akımı sınırlama oranları 96
Tablo 6.7 Faz-toprak arızasında arıza akımı sınırlama oranları 98

ÖZET

Güç Sistemlerinde Arıza Akımı Sınırlayıcıların Etkilerinin Analizi

Barış KÜÇÜKAYDIN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Güç sistemlerinde arıza akımlarını izin verilen güvenli düzeye düşürebilmek için çeşitli arıza akımı sınırlama yöntemleri ve cihazları geliştirilmektedir. Bu tez çalışmasında, özgün bir seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre (SPR-AAS) önerilmektedir. Normal çalışma koşullarında, SPR-AAS'nin seri rezonans ile sistemde yer alması sağlanarak, üzerinde gerilim düşümü ve güç kaybının oluşması önlenmektedir. Kısa devre arıza akımlarını, arızanın ardından seri rezonans durumundan çıkıp paralel rezonans empedansını sisteme dahil ederek sınırlamaktadır. Aynı zamanda, ikinci işlevi olarak arıza anında ortak kuplaj noktasında (OKN) oluşan gerilim düşüşlerini önleyerek, nominal değerine yakın bir seviyede kalmasını sağlamaktadır. 20 kV'luk gerilim düzeyine sahip iki baralı bir güç sisteminde SPR-AAS'nin uygulanması, PSCAD/EMTDC programında oluşturulan simülasyon modeli ile analiz edilmiştir. Önerilen SPR-AAS literatürdeki diğer paralel rezonans tipi sınırlayıcılar ile arıza akımı sınırlama kapasitesi, OKN gerilim kararlılığına katkı, üzerlerinde oluşan anlık güç kayıpları ve enerji tüketimleri ile yarıiletken anahtarlarının maruz kaldığı maksimum gerilim ve akım düzeyleri

bakımından mukayese edilmiştir. Etkin performansı ortaya konan SPR-AAS'nin, fazlar arası 380 V gerilim seviyesi için üç fazlı prototip uygulaması gerçekleştirilmiştir. Üç faz, üç faz-toprak, iki faz-toprak ve faz-toprak arızalarının gerçekleştirildiği test devresinde, SPR-AAS %78,21 - %85,69 aralığında değişen oranlarda arıza akımlarını sınırlamıştır. Test devresi simülasyonu ve uygulamadaki arıza akımı sınırlama oranlarının üç faz ve üç faz-toprak arızalarında ihmal edilebilecek kadar yakın olduğu, faz-toprak arızasında %1,09 ve iki faz-toprak arızasında ise %2,03'lük bir farkın oluştuğu görülmüştür. SPR-AAS'nin güç sistem uygulamalarında, sistemde yer alan tüm baralarda arıza akımını belirlenen kritik seviyenin altına düşürebilmek için kullanılması gereken sınırlayıcı sayısı, boyutu ve konumlarının belirlenebilmesi amacıyla bir optimizasyon algoritması geliştirilmiş ve IEEE'nin 9 baralı sisteminde analiz edilmiştir. Önerilen SPR-AAS'nin basit ve ekonomik yapısı, kolay kontrol edilebilmesi ve arıza akımlarını sınırlama performansı ile OKN gerilimi üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, güç sistemlerinde uygulanabilir bir sınırlayıcı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katı hal arıza akımı sınırlayıcı, seri-paralel rezonans, arıza akımı sınırlayıcı prototipi

ABSTRACT

Analysis of the Effects of Fault Current Limiters in Power Systems

Barış KÜÇÜKAYDIN

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Oktay ARIKAN

Various fault current limiting methods and devices are being developed to reduce fault currents to the permissible safe level in power systems. In this thesis, a novel series-parallel resonance type solid-state fault current limiter circuit (SPRFCL) is proposed. Under normal operating conditions, SPRFCL is provided to stay in the system with series resonance and it is prevented voltage drop and power loss on it. It limits the short-circuit fault currents by means of deactivating series resonance with the initiation of the fault and by including the parallel resonance impedance to system. Also, as its second function, it prevents voltage drops that occur at the point of common coupling (PCC) during the fault and keeps it a level close to its nominal value. The implementation of SPRFCL in a two-bus power system with a voltage level of 20 kV is analyzed with the simulation model created in the PSCAD/EMTDC software. The proposed SPRFCL is compared with other parallel resonance type limiters in the literature in terms of fault current limiting capacity, contribution to PCC voltage stability, instantaneous power losses and energy consumptions on them, and maximum voltage and current levels that semiconductor switches are

exposed to. A three-phase prototype implementation was realized for the 380 V voltage level between phases of the SPRFCL, which is introduced its effective performance. In the test circuit where three-phase, three-phase-to-ground, two-phase-to-ground and phase-to-ground faults are performed, SPRFCL limited fault currents at rates ranging from 78.21% to 85.69%. It has been observed that the ratios of fault current limiting in test circuit simulation and practice are close enough to be negligible in three-phase and three-phase-to-ground faults, with the differences of 1.09% in phase-to-ground fault and 2.03% in two-phase-to-ground fault. In power system applications of SPRFCL, an optimization algorithm has been developed to determine the number, size and locations of the limiters that should be used in order to reduce the fault current below the specified critical level in all busses in the system and it has been analyzed in IEEE 9 bus system. Considering the simple and economical structure, easy controllability and fault current limiting performance of the proposed SPRFCL and its effect on the PCC voltage, it is concluded that it is a feasible limiter in power systems.

Keywords: Solid-state fault current limiter, series-parallel resonance, fault current limiter prototype

1
GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, kısa devre arızalarında oluşan yüksek arıza akımlarının sınırlanabilmesi için özgün bir seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı geliştirilmiştir. Önerilen SPR-AAS'nin arıza akımı sınırlama ve OKN bara gerilim seviyesini koruma performansı simülasyon çalışmaları ile analiz edilmiştir. Belirlenen tasarım ve performans parametreleri bakımından literatürdeki diğer paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcılar ile karşılaştırılmıştır. Oluşturulan üç fazlı alçak gerilim prototipinin etkinliği kısa devre testleri uygulanarak incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Elektrik güç sistemlerinde çeşitli fiziksel ve elektrisel sebeplerden kaynaklanan kalıcı veya geçici kısa devre arızaları meydana gelmektedir. Aşırı gerilimler sebebiyle oluşan geçici boşalmalar, aşırı akımlardan dolayı yüksek sıcaklıkların meydana gelmesi veya kirli havayla birlikte nemin ark oluşumuna neden olması gibi olaylar neticesinde ortaya çıkan kısa devre arızaları sistemde yüksek arıza akımlarının oluşumuna yol açmaktadır [1]. Kısa devrenin gerçekleşme durumuna bağlı olarak üç faz, üç faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak ve faz-toprak olarak isimlendirilen kısa devre arızalarında, arıza akımları arıza tipine bağlı olarak farklı seviyelere ulaşmaktadır. Gerilim seviyesi, arızanın gerçekleştiği yer, arıza direnci ve arıza zamanı da arıza akımlarının büyüklüğünü belirleyen diğer önemli parametrelerdir.

Elektrik şebekelerindeki arıza akımlarının mevcut düzeyi giderek yükselmektedir. Bu artışın en önemli sebepleri; enterkonnekte sistemin genişlemesi, sürekli artan enerji talebi ve dağıtık üretim tesislerinin şebekeye daha çok entegre olmasıdır [2]–[6]. Arıza akımlarının yükselmesine neden olan etkenler, belli bir zaman dilimi için geçerli olmamakla birlikte süreklilik arz etmektedir. Bu nedenle, önümüzdeki yıllarda arıza akımlarının daha yüksek bir düzeye ulaşması beklenmektedir.

Arıza akımlarının şebeke için belirlenen üst sınır değerlerinin üzerine çıkması, buna göre boyutlandırılmış olan güç sistem ekipmanlarını ısıl ve mekanik açıdan zorlamaktadır. Sistemi yüksek arıza akımlarının etkilerinden korumak için kullanılan devre kesicilerinin, bazı bölgelerde kesim kapasitelerinin aşılması sistem güvenilirliğini zayıflatmaktadır. Bunun sonucunda, sistem bileşenlerinde arızalanmalar meydana gelmekte ve arızalı cihaz değişimleri ciddi maliyetlere neden olmaktadır. Cihaz maliyetlerinin yanı sıra bu değişimler için uzun süreler gerekmesi ve bu süre zarfında enerji kesintilerinin yaşanacak olması, arıza akımlarının sebep olduğu ekonomik etkiyi büyütmektedir. Bu nedenle, kısa devre arıza akımı seviyelerinin bu sonuçları doğurmayacak güvenli bir düzeye düşürülebilmesi için bir çok arıza akımı sınırlama yöntemi ve cihazı geliştirilmiş olup, güç sistem uygulamaları gerçekleştirilmeye devam edilmektedir.

Arıza akımı sınırlama yöntemleri; klasik yöntem ve cihazlar ile modern arıza akımı sınırlayıcılar olmak üzere temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Klasik arıza akımı sınırlama cihazları; akım sınırlayıcı sigortalar, akım sınırlama reaktörleri, yüksek empedanslı transformatörler, I_s sınırlayıcıları ve nötr reaktörüdür. Devre kesicileri arıza akımını kesmek için en az dört periyotluk bir süreye ihtiyaç duyarken, akım sınırlayıcı sigortalar ise çeyrek periyottan daha kısa bir sürede arıza akımını sınırlayabilmektedir [7]. Tek kullanımlık olmaları ve arıza akımına maruz kaldıktan sonra değiştirilmelerinin gerekmesi en büyük dezavantajlarıdır [8].

Akım sınırlama reaktörleri, sürekli olarak devrede kalan bir bobin olarak uygulanmakta ve endüktif reaktansı ile sistem empedansı arttırılarak arıza akımlarının düşürülmesi amaçlanmaktadır. Brezilya'da yapılan 15 kV'luk ve 4,21 mH'lik akım sınırlayıcı reaktör uygulaması ile arıza akımı 15 kA'den 4 kA'e kadar sınırlanarak, izin verilen sınır değer olan 5,4 kA'in altına çekilebilmiştir [9]. Ancak, reaktör normal işletim şartlarında da %5'lik bir gerilim düşümüne neden olmaktadır. Arıza olmayan durumlarda da sistemde aktif olarak bulunmaları, gerilim düşümü ve güç kayıplarının oluşmasına yol açmaktadır [10]. Güç sistemlerinde yüksek empedanslı transformatör kullanılması, arıza akımlarını sınırlamanın dışında sistem kararlılığını zayıflatarak, bara gerilimleri ve güç faktörü üzerinde de bozucu bir etki oluşturmaktadır. Çin'deki bir güç sistemi için gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında, bağıl kısa devre gerilimi %24 olan yüksek

empedanslı transformatör uygulaması ile arıza akımının 1,24 kA'e sınırlanabildiği ve sistem kararlılığının ise nispeten korunabildiği gösterilmiştir [11]. I_s sınırlayıcılar, hat akımını sahip oldukları ana iletken üzerinden taşıdıkları için diğer klasik sınırlama cihazlarının aksine normal çalışmada olumsuz bir etkileri bulunmamaktadır. Ancak, nominal akım değerleri 5 kA ile sınırlıdır ve devreye girdikleri bir kısa devre arızasından sonra ana iletken ve sigortalarının değiştirilmesi gerekmektedir [12]. Nötr reaktörü, transformatörün yıldız bağlı olan sekonderinin nötrünün düşük veya yüksek değerli direnç üzerinden toprağa bağlanması yoluyla uygulanmakta olup, sadece faz-toprak arızaları için etkin bir çözüm sunmaktadır [13].

Klasik arıza akımı sınırlama yöntemleri ise bara ayırma, devre kesicilerinin sıralı çalıştırılması ve gerilim seviyesinin yükseltilmesidir. Kısa devre arızasının daha az sayıda kaynak tarafından beslenmesi ile arıza akımının sınırlanması prensibine dayanan bara ayırma yöntemi, normal çalışma şartlarında sistem güvenilirliği ve kararlılığını düşürmektedir. Bu nedenle, IEEE'nin 24 baralı güvenilirlik test sisteminde bara ayırma ve hat baypası tekniklerinin birlikte ve ayrı olarak ele alındığı çalışmada, her iki yöntemin birlikte uygulanması durumunda arıza akımlarının daha yüksek oranla sınırlanabildiği ve sistem güvenilirliğinin yükseltilebildiği ortaya konulmuştur [14]. Devre kesicilerinin sıralı çalıştırılmasında, arıza noktasına en yakın kesici yerine öncelikli olarak kaynak tarafındaki kesicilerin devreye girerek, arıza akımı seviyesinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, arızadan etkilenmeyecek fiderlerin de enerjisiz bırakılmasıdır. Malezya'da 275/132 kV'luk trafo merkezinde uygulanan bu yöntemle, arıza akımı 40 kA'den 25 kA seviyesine kadar düşürülebilmiştir [15].

Günümüzde teknolojinin sağladığı imkanlardan da yararlanılarak, arıza akımları ve sistem parametreleri üzerinde daha yüksek performansa sahip olan modern sınırlayıcılar geliştirilmektedir. Modern arıza akımı sınırlayıcılar; katı hal, süperiletken, manyetik ve hibrid tipleri olan ve arıza akımlarını çalışma prensiplerine göre oluşturdukları empedans ile sınırlayan yapılardır [16]–[20]. Kısa devre arıza akımlarına etkin çözümler bulma çabaları, düşük maliyetli ve uygulanabilir sınırlayıcıların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Güç

sistemlerinde modern arıza akımı sınırlayıcıların uygulanmasının, sistem güvenilirliği, bara gerilimleri, röle koordinasyonu ve geçici kararlılık gibi birçok sistem parametresi üzerinde olumlu etkileri olmasından dolayı bu etkenler bakımından da avantajlı sınırlayıcılar ortaya konulmaya çalışılmaktadır [21]–[24].

Son yıllarda çeşitli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar önerilmekte ve bazıları güç sistemlerinde uygulanmaktadır [25]. Direnç gösteren süperiletken sınırlayıcılarda, hat akımı normal çalışmada düşük dirence sahip süperiletkenin üzerinden taşınmaktadır [26]. Arıza akımının kritik akım seviyesinin üzerine çıkması ile birlikte süperiletken malzemenin gösterdiği yüksek dirençle arıza akımı sınırlanmaktadır [27]. Bu tip sınırlayıcılarda, süperiletken malzemenin boyutu ve tipine bağlı olarak maliyetli soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [28]. 40 kV/2 kA'lik direnç gösteren DC süperiletken sınırlayıcı uygulamasında, kritik akımı 2050 A'den büyük olan ve toparlanma süresi 200 ms'den küçük olan bir tasarım oluşturularak, 10 kV gerilim düzeyinde yapılan testte arıza akımı 1,25 Ω'luk direnç ile 9,37 kA'e sınırlanabilmiştir [29]. Rusya'da uygulanan 220 kV gerilim ve 1200 A efektif akım seviyesine sahip süperiletken sınırlayıcı, sistemde mevcut hava nüveli reaktöre paralel olarak bağlanarak uygulanmış ve gösterdiği 40 Ω'luk direnç ile 38 kA'e yükselmesi beklenen arıza akımı 7 kA'de bastırılabilmiştir [30]. Direnç gösteren süperiletken sınırlayıcıların direnç veya reaktörlerle paralel bağlanarak kullanılmasının nedeni, sönümleme sırasında oluşabilecek lokal ısınmalar ve aşırı gerilimlerden sınırlayıcıyı korumaktır [31]. Laboratuvar ölçekli prototip çalışmasında, primeri sisteme seri olan transformatörün sekonderine bağlanan süperiletkenle arıza akımı nominal hat akımının 4 katı büyüklüğünde sınırlanabilmiştir [32]. Başka bir çalışmada, yüksek sıcaklık süperiletken kabloların sistemin korunması için arıza akımı sınırlayıcı olarak da kullanılmaları ekonomik açıdan analiz edilmiş ve sınırlayıcı olarak da kullanılmaları için yapılacak yatırımın daha ekonomik olacağı sonucuna varılmıştır [33].

Doyurulabilir çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarda, normal çalışma şartlarında bir veya daha fazla demir nüve doyumda tutularak düşük bir empedans göstermesi sağlanırken, yüksek kısa devre arıza akımıyla doyumdan çıkarılan nüvelerin oluşturdukları endüktif reaktansla arıza akımları sınırlanmaktadır. Bir demir nüveli ve iki AC bobinli sınırlayıcının nüvesi, süperiletken bobine uygulanan

DC polarizasyon gerilimi ile doyuma sokulmuş ve arıza durumunda doyumdan çıkmasıyla 119 A'e yükselmesi beklenen arıza akımı yaklaşık %67 oranında sınırlanmıştır [34]. Bir başka çalışmada, tek nüveli sınırlayıcıda DC polarizasyon geriliminin uygulandığı süperiletkenin anlık güç kayıpları PSCAD programında oluşturulan simülasyon modeli ile incelenmiş ve 200 A'lik DC polarizasyon akımının sınırlayıcının tasarımı için ideal olacağı sonucuna varılmıştır [35]. Çin' de üç fazlı olarak uygulanan 35 kV/1500 A ve 220 kV/800 A'lik doyurulabilir çekirdekli sınırlayıcılar, 41 kA'lik arıza akımını 25 kA'e düşürebilecek kapasiteye sahip olmalarının yanı sıra arıza tespit süreleri 1 ms'den kısa ve kararlı durumdaki gerilim düşümleri %1'den küçüktür [36].

Manyetik arıza akımı sınırlayıcılar literatürde önerilen bir diğer modern sınırlayıcı modelleridir. Süperiletkenli doyurulabilir çekirdekli sınırlayıcılar gibi normal çalışma şartlarında doyumda olan nüvelerin, yüksek arıza akımıyla doyumdan çıkarak gösterdikleri endüktif reaktansla arıza akımları bastırılmaktadır. Arıza akımı sınırlama ve güç akış kontrolü gibi iki fonksiyonu bulunan bir demir nüveye sahip sınırlayıcı ile sınırlayıcısız durumda 111 A'e yükselecek olan arıza akımı 67 A'de sınırlanmıştır [37]. Çift ve tek demir nüveye sahip manyetik arıza akım sınırlayıcıların karşılaştırıldığı çalışmada, iki nüveli yapının arıza akımının bastırılmasında daha başarılı olduğu ancak tek nüveli sınırlayıcının süperiletkeninde indüklenen gerilimler bakımından daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır [38].

Manyetik arıza akımı sınırlayıcıların sahip olduğu bazı yapısal sıkıntıları çözmek amacıyla, çeşitli alternatif devreler önerilmektedir. Üç bacaklı bir nüve yapısı tasarlanarak sınırlayıcının boyut ve maliyeti düşürülebilmiştir [39]. Dört bacaklı demir nüve ve iki sabit mıknatıstan oluşan doyurulabilir çekirdekli köprü tipi bir arıza akımı sınırlayıcı geliştirilerek, sabit mıknatısların eddy akımı ve bobinlerin köprü yapısı sayesinde bakır kayıpları azaltılabilmiştir [40]. Başka bir çalışmada, doyurulabilir çekirdekli sınırlayıcıların ticari olarak yaygınlaşmasındaki en büyük engeller olduğu belirtilen; yoğun ferromanyetik malzeme gereksinimi ve manyetomotor kuvvet üreten DC kaynak ihtiyacını giderebilmek için iki NdFeB sabit mıknatıs ve dört bacaktan oluşan bir nüve yapısına sahip üç fazlı doyurulabilir çekirdekli bir arıza akımı sınırlayıcı önerilmiştir [41].

Geliştirilen hibrid arıza akımı sınırlayıcı; bir hızlı mekanik anahtar ve ona paralel kolda birbirlerine seri olarak bağlanmış manyetik indüksiyon akım komütasyon modülü ve sıvı metal akım sınırlama modülünden oluşmaktadır [42]. Düşük işletim kayıpları, yüksek güç yoğunluğu ve düşük maliyet gibi avantajları olduğu savunulan sınırlayıcı ile sınırlayıcısız durumda 102 kA değerine yükselen arıza akımı 38 kA ile sınırlanmıştır. Oluşturulan 20 V'luk neodimyum hibrid arıza akımı sınırlayıcı prototipi ile arıza akımı %50 oranında düşürülebilirken, güvenli yapısı ve arızanın başlangıç açısına bağlı olmaksızın efektif çalışabilmesinin devrenin olumlu özellikleri olduğu belirtilmiştir [43]. Başka bir çalışmada, 22,9 kV/630 A'lik hibrid arıza akımı sınırlayıcıda IGCT kullanımı ile devrede yer alan vakum kesicinin ark sönümlemeden kaynaklı arızalarının önüne geçilebileceği ortaya konulmuştur [44].

Yarıiletken teknolojisinin gelişimi ile birlikte daha yüksek gerilim ve akım dayanımına sahip yarıiletken anahtarların üretilmesi, katı hal devrelerin arıza akımı sınırlayıcı olarak geliştirilmesinin önünü açmıştır. Literatürde devre yapıları, çalışma prensipleri, uygulanma biçimleri ve sağladıkları faydalar bakımından birbirinden farklı birçok katı hal arıza akımı sınırlayıcı topolojisi önerilmiştir [45]–[48]. Katı hal sınırlayıcılar yüksek arıza akımlarını sınırlamanın yanı sıra bara gerilimleri, geçici kararlılık ve dağıtık üretim tesislerinin kararlı çalışması üzerinde de oldukça etkili bir performansa sahiptirler.

Katı hal arıza akımı sınırlayıcılar devre yapısı olarak; köprü tipi, rezonans tipi ve empedans anahtarlamalı tip olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Köprü tipi sınırlayıcılarda, köprü diyotun DC çıkış veren uçlarına bağlanan yarıiletken anahtar normal çalışmada iletimde tutularak sınırlama empedansına alternatif bir akım yolu oluşturulmakta ve arıza anında kesime alınmasıyla aktif olan empedansla arıza akımı sınırlanmaktadır [49]. Yarıiletken anahtarlarının doğru akımda çalıştırılmasından dolayı, bir anahtar kullanımının yeterli olması bu devrelerin en önemli avantajıdır. Empedans anahtarlamalı sınırlayıcılar, sınırlama empedansının paralel bağlı anahtarlarla arıza anında devreye alınması prensibiyle çalışmaktadır. Bu devrelerde yarıiletken anahtarlar yüksek gerilimlere maruz kalmakta olup, ZnO varistör ve sönümleyici uygulaması yapılması gerekmektedir [50].

Rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcılar; seri rezonans, paralel rezonans veya iki rezonans olayının da birlikte kullanıldığı devrelerdir [51]. Seri rezonans

topolojilerinde, şebeke frekansında rezonansı sağlayacak büyüklüklerde belirlenen bobin ve kondansatör normal çalışma koşullarında ihmal edilebilir bir gerilim düşümü oluşturarak sistemde yer almaktadır [52]. Kısa devre arızasıyla birlikte, iki elemandan birisi devre dışı bırakılarak arıza akımı endüktif veya kapasitif reaktansla sınırlanmaktadır [53], [54]. Paralel rezonans tipi katı hal sınırlayıcılarda, şebeke frekansında rezonansı oluşturacak büyüklükte olan paralel bağlanmış bobin ve kondansatörden arıza anında elde edilen yüksek empedans ile arıza akımının yükselişi bastırılmaktadır [55], [56]. Katı hal olmayan çeşitli arıza akımı sınırlayıcılarda da paralel rezonanstan sınırlama empedansı olarak faydalanılmaktadır [57]–[59].

Arıza akımlarının sınırlanmasına çözüm önerisi olarak birçok katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre önerilmiştir. Prototip uygulamaları ve simülasyon çalışmaları ile topolojilerin sağladıkları avantajlar ortaya konulmuştur [60]. 110 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen prototip çalışmasında, endüktans değeri 100 mH olan bobin normal çalışmada köprü diyot ile DC modda ve arıza durumunda AC moda alınarak kullanılmıştır. Anahtarlama aşırı gerilimlerinin düşürülerek yarıiletkenlerin korunabildiği devre ile 22 A'lik arıza akımı 5 A'e sınırlanmıştır [61]. Farklı değerlerde sınırlama dirençlerinin arıza akımının seviyesine bağlı olarak devreye alındığı üç fazlı köprü tipi sınırlayıcı ile sınırlayıcısız durumda 275 A'e yükselmesi beklenen arıza akımı 20 A'de bastırılırken, yarıiletken anahtarların ömrünün uzatılabileceği ve güç kayıplarının düşürülebileceği gösterilmiştir [62]. Başka bir çalışmada, akım sınırlama reaktansı olarak kullanılan bobinin büyüklüğünü ve maruz kaldığı akım seviyesini düşürmek amacıyla seri bağlı direncin anahtarlandığı devre sayesinde arıza akımı yaklaşık 40 A'de sınırlanmıştır [63]. Sınırlama direncinin uygulandığı prototip, üç faz-toprak ve iki faz-toprak arızalarında 3 A'in üzerine çıkan arıza akımını 0,75 A'in altına düşürülebilmiştir [64]. Paralel rezonans bobinine seri olarak bağlanan tristörler ile arıza anında empedans büyüklüğü kontrol altına alınabilen devre için yapılan simülasyon çalışmasında, arıza akımı 2,5 kA seviyesinden yaklaşık 700 A'e indirilmiştir [65]. Laboratuvar ortamında küçük ölçekli prototipi geliştirilen seri rezonans tipi sınırlayıcı, hava nüveli sınırlama bobini ile sınırlayıcısız durumda 650 A'e yükselen arıza akımını 350 A seviyesinde tutabilmiştir [66]. Bir başka çalışmada, arıza

akımlarının dışında ani yük değişimlerinde meydana gelen aşırı akımlara karşı da etkili olan köprü tipi sınırlayıcı, arıza akımını %55 oranında sınırlamıştır [67]. Dağıtık üretim tesislerinin şebekeye bağlandığı barada uygulanan seri rezonansın yer aldığı tek yönlü arıza akımı sınırlayıcı ile şebeke tarafındaki aşırı akım rölelerinin koordinasyonu korunurken, arıza akımı %50 oranında sınırlanabilmiştir [68].

Kısa devre arızasıyla birlikte yükselen arıza akımları bara gerilim seviyelerinde düşüşlere ve çökmelere neden olmaktadır. Özellikle dağıtık üretim tesislerinin şebekeye bağlandığı baralar ile hassas yüklerin bulunduğu baralarda gerilim seviyesindeki değişimler ciddi problemlere neden olabilmektedir. Bu nedenle, gerilim seviyeleri ile ilgili kıstaslar bazı ülkelerin elektrik şebeke yönetmeliklerinde de yer almaktadır. Öyle ki, Danimarka'da rüzgar enerji santrallerinin OKN gerilim seviyesinin nominal değerin %20'sinin üzerinde kalmasına izin verilmekte olup, bir gerilim çökmesi durumunda tesis şebekeden ayrılmaktadır. Almanya ve İspanya'nın şebeke yönetmeliklerinde ise arıza durumunda 0,15 s içerisinde sıfır düzeyine inen gerilimin yükseltilmesi gerektiği bildirilmektedir [69].

Arıza esnasında ortak kuplaj noktasındaki gerilim düşüşlerinin iyileştirilebilmesi amacıyla çeşitli katı hal sınırlayıcılar geliştirilmiştir [70]. Yüksek değerli bobinin devreye alınarak arıza akımının sınırlandığı topoloji, bara geriliminde sınırlayıcısız durumda oluşan %73'lük gerilim düşüşünü önleyerek nominal seviyesine yaklaştırılmasını sağlamıştır [71]. 110 V'luk efektif gerilim düzeyi için oluşturulan sınırlayıcı prototipi ile arıza akımı yaklaşık 4 A'de bastırılmış ve devre kesici özelliği sayesinde gerilim düzeyi 1 pu'te sürdürülmüştür [72]. Arıza akımının 56 μF'lık kondansatörün sağladığı kapasitif reaktansla sınırlandığı seri rezonans tipi sınırlayıcı, arıza anında OKN gerilimini nominal değerine yakın bir düzeye çekebilmiştir [73]. Rüzgar enerji santralinin şebekeye bağlandığı 66 kV'luk gerilim seviyesinde uygulanan endüktif ve önerilen kapasitif köprü tipi sınırlayıcılar oluşturulan simülasyon modelinde karşılaştırılmış olup, kapasitif sınırlayıcının bara gerilimindeki düşüşlere daha büyük katkı verdiği ortaya konulmuştur [74]. Bir başka çalışmada, sabit hızlı rüzgar türbini generatörünün aşırı gerilimleri kullanılan katı hal sınırlayıcı ile %5'in altına indirilmiştir [75]. Çift beslemeli indüksiyon generatörlü (DFIG) rüzgar çiftliği için tasarlanan sınırlayıcıda, kondansatörü arıza

sırasında baypas etmek için yarıiletken anahtar yerine metal oksit varistör uygulanmış ve şebekeye bağlantı noktasındaki gerilim çökmesi önlenmiştir [76].

Katı hal arıza akımı sınırlayıcılar sistemin geçici kararlılığının yükseltilmesine de katkı sunmaktadırlar. Köprü tipi sınırlayıcıda bulunan direncin arıza anında paralel bağlı yarıiletken anahtarla devreye alınmasıyla, enerjinin absorbe edilmesi sağlanmış ve bu sayede senkron generatörün geçici kararlılık karakteristiği iyileştirilmiştir [77]. Lyapunov fonksiyonu ve statik nonlineer kontrollü paralel rezonans tipi sınırlayıcılar, üç faz-toprak ve faz-toprak arızalarında sistemin toplam kinetik enerji durumuna etkileri bakımından mukayese edilmiş ve Lyapunov kontrolünün daha iyi bir performans sağladığı ortaya konulmuştur [78]. Hibrid bir güç sisteminde 66 kV gerilim seviyesinde paralel rezonans tipi sınırlayıcının uygulandığı simülasyon çalışmasında, DFIG ve senkron generatörün rotor hızları, güçleri ve bara gerilimleri geçici kararlılık parametreleri olarak ele alınmış ve sınırlayıcının kararlılığının yükselmesini sağladığı gösterilmiştir [79]. Rüzgar çiftliğinin bağlandığı barada 20 kV'luk gerilim seviyesinde uygulanan paralel rezonanslı sınırlayıcı ile üç faz-toprak arızasında bara gerilimi ve DFIG rotor hızı daha kararlı hale getirilmiştir [80].

Arıza akımı sınırlayıcıların güç sistemlerinde uygulanmaları bir yatırım maliyeti gerektirmekte olup, etkinlikleri sınırlayıcı sayısı ve konumuna bağlı olarak değişmektedir [81]. Bu nedenle, sistemde ihtiyaç duyulan sınırlayıcı sayısı, boyutları ile en uygun konumlarının belirlenebilmesi ve minimum maliyetle en yüksek arıza akımı sınırlama performansının sağlanabilmesi için çeşitli optimizasyon yöntemleri geliştirilmektedir.

Bağışıklık algoritması tabanlı Pareto çok amaçlı optimizasyon yönteminin IEEE'nin 39 baralı sisteminde uygulandığı çalışmada, sınırlayıcı maliyeti ve arıza akımı sınırlama oranı bakımından optimum sınırlayıcı konumları belirlenmiştir [82]. Dağıtık üretim tesislerinin şebekeye dahil olmasıyla yükselen arıza akımları nedeniyle yenilenmesi gereken koruma elemanlarının maliyeti ile sistemde farklı sayı, konum ve empedanslarda katı hal sınırlayıcı uygulanmasının maliyeti karşılaştırmalı olarak İran'daki 13 baralı bir sistem için analiz edilmiştir [83]. Başka bir çalışmada, dağıtık üretimlerin yer aldığı IEEE'nin 33 ve 69 baralı sistemlerinde parçacık sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritması ile arıza akımlarının

sınırlanabilmesi için gerekli olan direnç gösteren arıza akımı sınırlayıcı sayısı, boyutu ve konumları tespit edilmiştir [84]. Etkinlik değeri ile genetik algoritmanın arama alanının düşürüldüğü çalışmada, farklı boyutlardaki sistemlerde sınırlayıcılar için optimum lokasyon ve empedans değerleri belirlenmiştir [85]. Dağıtık üretim birimlerinin optimum boyutu ve konumu ile kullanılması gereken minimum sınırlayıcı empedansının, baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma ile eş zamanlı olarak belirlendiği yöntem IEEE'nin 9 baralı ve 33 baralı sistemlerinde test edilerek, dağıtık üretimlerin uygun bölgelere yerleştirilmesi ile sınırlayıcı boyutlarının düşürülebileceği ortaya konulmuştur [86]. Arıza akımları, güvenilirlik ve arıza akımı sınırlayıcıların sayısı ile empedansları çok amaçlı fonksiyonda ele alınarak, farklı güç sistemlerinde pareto-optimal sınırlayıcı boyut ve konumları sunulmuştur [87]. Direnç gösteren süperiletken arıza akımı sınırlayıcının elektrotermal özellikleri modellenerek, ele alınan test sisteminde üç farklı noktada arıza gerçekleşmesi durumunda arıza akımlarını istenilen seviyeye sınırlamak için gerekli direnç değeri hesaplanmıştır [88]. Bir başka çalışmada, doğrusal olmayan karışık tamsayı programlama yöntemi ile IEEE'nin 9 baralı ve 30 baralı sistemlerinde, arıza akımlarını farklı seviyelere düşürebilmek için optimum sınırlayıcı sayısı belirlenmiş ve optimum yerleşim yerleri ile boyutları tayin edilmiştir [89].

1.2 Tezin Amacı

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızalarında, arıza akımlarının sistemdeki mevcut cihazların akım dayanımlarının üzerine çıkması ciddi bir problemdir ve hem teknik hem de ekonomik açıdan maliyetli sonuçları ile karşılaşılmaktadır. Bu tez çalışmasında, tüm kısa devre arıza tiplerinde yüksek arıza akımlarını güvenli bir seviyede sınırlayabilen, basit yapısı, kolay kontrol edilebilmesi, uygulanabilir ve güvenilir olması gibi birçok avantajlı özelliği bulunan, özgün bir katı hal arıza akımı sınırlayıcı devrenin tasarımının gerçekleştirilmesi ve laboratuvar ortamında üç fazlı alçak gerilim prototipinin oluşturulması amaçlanmıştır.

Kısa devre arızalarında yükselen arıza akımıyla birlikte bara gerilimlerinde önemli düşüşler oluşmaktadır. Baralara bağlanan hassas yükleri etkileyen ve dağıtık üretim

tesislerinin şebekeye bağlandığı baralarda meydana gelmesi durumunda sistemden ayrılmasına neden olan, bu güç kalitesi problemine de çözüm aranmıştır. Geliştirilen seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı ile yüksek arıza akımlarının sınırlanmasının haricinde, ikinci bir fonksiyon olarak arıza anında ortak kuplaj noktası barası geriliminin nominale yakın bir düzeyde sürdürülebilmesi hedeflenmiştir. Böylece, arıza durumlarında görülen bir güç kalitesi sorunu da SPR-AAS ile giderilmiş olacaktır.

SPR-AAS'nin arıza akımı sınırlama ve OKN gerilim kararlılığını koruma performanslarının literatürde önerilmiş diğer paralel rezonans tipi sınırlayıcılara göre de avantajlı olmasına çalışılmıştır. Bunların yanı sıra, tasarım parametreleri olarak belirlenen arıza anında sınırlayıcı üzerinde oluşan anlık maksimum güç kayıpları, sınırlayıcının enerji tüketim kapasitesi, yarıiletken anahtarlarının maruz kaldığı en yüksek gerilim ve akım değerleri bakımından da elverişli bir devre yapısı ortaya konulmasına odaklanılmıştır.

Literatürde önerilen katı hal arıza akımı sınırlayıcıların genellikle alçak gerilim seviyesinde tek faz prototipleri oluşturularak, tek faz arızası için akım sınırlama etkinlikleri incelenmektedir. Önerilen SPR-AAS'nin fazlar arası 380 V gerilim seviyesi için üç fazlı alçak gerilim prototipi ve test devresi oluşturulup, iki ve üç fazlı arıza durumlarındaki arıza akımı sınırlama kapasitesinin görülebilmesi sağlanmıştır. Uygulama devresinden elde edilen arıza akımı verilerinin, prototip ve test devresi elemanlarının gerçek büyüklükleri ile oluşturulan simülasyondan ulaşılan sonuçlar ile uyumlu olması beklenmiştir.

1.3 Hipotez

Güç sistemlerinde kısa devre arıza akımları enterkonnekte sistemin genişlemesi, dağıtık üretim tesislerinin şebekeye entegrasyonunun yoğunlaşması ve güç talebinin artması gibi nedenlerden dolayı yükselmektedir. Arıza akımlarının mevcut devre kesicilerin kesim kapasitesinin üzerine çıkması, sistemi yüksek akımlardan korumak için kullanılan bu cihazları ve diğer sistem bileşenlerini tehdit etmekte olup, sistem güvenilirliğini zayıflatmaktadır. Kapasitesi aşılan her kesicinin daha yüksek dayanımlı bir yenisiyle değiştirilmesinin ciddi bir yatırım maliyeti gerektirmesi, bu sorunun başka yöntemlerle çözülmesini gerekli kılmaktadır. Klasik

arıza akımı sınırlama yöntemlerinin normal çalışma koşullarında güç sistemi üzerinde gerilim düşümü, güç kaybı ve kararsızlık gibi kritik etkilerinin olması, arıza dışı durumlarda sistemin çalışmasına etkisi ihmal edilebilecek kadar az olan daha kararlı ve yüksek performanslı sınırlayıcılara ihtiyacı arttırmaktadır.

Katı hal arıza akımı sınırlayıcılar, yarıiletken teknolojisinin uygulandığı gerilim ve akım seviyesinin yükselmesi ile birlikte sıklıkla önerilmeye başlanmıştır. Arıza akımlarını sınırlama dışında diğer sistem parametreleri üzerinde de etkili olabilen sınırlayıcı devrelerdir. Bu tez çalışmasında önerilen SPR-AAS'nin güç sistem uygulamalarında sağlaması beklenen katkılar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

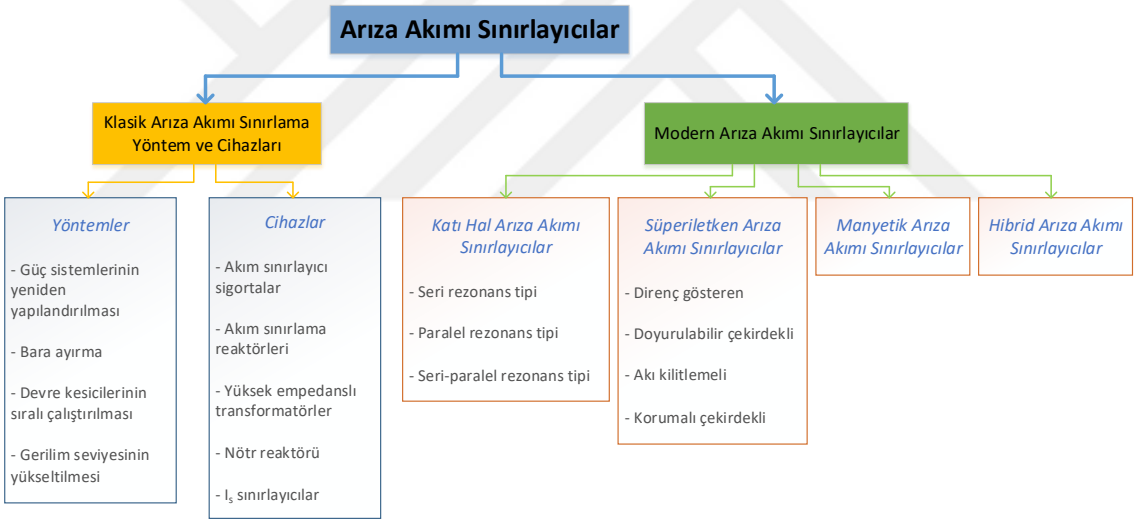
- Önerilen SPR-AAS seri rezonans yapısı sayesinde, normal işletim şartlarında herhangi bir güç kaybı ve gerilim düşümüne neden olmadan sistemde yer alacaktır. Arıza dışı durumlarda, sistem kararlılığına herhangi bir etkisi olmayacaktır.
- Tüm simetrik ve asimetrik kısa devre arızalarında SPR-AAS ile arıza akımları etkin bir şekilde sınırlanabilecektir. Farklı arıza tiplerinde arıza akımlarının sınırlandığı seviyelerin oldukça yakın olması sayesinde, daha ekonomik ve uygulanabilir bir tasarım sağlanacaktır.
- Kısa süreli geçici arızalarda, SPR-AAS paralel rezonans empedansını sisteme dahil ederek arıza akımlarını sınırlayacaktır. Geçici olmayan arızalarda ise arıza akımını sınırlayarak, devre kesicinin yüksek arıza akımlarına maruz kalmadan açtırılması gerçekleştirilecektir. Böylece, devre kesici başta olmak üzere diğer sistem elemanlarının arızalanma ve ömür kısalması durumlarının oluşması önlenecektir.
- SPR-AAS ile geçici arıza durumlarında arıza akımları sınırlanırken aynı zamanda ortak kuplaj noktası gerilim kararlılığı korunacaktır. Dağıtık üretim birimlerinin şebekeye bağlandığı baralarda uygulandığında, arıza anında gerilim seviyesinin düşmesinden dolayı tesisin sistemden ayrılması önlenebilecektir. Hassas yüklerin bağlı olduğu baralarda SPR-AAS kullanılarak, arıza esnasındaki gerilim değişimlerinden etkilenmeleri engellenecektir.

- SPR-AAS, arıza süresince enerji tüketimi sağlayarak generatörlerin geçici kararlılık karakteristiklerini iyileştirecektir.
- SPR-AAS'nin yarıiletken anahtarlarının maruz kaldığı akım ve gerilim düzeyinin tüm kısa devre arızalarında makul bir düzeyde kalması sayesinde, güvenilir ve ekonomik bir katı hal sınırlayıcı tasarımı sağlanabilecektir.

Seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcının, normal koşullarda ve arıza durumlarında gösterdiği çalışma performansının yanı sıra sağladığı avantajlarla güç sistemlerinde uygulanabilir bir sınırlayıcı modeli olduğu gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve alçak gerilim prototip uygulaması ile ortaya konulmuştur.

2
GÜÇ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ARIZA AKIMI SINIRLAMA YÖNTEMLERİ

Güç sistemlerinde çeşitli nedenlerden kaynaklanan kalıcı veya geçici kısa devre arızaları meydana gelmektedir. Kısa devre arızaları simetrik ve asimetrik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Üç faz ve üç faz-toprak arızaları simetrik arızalar iken, iki faz, iki faz-toprak ve faz-toprak arızaları ise asimetrik arızalardır. Güç sistemlerinde en sık karşılaşılan arıza tipi faz-toprak arızasıdır. Ancak, sistemi en çok zorlayan arıza üç faz arızasıdır. Bundan dolayı, elektrik tesislerinde mekanik ve ısıl kararlılığı sağlayabilmek ve aşırı akım koruma elemanlarının kesim kapasitelerini tayin edebilmek için üç faz arızasında oluşan kısa devre akımları dikkate alınmaktadır [1].



Şekil 2.1 Arıza akımı sınırlayıcılar

Kısa devre arıza akımları sistem bileşenleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Hat akımının nominal değerinden bir anda çok yüksek seviyelere çıkması; devre kesiciler, transformatörler ve iletim hatlarının mekanik ve ısıl bakımdan zorlanmasına sebep olmaktadır. Bu durum, güç sistemi elemanlarının arızalanmasına veya ömürlerinin kısalmasına yol açabilirken, uzun vadede yüksek maliyetli ekipman değişimlerine ve bunu gerçekleştirmek için ise uzun sürelere ihtiyaç duyulmaktadır. Arızalanan ekipmanlardan kaynaklı uzun süreli enerji kesintileri meydana gelmekte ve bu durum üretim kaybı ile ekonomik zararlara

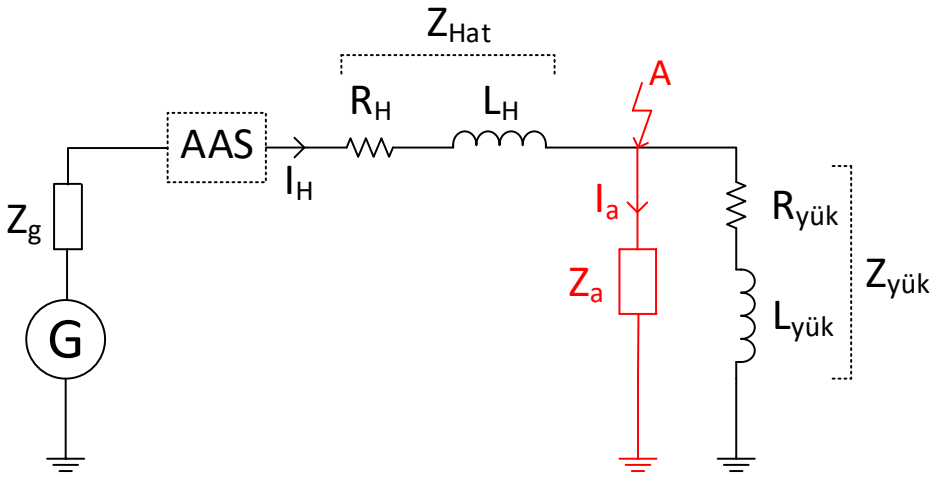
neden olmaktadır. Bu nedenle, arıza akımlarının seviyesini sistem için güvenli bir düzeye çekmek için çeşitli yöntemler ve cihazlar geliştirilmektedir. Güç sistemlerinde kullanılan arıza akımı sınırlama yöntem ve cihazları Şekil 2.1'de verilmiştir.

Bu bölümde, geçmişten günümüze uygulanan klasik arıza akımı sınırlama yöntemleri tanıtılarak, modern yöntemlerden katı hal arıza akımı sınırlayıcılar, süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar ile manyetik arıza akımı sınırlayıcıların yapısı ile çalışma prensipleri detaylıca aktarılmıştır.

2.1 Kısa Devre Arıza Akımları

Bir kısa devre arızasının gerçekleşmesi, sistem empedansının düşmesine neden olmaktadır. Arıza akımlarının seviyesi empedansın büyüklüğündeki değişime bağlı olduğundan, empedansın azalmasının engellenebildiği oranda arıza akımının da daha yüksek değerlere çıkması önlenebilmektedir. Arıza akımı sınırlama yöntemleri bu perspektifle geliştirilmekte ve güç sistemlerinde ihtiyaç duyulan bölgelere uygulanmaktadır.

Şekil 2.2'de generatör, iletim hattı ve yükten oluşan temel bir güç sistemi gösterilmektedir. Generatör ile iletim hattı arasına arıza akımı sınırlayıcı konumlandırılmıştır. Normal şartlarda hat akımı I_H iken, A noktasında gerçekleşen kısa devre arızası ile birlikte I_a arıza akımı oluşmaktadır.



Şekil 2.2 Kısa devre akımına AAS'nin etkisi

Normal işletimdeki hat akımı,

$$I_H = \frac{V_G}{Z_g + Z_H + Z_{yük}} \quad (2.1)$$

olarak yazılabilir. Burada, V_g generatör gerilimini, Z_g generatör empedansını, Z_H hat empedansını ve $Z_{yük}$ ise yük empedansını ifade etmektedir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi A noktasında bir kısa devre arızasının gerçekleşmesiyle, yük empedansı devre dışı kalmaktadır. Bu durumda meydana gelen arıza akımının büyüklüğü (2.2) ifadesi ile tanımlanabilir.

$$I_A = \frac{V_G}{Z_g + Z_H + Z_a} \quad (2.2)$$

Arıza anında yük empedansının A noktası ile toprak arasında oluşan ve yüke göre çok küçük bir değere sahip olan Z_a arıza direnci ile kısa devre edilmesi neticesinde, arıza akımı hızlıca I_A düzeyine yükselmektedir. Bu nedenle, arıza anında sınırlama empedansı büyüklüğü Z_{AAS} olan arıza akımı sınırlayıcının yüksek empedansı sisteme dahil edilerek, arıza akımının sistem bileşenlerine zarar verebilecek veya sistem kararlılığını bozabilecek bir seviyeye çıkması önlenebilmektedir. (2.3) ifadesi ile ise arıza akımı sınırlayıcı uygulanması durumundaki arıza akımının değeri belirlenebilmektedir.

$$I_{A(AAS)} = \frac{V_G}{Z_g + Z_{AAS} + Z_H + Z_a} \quad (2.3)$$

Arıza akımının sınırlandığı seviye kullanılan Z_{AAS}'nin büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Ancak, arıza akımı sınırlayıcı uygulaması gerçekleştirildiğinde yük empedansının eksikliği sınırlama empedansı ile telafi edilebilmekte ve $I_{A(AAS)} << I_a$ olması sağlanabilmektedir.

2.2 Kısa Devre Arıza Akımlarını Sınırlama Yöntemleri

Arıza akımlarını sınırlamak için kullanılan yöntemler, klasik arıza akımı sınırlama teknikleri ve modern arıza akımı sınırlayıcılar olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Klasik olarak tanımlanan yöntemler, çeşitli elemanlar ve cihazlar ile güç sisteminde yapılan düzenlemeler şeklinde uygulanırken, modern yöntemler ise cihaz olarak geliştirilmektedir.

Arıza akımı seviyelerinin sürekli olarak yükselmesi ve bazı bölgelerde mevcut sistemin dayanım seviyesinin üzerine çıkılması, birçok dezavantaja sahip olan klasik

yöntemlerden uzaklaşılmasını ve yeni çözümlerin üretilmesini gerekli hale getirmiştir. Arıza dışı durumlarda da sistem üzerinde gerilim düşümü, güç kaybı ve gerilim kararsızlığı gibi etkileri olan klasik yöntemler, farklı kısa devre arızalarına çok verimli çözümler sunamamakla birlikte, sistem güvenilirliği ve enerjinin sürekliliği bakımından da oldukça yetersiz kalmaktadır.

Devre yapıları, çalışma prensipleri ve kontrol gereksinimleri birbirinden farklı birçok farklı tipte arıza akımı sınırlayıcı önerilmektedir. Sınırlayıcı devrelerin akım sınırlama performansı ve güç kalitesine etkilerini optimize etme çabaları, normal durumda ve arıza anında etkin ve sağlıklı çalışan sınırlayıcı olan "ideal arıza akımı sınırlayıcı" tanımının ortaya çıkmasına neden olmuştur. İdeal bir arıza akımı sınırlayıcıdan, normal çalışma ve arıza durumunda beklenen özellikler [90],

- Normal çalışma koşullarında sistem üzerinde sıfır veya sıfıra yakın bir empedans göstermesi,
- Arıza dışı durumlarda gerilim düşümü ve güç kaybına neden olmaması,
- Arıza durumunda, arıza akımını güvenli seviyeye düşürecek olan empedans büyüklüğünü sisteme dahil edebilmesi,
- Arızaya hızlı tepki verebilmesi,
- Arıza sonuçlandıktan sonra hızlı ve sağlıklı bir toparlanma sağlaması,
- Güvenilir olması ve tüm arıza tiplerinde verimli olarak çalışabilmesi,
- Düşük maliyetli olması,
- Benzer cihazlardan daha küçük boyutlu ve uygulanabilir olması,

olarak sıralanabilir.

2.2.1 Klasik Arıza Akımı Sınırlama Yöntemleri

Kısa devre arıza akımlarını daha güvenli bir düzeye çekebilmek için birçok klasik arıza akımı sınırlama yöntemi kullanılmaktadır. Akım sınırlayıcı sigortalar, akım sınırlama reaktörleri, yüksek empedanslı transformatörler, nötr reaktörü ve I_s sınırlayıcılar sisteme yeni bir eleman dahil edilerek uygulanan teknikler iken, bara ayırma, devre kesicilerin sıralı çalıştırılması ve gerilim seviyesinin yükseltilmesi gibi

yöntemlerle ise mevcut sistem üzerinde yapılan işletimsel değişikler ile arıza akımı düzeyleri yönetilmektedir.

Arıza akımlarının yükseldiği yeni düzeylere göre devre kesicilerin ve diğer sistem bileşenlerinin yenilenmesi büyük bir yatırım maliyeti gerektirmektedir [91]. Ayrıca, güç talebinin sürekli artışı güç sistemlerinin yeniden yapılandırılmasının ekonomik ve pratik bir çözüm olmasının önüne geçmektedir. Yeni transformatör merkezlerinin kurulumu da arıza akımları ile ilgili sorunları ortadan kaldıran ancak oldukça pahalı ve zaman gerektiren bir uygulamadır [92].

2.2.1.1 Akım Sınırlayıcı Sigortalar

Akım sınırlayıcı sigortalar, arıza akımlarını sınırlamak için kullanılan cihazlardır. Arıza akımını ilk tepe değerine ulaşmadan kesme kabiliyetine sahiptirler [93]. Ancak, tek kullanımlık olmalarından dolayı yüksek arıza akımına maruz kaldıktan sonra değiştirilmeleri gerekliliği en büyük dezavantajlarıdır [8].

2.2.1.2 Bara Ayırma

Bara ayırma işlemi, mevcut bir baranın bölünmesi veya baralar arasında bulunan ayırıcının açılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Arızayı besleyen kaynak sayısını azaltmak için kullanılan bir sınırlama yöntemidir. Bu sayede, bir kısa devre arızası durumunda arıza akımının seviyesi düşürülebilecektir. Sadece arıza anında oluşan akımın büyüklüğünü düşürebilmek için yapılan bu değişiklik, sistemin normal çalışmasını da etkilemektedir. Bu teknikle yükü besleyen kaynak sayısının azaltılması; sistem güvenirlirliğini zayıflatmakta, kayıpların yükselmesine yol açmakta, gerilimlerin düşmesine ve şebeke esnekliğinin etkilenmesine neden olmaktadır [94]. Bara ayırma yönteminin uygulanışı, sistemin işletimi ve kontrolünün bu yönteme uygun olarak yapılabilmesini gerekli kılmaktadır [95].

2.2.1.3 Akım Sınırlama Reaktörleri

Güç sistemlerinde sabit seri reaktör kullanımı en çok tercih edilen arıza akımı sınırlama yöntemidir [96]. Ugulanan seri reaktör, büyüklüğüne bağlı olarak üzerinde gerilim tutmakta ve bu sayede arıza akımının sınırlanmasına katkı sağlamaktadır. Fakat, arıza dışı durumlarda da sistemde yer almaları, sürekli bir gerilim düşümü ve güç kaybı oluşturmalarına neden olmaktadır. Diğer sistem bileşenleri ile de etkileşime geçerek kararsızlığı arttırmakta ve geçici toparlanma

geriliminin yükselmesine de yol açmaktadırlar [95]. Maliyetlerinin düşük olması, az bakım gerektirmeleri ve normal çalışmadaki olumsuz özelliklerine rağmen arıza anında etkili olmaları en temel avantajlarıdır. Dezavantajları ise; güç faktörünün düşmesine neden olmaları, kararlı normal çalışma koşullarında gerilim düşümü yaratmaları, aktif sınırlayıcılar ile karşılaştırıldıklarında düşük bir akım sınırlama performansına sahip olmaları ve kontrol edilebilir olmamaları olarak sıralanabilir [97].

2.2.1.4 Yüksek Empedanslı Transformatörler

Bu yöntemde $\%u_k$ değeri yüksek transformatör kullanılarak, sistem empedansı yükseltilmektedir [11]. Bu sayede, arıza akımı belli ölçüde sınırlanabilirken, empedansın yükselmesi sebebiyle transformatör kayıpları da artmaktadır. Aynı zamanda, transformatör üzerinde gerilim düşümü oluşmakta ve güç kalitesi ile sistem performansı da azalmaktadır [98]. Arıza akımı sınırlama kapasitelerinin düşük olması ve mevcut transformatörlerin $\%u_k$ değeri yüksek olanlarla değiştirilmesinin maliyeti de diğer dezavantajlarıdır [99].

2.2.1.5 Devre Kesicilerinin Sıralı Çalıştırılması

Güç kesicilerinin açılmasının koordine edilerek, arızalı bölgede en yüksek arıza akımında açtırılacak kesicinin akım seviyesinin düşürülmesinin amaçlandığı metodolojidir. Bunun için arıza noktasında bulunan kesicinin arızanın gerçekleşmesi ile birlikte açması, bir kesici açtırma süresi kadar geciktirilir. Bu zaman aralığında, arızanın kaynak tarafında bulunan diğer kesici açtırılır. Daha sonra, arıza bölgesindeki kesici daha düşük bir akım seviyesinde açma işlemini güvenli olarak gerçekleştirebilir. Arıza akımının bir kesici açtırma işlemi süresi gecikme ile kesilmesi ve normalde arızadan etkilenmeyecek fiderlerin de kesicilerin sıralı olarak çalıştırılmasından dolayı enerjisiz kalması bu yöntemin en büyük dezavantajlarıdır [100].

2.2.1.6 I_s Sınırlayıcılar

I_s sınırlayıcılar, ana iletken ve ona paralel bağlı yüksek kesim kapasitesine sahip sigortadan oluşmaktadır. Normal işletimde, hat akımı ana iletken üzerinden taşınmaktadır. Kısa devre arızasıyla oluşan yüksek akım, tetikleme cihazının ana iletkeni açık kontak haline getirmesini sağlamakta ve arıza akımının sigortanın

bulunduğu paralel kola komütasyonu gerçekleşmektedir. Kısa devre akımı 0,5 ms'de sınırlanmakta ve gerilimin ilk sıfır olduğu anda ise kesilmektedir [101]. Arıza akımlarının giderilme süresi bu tipteki sınırlayıcılarda 5-10 ms iken, bu süre devre kesicilerde 90-160 ms'ye kadar uzamaktadır ki bu da kesicilere göre daha hızlı ve etkin çalıştıklarını göstermektedir [102]. I_s sınırlayıcıların en önemli avantajları; arıza dışı durumlarda gerilim düşümü ve güç kaybına neden olmamaları, arıza akımını ilk yükselişinde sınırlayabilmeleri ve güç kalitesine katkı sağlamaları olarak sıralanabilir.

2.2.1.7 Nötr Reaktörü

Güç sistemlerinde en sık görülen arıza tipi olan faz-toprak arızalarına çözüm sağlayan bir yöntemdir. Faz-toprak arızalarında oluşan yüksek arıza akımlarını sınırlandırabilmek amacıyla, transformatörün yıldız bağlantı şekline sahip sekonderinin nötrü doğrudan toprağa bağlı iken, bir empedans üzerinden nötr ve toprak bağlantısı kurulmaktadır. Maliyetine ve sağlanacak faydaya göre belirlenen empedansın yapısı, düşük veya yüksek değerli direnç veya reaktörden oluşabilmektedir.

2.2.2 Modern Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Klasik arıza akımı sınırlama uygulamalarının normal işletim koşullarında sahip oldukları ideal olmayan özellikler, modern arıza akımı sınırlayıcıların geliştirilmesini bir zorunluluk haline getirmektedir. Klasik sınırlayıcılar normal işletim şartlarında güç kaybı, gerilim düşümü, sistem güvenilirliğinin azalması ve gerilim kararsızlığı gibi dezavantajlı durumları oluşturmaktadır. Arıza akımı sınırlama kapasitelerinin her arıza tipi için yeterli ve etkin olmaması, maliyetli ve kalıcı bir çözüm sunamayan bu yöntemlerden uzaklaşılmasına neden olmaktadır. Özellikle arıza dışı durumlarda ideal arıza akımı sınırlayıcı parametreleri bakımından yüksek bir performansa sahip olmaları beklenen modern sınırlayıcıların, arıza akımı sınırlama kapasiteleri ile de tüm arıza tiplerinde aktif ve verimli çalışabilmeleri öngörülmektedir. Arıza anında ise akım sınırlama performanslarının dışında; bara gerilimlerindeki düşüşlerin ve yükselmelerin önlenmesi, geçici kararlılığın iyileştirilmesi, güvenilirliğin yükseltilmesi ve geçici

arızalarda enerji kesintilerinin önüne geçilebilmesi gibi birçok parametre üzerinde de olumlu etkiye sahiptirler.

Modern arıza akımı sınırlayıcılar; süperiletken, manyetik ve katı hal olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Yapıları, çalışma prensipleri, kontrol gereksinimleri ve sağladıkları avantajlar bakımından birbirlerinden oldukça farklı olan bu cihazlar, sistem gereksinimleri doğrultusunda geliştirilmektedirler. İdeal arıza akımı sınırlayıcı özelliklerinin sağlanabilmesinin yanında, uygulanabilir, maliyeti düşük, boyut ve ağırlık bakımından elverişli, uzun ömürlü ve birçok sistem parametresi üzerinde etkili sınırlayıcıların oluşturulabilmesi amaçlanmaktadır.

2.2.2.1 Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Katı hal arıza akımı sınırlayıcılar, sahip oldukları yarıiletken anahtarları ile arıza anında sınırlama empedanslarını sisteme dahil ederek arıza akımlarını sınırlayan devrelerdir. Normal çalışmada, çalışma prensiplerine göre farklı yöntemlerle sistemde gerilim düşümü ve güç kaybına neden olmadan yer almaktadırlar. Bu sınırlayıcılarda kullanılan IGBT, IGCT, GTO ve tristör gibi yarıiletken anahtarlar geliştirilen kontrol devrelerinden elde edilen sinyaller ile arıza anında anahtarlanmaktadır. Devre yapılarına göre üç temel arıza akımı sınırlayıcı tipi bulunmaktadır. Bunlar:

- Rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcılar
- Köprü tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcılar
- Empedans anahtarlamalı katı hal arıza akımı sınırlayıcılardır.

Modern sınırlayıcılar olan katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre tipleri ve çalışma prensipleri ile sağladıkları avantajlar Bölüm 3'te detaylıca açıklanmıştır.

2.2.2.2 Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Süperiletken malzemelerin kullanıldığı ve sahip olduğu fiziksel özelliklerden yararlanılan sınırlayıcılardır. Süperiletkenin kullanım şekline bağlı olarak çalışma prensipleri farklılık gösteren birçok sınırlayıcı devre önerilmektedir [103]–[107]. Direnç gösteren, doyurulabilir çekirdekli, akı kilitlemeli ve korumalı çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcıların çalışma prensipleri detaylıca açıklanmıştır.

- **Direnç gösteren süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar**

Süperiletken malzemelerin kullanıldığı direnç gösteren tipteki sınırlayıcılar, önerilen süperiletkenli sınırlayıcı tasarımlarında önemli bir yer tutmaktadır [108]. Yüksek sıcaklık süperiletken malzemelerin gösterdikleri lineer olmayan elektrik alan (E) - akım yoğunluğu (J) karakteristiği, arıza akımlarını sınırlamak için kullanılabilmelerine imkan sağlamaktadır. Bu malzemeler; süperiletken hal, akı modu ve normal direnç modu olmak üzere üç çalışma moduna sahiptirler [109].

Uygulandığı sistemin normal çalışma koşullarında, direnç gösteren süperiletken arıza akımı sınırlayıcının üzerindeki akım yoğunluğu (J) malzemenin kritik akım yoğunluğu (J_c) değerinin altında olduğundan, sınırlayıcı ihmal edilebilecek bir empedans değerine sahiptir. Akım yoğunluğunun seviyesi kritik akım yoğunluğundan düşük olduğu sürece sınırlayıcı süperiletken modundadır. Kısa devre arızasının yüksek arıza akımı, sınırlayıcı süperiletkenin akım yoğunluğunu kritik düzeyin üzerine taşımaktadır. Bu andan itibaren, malzeme süperiletken modundan çıkmaktadır. Akım yoğunluğundaki artış, süperiletken üzerindeki elektrik alanı da eksponansiyel olarak yükseltmektedir. Bundan sonra, direnç göstermeye başlayan süperiletken malzemenin sıcaklığı da yükselmeye başlamakta ve bu da kritik akım yoğunluğunun düşmesine neden olarak malzeme üzerinde daha da yüksek bir elektrik alanın görülmesine yol açmaktadır. Süperiletkenin bu karakteristiği sayesinde, direnç değeri hızlıca yükselerek arıza akımını sınırlamaktadır. Malzeme sıcaklığı (T), kritik sıcaklık değerini (Tc) aştıktan sonra normal direnç moduna geçmektedir [110].

Bu tipteki sınırlayıcıların güvenilir olabilmesi için aranan özellikler; arıza akımının ilk tepe değerini hızlıca sınırlayabilmeleri, akım sınırlama kapasitelerinin yüksek olması ve art arda oluşabilecek arızalara karşı hızlı toparlanma kabiliyetine sahip olmalarıdır [111]. Direnç gösteren süperiletken arıza akımı sınırlayıcıların en önemli avantajları:

- Normal çalışma koşullarında, güç sistemi üzerinde ihmal edilebilecek kadar küçük bir empedans göstermeleri,
- Süperiletken malzemenin karakteristiği sayesinde herhangi bir kontrol yöntemine ihtiyaç duyulmadan arıza akımlarını sınırlayabilmeleri [112],

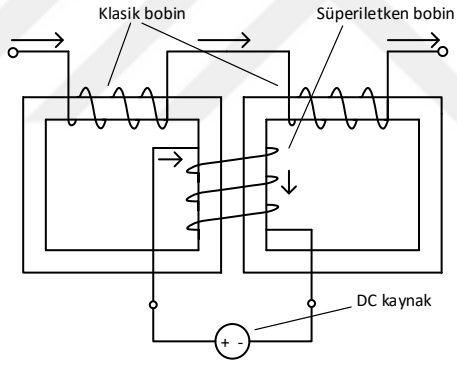
- Arızanın sonlanmasının akabinde, belli bir toparlanma sürecinden sonra sistemde tekrar aktif olarak yer alabilmeleri,

olarak sıralanabilir. Dezavantajları ise aşağıdaki gibi verilebilir:

- Her arızadan sonra tekrar devreye girebilir hale gelebilmesi için; soğutma sistemi kapasitesine, arıza akımının büyüklüğüne ve arıza süresine bağlı olarak değişen ve birkaç saniyeden dakikalara varan toparlanma süresine gereksinim olması [28], [113],
- Yüksek maliyetleri nedeniyle, ticari bakımdan uygulanabilmelerinin zor olmasıdır [114].

➢ **Doyurulabilir çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar**

Arıza akımlarını endüktif reaktansları ile sınırlayan ve süperiletken malzemelerin yer aldığı yapılardır. Doyurulabilir çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı Şekil 2.3'te verilmektedir. Bu sınırlayıcı; süperiletken DC bobin, klasik AC bobinler, demir nüveler ve bir DC kaynaktan oluşmaktadır [115].



Şekil 2.3 Doyurulabilir çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı [115]

Normal çalışmada, klasik bobinler üzerinden geçen akım düşük iken, süperiletken üzerinden geçen DC polarizasyon akımı demir nüveleri doyuma götürmektedir. Alçak manyetik geçirgenliği sayesinde, arıza olmayan durumlarda düşük bir endüktif reaktans göstermektedir. Arızayla birlikte, yüksek arıza akımı nüveleri sırayla doyumdan çıkartmakta ve mıknatıslanma eğrisinde yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bir bölgeye taşımaktadır. Böylece, doyurulabilir çekirdekli süperiletkenli sınırlayıcı yüksek bir reaktans göstererek arıza akımını bastırmaktadır.

Doyurulabilir çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarda, direnç gösteren tipin aksine süperiletken malzemenin sönümlenmesine gereksinim yoktur. Çalışma prensibi ve devre yapısı aynı olmakla beraber; süperiletkenin sönümlemesini engellemek, sınırlama kapasitesini yükseltmek ve daha küçük boyutlu elemanlarla aynı performansı elde ederek maliyeti düşürmek amacıyla, DC kaynağa seri bir anahtarla polarizasyon akımının kontrol edilmesi de önerilen bir yöntemdir [116], [117].

Doyurulabilir çekirdekli süperiletken sınırlayıcıların sağladıkları avantajlar:

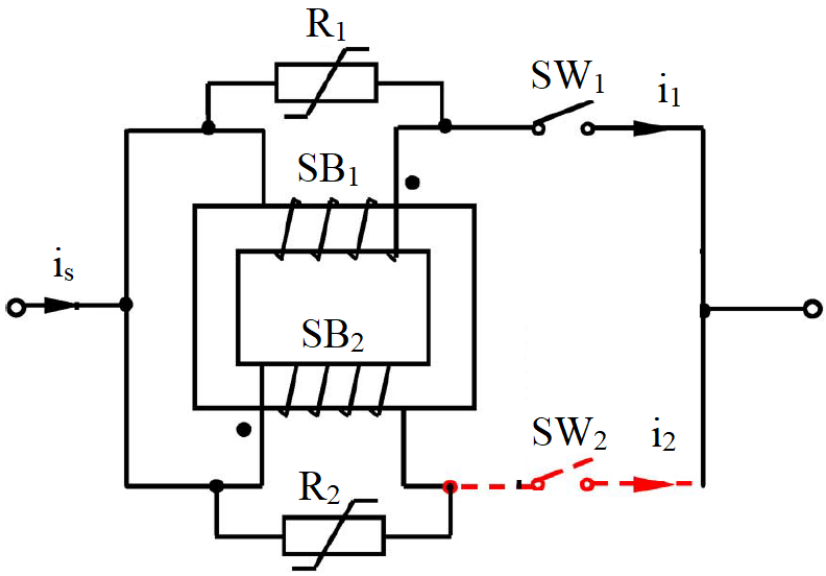
- Normal işletim koşullarında düşük ve arıza durumunda yüksek bir empedans sağlamaları [118],
- Kendinden uyartımlı olarak çalışmaları ve DC kaynağın bir anahtarla kullanılmadığı yapılarda herhangi bir kontrole ihtiyaç duyulmaması,
- Manyetik nüvelerin doyuma girip çıkmasına bağlı olarak bir empedans elde edilmesi dolayısıyla, süperiletken malzemenin sönümlenmesine gerek kalmaması ve arızanın ardından bir toparlanma süresine ihtiyaç duymadan sürekli çalışmaya hızlıca dönebilmesi [119],
- Süperiletken bobin ile güç kayıplarının düşürülmesi,

olarak verilebilir. Dezavantajları ise:

- Boyutlarının büyük ve ağır olması [120],
- Maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

➢ **Akı kilitlemeli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar**

Akı kilitlemeli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar, süperiletken malzemenin kullanıldığı başka bir sınırlayıcı tipidir ve devresi Şekil 2.4’ te verilmektedir.



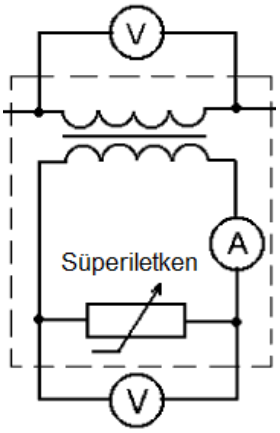
Şekil 2.4 Akı kilitlemeli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı [121]

Bu sınırlayıcılar; iki süperiletken bobin (SB_1 ve SB_2), iki metal oksit varistör (R_1 ve R_2), bir demir nüve ve iki anahtardan (SW_1 ve SW_2) oluşmaktadır [122]. Normal işletimde, SW_1 ve SW_2 anahtarları kapalıdır ve bobinler süperiletken modundadır. Her iki bobinin de ürettiği akı birbirini etkisiz kılar ve üzerlerinde sıfıra yakın bir gerilim düşümü vardır. Bu sayede, hat akımının yarısını geçirirler ve arıza olmadığı sürece sistemde empedans göstermeden yer alırlar.

Bir arıza gerçekleşmesi durumunda, SW_1 anahtarı hızlıca açılarak kuplaj bozulur ve yükselen empedansla birlikte arıza akımı sınırlanır. Gerekli olması durumunda, diğer anahtar da daha sonra açılmaktadır. Bu devrede, süperiletkenlerin oluşturduğu sadece direnç veya sadece endüktif reaktansla arıza akımı sınırlanmamaktadır. Sınırlama empedansı; SB_1 ve SB_2 bobinlerinin öz indüktans değerleri ile R_1 kullanılarak hesaplanabilmektedir [121].

- **Korumalı çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar**

Korumalı çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarda süperiletken malzeme direnç gösteren süperiletken sınırlayıcılar gibi kullanılmakta ve soğutma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Korumalı süperiletkenli arıza akımı sınırlayıcı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

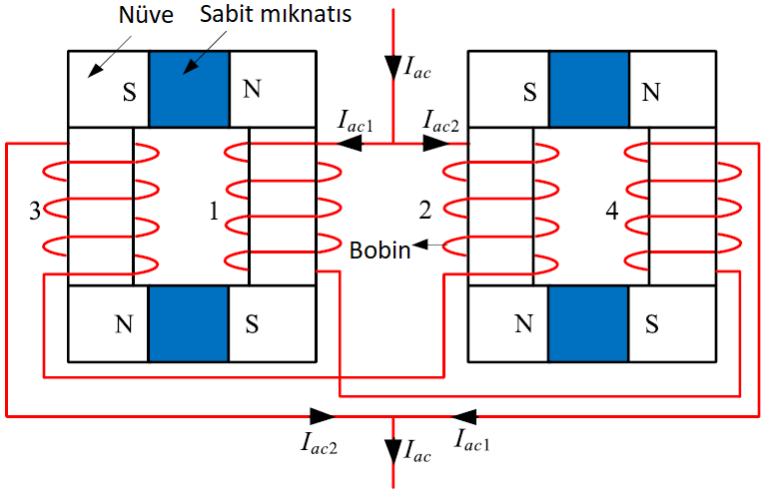


Şekil 2.5 Korumalı çekirdekli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı [32]

Sınırlayıcının primer sargısı hat üzerinde seri olarak bağlıdır ve süperiletken sekonder sargıda yer almaktadır. Genellikle yüksek sıcaklık süperiletken bir silindir olarak uygulanmaktadır [123], [124]. Kritik akım yoğunluğunun üzerine çıkan arıza akımıyla birlikte süperiletken direnç karakteristiği göstermeye başlamaktadır. Böylece, primer sargının da endüktif reaktansının yükselmesi sağlanarak arıza akımı sınırlanmaktadır.

2.2.2.3 Manyetik Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Nüve, bobin ve sabit mıknatıslar kullanılarak geliştirilen bir sınırlayıcı modelidir. Nüvelerin doyum durumunun değişmesi sağlanarak, sistem üzerinde arıza akımını sınırlayabilecek bir empedansın ortaya çıkması hedeflenmektedir. Sabit mıknatıslı manyetik arıza akımı sınırlayıcı yapısı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.

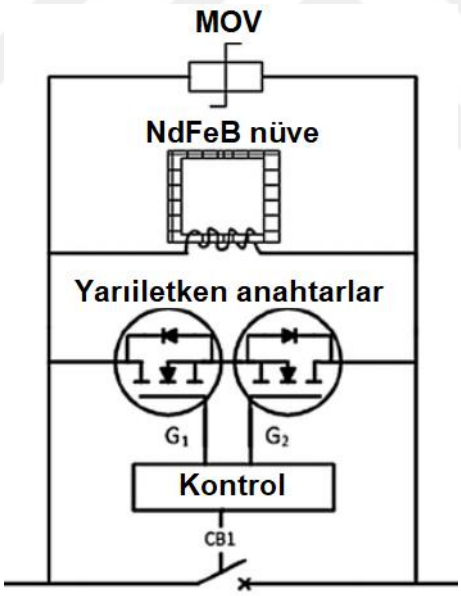


Şekil 2.6 Sabit mıknatıslı manyetik arıza akımı sınırlayıcı [125]

Bir kısa devre arızası gerçekleşene kadar, sabit mıknatıslar ikişer bobine sahip her iki nüveyi de doyumda tutmaktadır. Bu halde, nüveler hava nüveli gibi davranır ve çok düşük bir manyetik geçirgenliğe sahiptirler. Dolayısıyla, normal çalışma şartlarında uygulanacakları sistem üzerinde nüveler düşük bir endüktif reaktans değeri göstermektedir. Kısa devre arızası sonrasında, arıza akımının alternansına bağlı olarak nüveler sırasıyla doyumdan çıkmaktadır ve doyumdan çıkan nüve yüksek bir manyetik geçirgenliğe sahip olduğundan akım sınırlayıcı büyüklükte bir endüktif reaktans oluşturmaktadır. Arıza anındaki sınırlayıcı endüktansın değeri, doyumdan çıkan nüvenin reaktansı ile doyumdaki diğer nüvenin reaktansları toplamının yarısıdır [125].

2.2.2.4 Hibrid Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Süperiletken, katı-hal ve manyetik arıza akımı sınırlayıcı özelliklerinin bir arada kullanıldığı sınırlayıcı tipleridir. Hibrid bir sınırlayıcı olan neodimyum arıza akımı sınırlayıcı devresi Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Neodimyum hibrid arıza akımı sınırlayıcı [20]

Normal işletim koşullarında CB_1 devre kesici kapalıdır ve hat akımı üzerinden taşınmaktadır. Yarıiletken anahtarlar olan G_1 ve G_2 arıza dışı durumlarda kesimde tutulmaktadır. Sistemde kısa devre arızasının tespit edilmesiyle birlikte, öncelikli olarak yarıiletken anahtarlar iletime alınmaktadır. Böylece, devre kesicinin maruz kaldığı arkın azaltılarak uzun ömürlü kullanımının sağlanması amaçlanmaktadır.

Devre kesici açtırılırken arıza akımının sadece yarıiletken anahtarlar üzerinden geçmesine izin verilmektedir. Devre kesicinin açmasıyla yarıiletken anahtarlar da kesime alınarak, arıza akımı NdFeB nüvenin bulunduğu kola yönlendirilmektedir ve yüksek empedansı ile arıza akımı sınırlanmaktadır. Arızanın ardından, devre kesici yine kapalı konuma alınarak kararlı çalışma durumuna geçilmesi sağlanmaktadır [20].

3
KATI HAL ARIZA AKIMI SINIRLAYICILAR VE ÖNERİLEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICI

Bu bölümde, literatürde önerilmiş katı hal arıza akımı sınırlayıcı devreler tanıtılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında önerilen seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devrenin çalışma prensibi, kontrol yöntemi ve matematiksel modellemesi detaylıca açıklanmıştır.

3.1 Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı Devreler

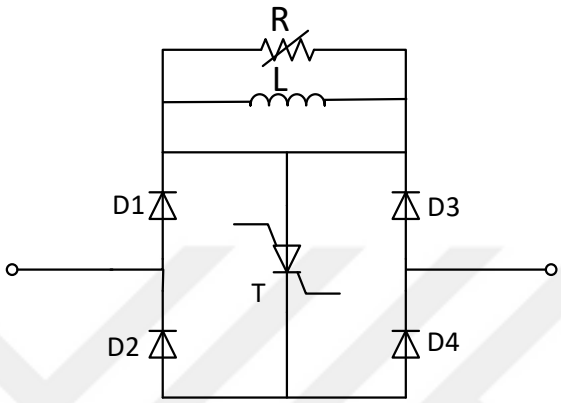
Katı hal arıza akımı sınırlayıcıların diğer modern sınırlayıcılar gibi normal çalışma ve arıza modu olmak üzere iki çalışma zamanı bulunmaktadır. Bunlar arasında geçiş, devrelerde kullanılan IGBT, IGCT, GTO ve tristör gibi yarı iletken anahtarların kontrol algoritmaları ile anahtarlanmasıyla sağlanmaktadır. Normal çalışma koşullarında, devrenin yapısına bağlı olarak çeşitli prensiplerle ve ihmal edilebilecek büyüklükte bir empedansla sistemde yer alırlarken, arızanın ardından yüksek empedanslarını sisteme dahil ederek arıza akımlarını sınırlamaktadırlar. Katı hal arıza akımı sınırlayıcılar; köprü tipi, empedans anahtarlamalı ve rezonansa dayalı olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır.

Katı hal arıza akımı sınırlayıcıların sağladığı avantajlar:

- Arıza anında hızlıca devreye girerek arıza akımının ilk tepe değerini sınırlayabilmeleri,
- Arıza anında bara gerilimlerinde oluşan düşüşleri önleyebilmeleri,
- Sistemin geçici kararlılığının geliştirilmesine imkan tanımaları,
- Normal çalışma koşullarında güç sistemi üzerinde gerilim düşümü ve güç kaybı gibi olumsuz etkilerinin bulunmaması,
- Süperiletken malzeme kullanımına gereksinim olmamasından dolayı düşük maliyetli olmaları,
- Arızanın sonlanmasıyla birlikte hızlı bir toparlanma sağlamaları,
- Güvenilir olmaları ve kısa sürede tekrarlayan arızalarda etkin çalışabilmeleri olarak sıralanabilir.

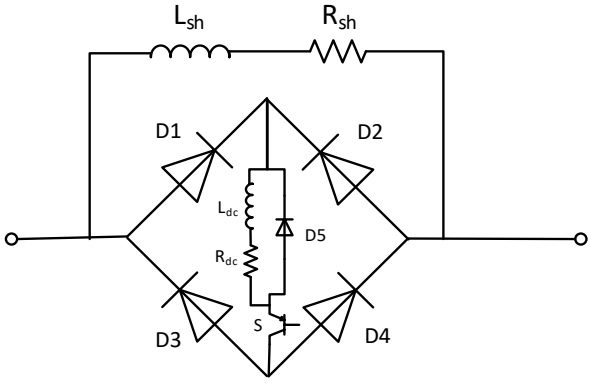
3.1.1 Köprü Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Köprü diyot kullanılan bu sınırlayıcı tipinde, sınırlama empedansları farklı elemanlardan oluşan birçok devre önerilmektedir. Tek yönlü akım geçiren bir kolda uygulanmaları nedeniyle, bir yarıiletken anahtarla devre kontrol edilebilmektedir. Şekil 3.1'de L-R sınırlama empedanslı köprü tipi arıza akımı sınırlayıcı devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 L-R empedanslı köprü tipi arıza akımı sınırlayıcı [126]

Normal şartlarda, IGCT (T) anahtar iletimdedir. Hat akımı, pozitif alternansta D_1-T-D_4 ve negatif alternansta ise D_3-T-D_2 üzerinden taşınmaktadır. Köprü diyoda paralel kollarda bulunan bobin (L) ve direnç (R) arıza akımı sınırlama empedansını oluşturmaktadır. Kısa devre arızasıyla T anahtarı kesime sokulur ve arıza akımı paralel kollardaki empedanstan geçirilerek sınırlanır. Bobin akım sınırlama ve arıza sırasındaki gerilim düşüşlerini önleme, direnç ise ortaya çıkan enerjinin tüketilebilmesi amacıyla kullanılmaktadır [126].



Şekil 3.2 Köprü tipi arıza akımı sınırlayıcı [127]

Sınırlama empedansı ve doğru akım (DC) bölgesindeki elemanların farklılık gösterdiği başka bir köprü tipi arıza akımı sınırlayıcı devre Şekil 3.2'de sunulmuştur.

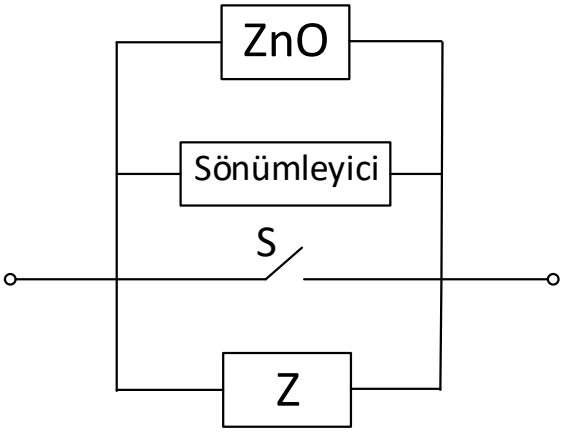
Sürekli çalışmada, yarıiletken anahtar iletimdedir ve hat akımı D_1, L_{dc}, R_{dc}, S ve D_4 üzerinden geçmektedir. DC bobin (L_{dc}) hat akımını belli bir süre geçirdikten sonra kısa devre özelliği göstermekte ve gerilim düşümüne neden olmamaktadır. Arızanın başlamasıyla, IGBT/GTO anahtar (S) kesime girer ve bobin serbest geçiş diyodu (D_5) üzerinden deşarj olur. L_{dc}, arıza akımının ilk andaki artış hızını bastırmanın yanı sıra anahtarın kesime girmesini güvenli hale getirmek için kullanılmaktadır [128]. Bu devrede, diyot köprüsüne paralel kolda L_{sh} ve R_{sh} elemanlarının seri olarak bağlanmasıyla bir sınırlama empedansı oluşturulmuş olup, arıza akımı diyot köprüsünden bu kola yönlendirilerek bastırılmaktadır.

Köprü diyot yapısı aynı olan başka bir devrede ise sınırlayıcı empedansının bulunduğu kolda seri bağlı kondansatör (C_{sh}) ve direnç (R_{sh}) uygulanmıştır [129]. Bazı köprü tipi sınırlayıcı devrelerde ise diyot köprüsüne paralel bir empedans kolu kullanılmamıştır. Bunun yerine, DC bölgede çalışan anahtara paralel olarak bir direnç bağlanmış ve arızayla kesime giren anahtar yerine arıza akımının dirençten geçirilerek sınırlanması sağlanmıştır [130], [131].

Basit yapıları ve tek anahtarla kontrol edilebilmeleri köprü tipi sınırlayıcıların en önemli avantajlarıdır [132].

3.1.2 Empedans Anahtarlamalı Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcılar

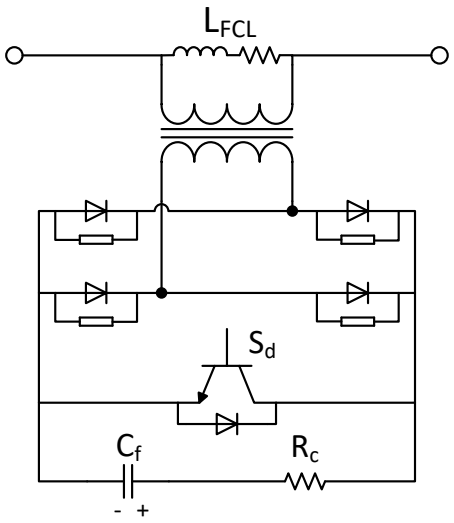
Büyüklüğü arıza akımı sınırlayıcının uygulanacağı sistemin ihtiyacına göre belirlenen sınırlama empedansının, arıza anında yarıiletkenler anahtarlanarak devreye alınması prensibiyle çalışmaktadırlar. Birbirlerine paralel olarak bağlanmış sınırlama empedansı, yarıiletken anahtarlar, sönümleyici ve metal oksit varistörden oluşan empedans anahtarlamalı arıza akımı sınırlayıcı devresi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Empedans anahtarlamalı arıza akımı sınırlayıcı [50]

Arıza dışı durumlarda, devre seri olarak bağlandığı hattın akımını sahip olduğu kontrollü anahtarlar (S) üzerinden taşımaktadır. Yarıiletken anahtarlar bir kısa devre arızasının ardından kesime sokulana kadar sınırlama empedansı devre dışıdır ve bulunduğu koldan akım geçmez. Arızayla birlikte, anahtarlar kesime alınarak arıza akımı empedans koluna yönlendirilir ve böylece yükselen akım belirlenen seviyede sınırlanır. ZnO varistör anahtarlama gerçekleşirken oluşan geçici durum aşırı gerilimlerini azaltmak ve sönümleyici elemanlar ise anahtarları ani gerilim yükselmelerinden korumak için kullanılmaktadır [133], [134]. Klasik anahtarlamalı katı hal arıza akımı sınırlayıcılarda kullanılan GTO ve tristör gibi yarıiletken anahtarların sistem normal çalıştığı sürece sürekli iletimde kalması ve hat akımını üzerinden geçirmesi, bu yapıların güvenilirliği bakımından dezavantajlı bir durumdur.

Dağıtık üretim sistemlerinin geçici durum arızalarındaki kararlılığını koruyarak, sistemde kalmalarını sağlamak amacıyla da empedans anahtarlamalı arıza akımı sınırlayıcılar önerilmektedir [134]. Bu doğrultuda önerilen anahtarlamalı tip sınırlayıcı devresi Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

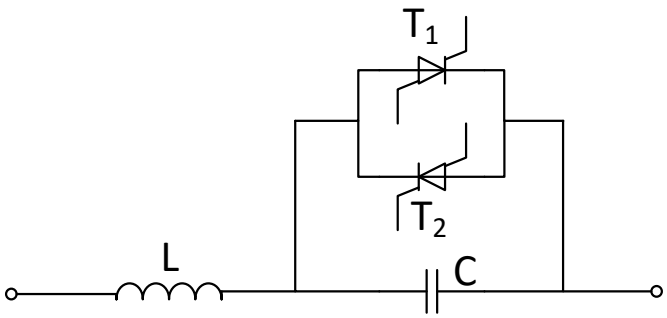


Şekil 3.4 Anahtarlamalı tip arıza akımı sınırlayıcı [134]

Anahtarlamalı tip sınırlayıcı, dağıtık birimin iletim hattına bağlandığı transformatör ile çift beslemeli indüksiyon generatörünün (DFIG) statoru arasına bağlanmaktadır. Köprü diyot çıkışında DC bölgede çalışmasından dolayı bir IGBT anahtar (S_d) kullanılmaktadır ve normal şartlarda iletimdedir. Bu sayede L_{FCL} sınırlama bobini, bir kısa devre arızasına kadar etkisizdir. Kontrol devresi ile arızanın tespitinin ardından, IGBT anahtar kesime alınır ve C_f ile R_c'den oluşan sönümleyici devre anahtar üzerindeki gerilim yükselişini tutar. Sınırlayıcının bağlandığı DFIG statorunun enerjisiyle C_f kapasitörü şarj olur ve tamamen şarj olduğunda bulunduğu kol açık devre haline gelir. Böylece, L_{FCL} sınırlama bobini baypas durumundan çıkarak arıza akımını sınırlamaktadır. Arızanın sonuçlanmasının ardından anahtar tekrar iletime alınarak, sınırlayıcı devre ve sistem normal çalışmasına dönmektedir.

3.1.3 Rezonans Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcılar

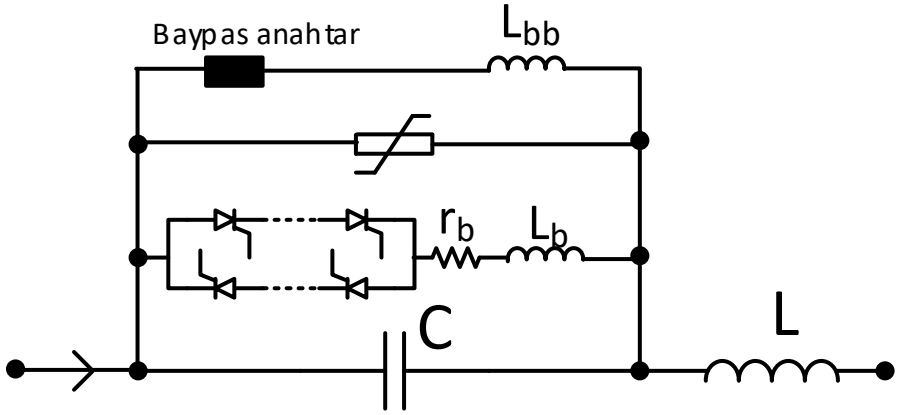
Seri ve paralel rezonans olaylarının ayrı ayrı veya birlikte kullanıldığı katı hal arıza akımı sınırlayıcılardır. Bu devrelerde seri rezonansın düşük empedans ve paralel rezonansın ise yüksek empedans özelliklerinden faydalanılmaktadır. Rezonans olayının kullanıldığı tüm arıza akımı sınırlayıcılarda, kondansatör ile bobinin şebeke frekansında rezonansı sağlayacak büyüklükte belirlenmesi gerekmektedir. Devrelerin kontrolü çeşitli yarıiletkenlerin anahtarlanması ile sağlanmaktadır. Şekil 3.5'te seri rezonansın uygulandığı tristör kontrollü seri reaktör topolojisi gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Tristör kontrollü seri reaktörlü arıza akımı sınırlayıcı [135]

Seri rezonansa dayalı arıza akımı sınırlayıcı devrede, normal çalışma koşullarında kondansatöre paralel ve birbirlerine de ters paralel olarak bağlanmış tristörler kesimdedir. Bobin (L) ve kondansatör (C) şebeke frekansında seri rezonansta olduklarından dolayı, sınırlayıcının sistem üzerinde gerilim düşümü ve güç kaybı gibi bir etkisi bulunmamaktadır. Kısa devre arızasıyla birlikte, tristörler tetiklenerek iletime sokulur. Yarıiletken anahtarlar kondansatörü devre dışı bırakır ve her iki alternansta da arıza akımını geçirmeye başlar. Böylece seri rezonans bozulur ve arıza akımı bobinin gösterdiği endüktif reaktans ile sınırlanır. Arızanın ardından, tristörler tekrar kesime alınarak seri rezonansın yeniden oluşması sağlanır. Arıza akımı sınırlayıcı sıfır empedans ile bir sonraki arızaya kadar güç sisteminde seri rezonansta kalır.

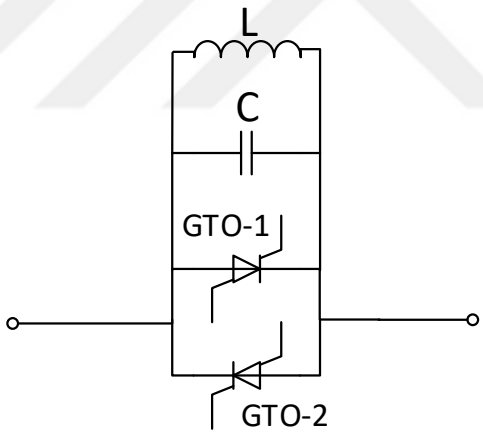
Temel çalışma prensipleri aynı olan ancak devre elemanlarını koruma amacıyla ek önlemler alınan başka katı hal seri rezonans akım sınırlayıcıları da bulunmaktadır [136]–[138]. Şekil 3.6'da bu devrelerden biri verilmiştir.



Şekil 3.6 Seri rezonans arıza akımı sınırlayıcı [139]

Arızanın başlaması ile iletime girmesi için tetiklenen tristörlerin bulunduğu kola, akımın yükseliş hızını sınırlamak amacıyla akım sınırlayıcı bobin (L_b) ve sönümleme direnci (r_b) uygulanmıştır. Baypas anahtarı ise daha uzun süre kondansatör koluna alternatif akım yolu oluşturulması gereken durumlar için akım komütasyon oranını düşüren L_{bb} ile birlikte kullanılmıştır. Varistör ise kondansatörü ani aşırı gerilimlere karşı korumaktadır. Aynı zamanda, yarıiletken anahtarların iletime geçme süresinin uzaması durumu da dikkate alınarak yerleştirilen metal oksit varistörler, yüksek bir güce maruz kaldıklarında aşırı ısınırlar ve bu durumda bir saat gibi uzun bir soğuma süresine ihtiyaç duyulabilir [140], [141]. Bundan dolayı, anahtarların en kısa sürede iletime geçirilerek varistörlerin yüksek bir enerjiye maruz bırakılmaması önem arz etmektedir.

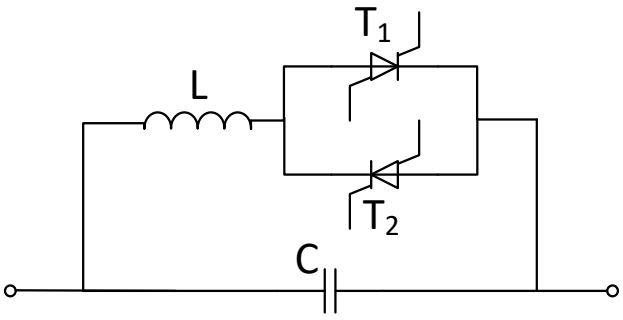
Seri rezonans devrelerinde arıza akımı sadece bobin ile sınırlanırken, paralel rezonansa dayalı topolojilerde ise bobin ve kondansatör arıza anında devrededir [142]. Şekil 3.7'de paralel rezonansın kullanıldığı GTO kontrollü rezonans akım sınırlayıcı gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Paralel rezonans arıza akımı sınırlayıcı [142]

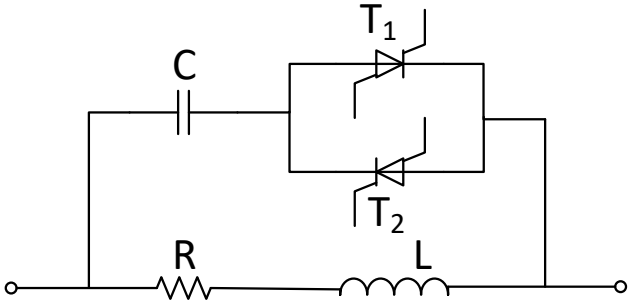
Normal işletimde ters paralel bağlı GTO'lar sürekli iletimde kalarak hat akımına arıza akımı sınırlayıcı üzerinden bir yol oluşturur. Anahtarların direnci ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan paralel kollardan akım geçmez. Sistemde gerçekleşen kısa devre arızasıyla birlikte, anahtarlar kesime geçirilir ve böylece paralel rezonans empedansı arıza akımını ilk tepe değerinden itibaren sınırlamak üzere devreye alınmış olur. Arıza akımının bastırılmasıyla devre kesici açabilir. Eğer

arıza durumu ortadan kalktıysa, anahtarlar tekrar iletime alınır ve sistemin normal çalışması süresince iletimde olurlar.



Şekil 3.8 Tristör kontrollü rezonans akım sınırlayıcı [142]

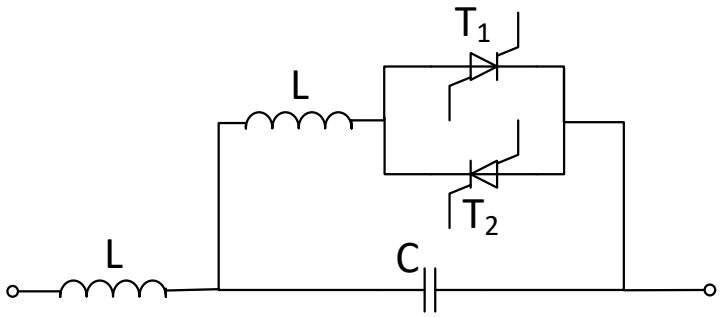
İdeal bir arıza akımı sınırlayıcının arıza dışı durumlarda sistem üzerinde pasif olarak bulunması beklenilen bir özelliktir. Ancak Şekil 3.8'de verilen tristör kontrollü paralel rezonans akım sınırlayıcı devredeki kondansatör, sürekli çalışmada sistemde aktif olarak bulunmaktadır. Bu devrede kapasite, sınırlama empedansında olmasının yanı sıra arıza dışı durumlarda da seri kompanzasyonu desteklemektedir [142]. Tristörler normal şartlarda kesimde iken, arıza sonrası hızlıca iletime sokularak, aynı kolda bulunan bobinin paralel koldaki kondansatör ile rezonansa girmesi amaçlanmaktadır. Şekil 3.9'da bir başka paralel rezonans sınırlama devresinde, bobin ve kayıplarını ifade eden direnç alt kola ve kondansatör üst kola yerleştirilmiştir [143].



Şekil 3.9 Paralel rezonans arıza akımı sınırlayıcı [143]

Normal işletim şartlarında, T_1 ve T_2 tristörleri kesimdedir ve hat akımı bobinin yer aldığı alt koldan taşınmaktadır. Bundan dolayı, bobin (L) ve sahip olduğu direnç büyüklüğü (R) nedeniyle sistemde bir gerilim düşümü ve güç kaybı meydana gelmektedir. Arızanın hemen ardından, kondansatöre seri ve birbirlerine ters paralel olarak bağlanmış T_1 ve T_2 iletime geçerek, L, C ve R'den oluşan paralel

rezonans empedansının oluşmasını sağlamakta ve arıza akımını sınırlamaktadır. Arıza durumunun ortadan kalkmasıyla tristörler tekrar kesime girmektedir.



Şekil 3.10 Seri ve paralel rezonansın uygulandığı devre [144]

Şekil 3.10'daki seri ve paralel rezonansın kullanıldığı devrede, arıza dışı işletimde tristörler kesimdedir ve üst kolda bulunan bobin üzerinden akım akmaz. Alt kolda bulunan kondansatör ile ona seri bobin şebeke frekansında seri rezonanstadır. Sistemde bir arıza gerçekleştiği takdirde tristörlere iletim sinyali verilerek, üst koldaki bobin ile kondansatörün paralel rezonansa geçmesi sağlanır. Arıza akımı paralel rezonans empedansı vasıtasıyla sınırlanır. Normal çalışmaya dönüş için tristörler yeniden kesime alınır ve seri rezonans durumu başlatılır.

Rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcılar; basit yapıları, kolay kontrol edilebilmeleri, arıza akımının etkin bir şekilde bastırılması ve bara gerilimine yapabilecekleri katkı bakımından avantajlı devrelerdir. Yarıiletken anahtarları sadece arıza boyunca iletimde olan devreler; güvenililirlik ve verimliliği yüksek aynı zamanda ısınma bakımından elverişlidir [145]. Arıza akımının sadece endüktif reaktans ile sınırlanması; yüksek akım sınırlama performansı, hızlı toparlanma, kısa devreye girme süresi ve düşük harmonik bozunum sağlarken, arıza anında nominal gerilimde düşüşlere ve DC bileşenlere neden olmaktadır [146]. Paralel rezonanslı sınırlayıcılar, arıza akımını sınırlamada bara geriliminde oluşabilecek yükselmeler de göz önünde bulundurularak kontrol edilmelidir. Kondansatör ve bobinin normal işletimde sistem üzerindeki olumsuz etkilerinin en aza indirgenebilmesi, şebeke frekansında rezonansa girebilmeleri için büyüklüklerinin iyi ayarlanması ile mümkündür [146].

3.2 Önerilen Seri-Paralel Rezonans Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı

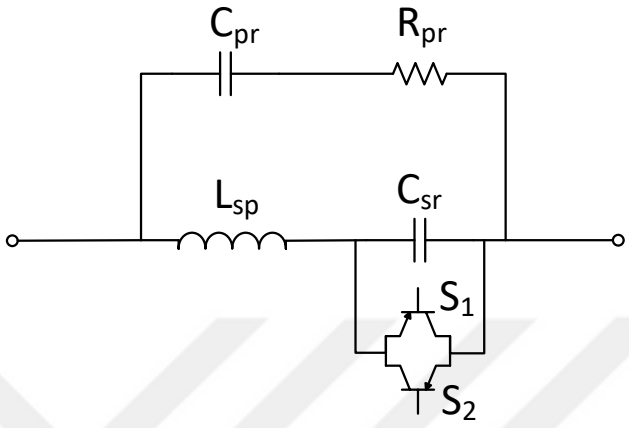
Bu tez çalışması kapsamında, seri-paralel rezonans tipi bir katı hal arıza akımı sınırlayıcı (SPR-AAS) devre önerilmektedir. SPR-AAS ile ilk amaçlanan, diğer arıza akımı sınırlayıcılarda olduğu gibi arıza akımını ilk tepe değerinden itibaren arıza süresince sınırlandırmaktır. Bununla beraber ikinci bir işlev olarak arıza boyunca sınırlayıcının bağlı bulunduğu ortak kuplaj noktası geriliminin nominal değerine yakın bir seviyede sürdürülebilmesi hedeflenmiştir. Böylece geçici durum arızaları için gerilim çökmesi ve gerilim yükselmesi gibi güç kalitesi problemlerinin önüne geçilebilmesi planlanmaktadır.

Geliştirilen bu topoloji ile ideal bir arıza akımı sınırlayıcının sahip olması gereken özelliklerin yanı sıra katı hal bir sınırlayıcıdan sağlanabilecek faydalar da dikkate alınarak birçok performans kriteri belirlenmiştir. Bunlar;

- Arızayla birlikte sınırlayıcının devreye girdiği süre,
- Kısa devre arızası meydana geldikten sonra hat akımının ilk tepe değerinin sınırlandığı seviye,
- Arıza süresince SPR-AAS'nin bağlı olduğu ortak kuplaj noktası geriliminin ulaştığı en düşük ve en yüksek değerler,
- SPR-AAS'nin üzerinde oluşan anlık en yüksek güç kaybı,
- SPR-AAS'nin arıza sonuna kadar tükettiği toplam enerji,
- Yarıiletken anahtarların maruz kaldıkları en yüksek gerilim ve akım değerleri,
- Arızanın bitmesi ile tekrar normal işletime geçiş için gerekli toparlanma süresi,
- Arıza dışı durumlarda sınırlayıcı üzerindeki gerilim düşümü,

olarak sıralanabilir. Önerilen katı hal arıza akımı sınırlayıcı ile simetrik ve asimetrik tüm kısa devre arızalarında bahsi geçen parametreler bakımından üstün bir performansa ulaşılması hedeflenmektedir.

Önerilen seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre Şekil 3.11' de verilmektedir. Arıza akımı sınırlayıcı devre paralel iki koldan oluşmaktadır. Alt kolda L_{sp} bobini ile C_{sr} kondansatörü ve üst kolda ise C_{pr} kondansatörü ile R_{pr} direnci bulunmaktadır. C_{sr} kapasitesine paralel ve birbirlerine ise ters paralel olarak bağlanmış IGBT anahtarlar kullanılmıştır.

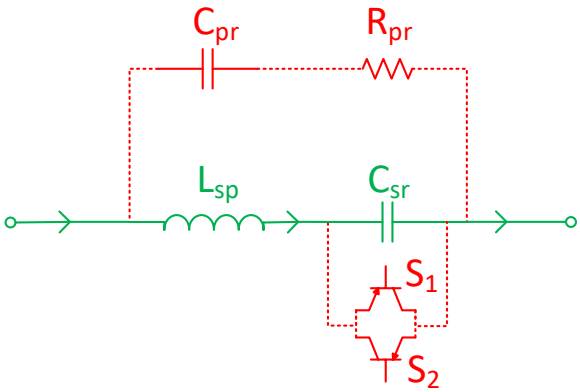


Şekil 3.11 Seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı

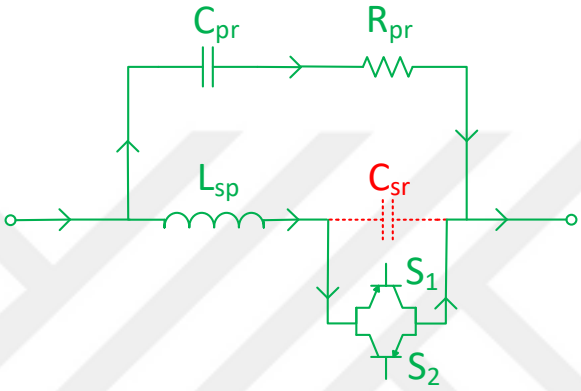
3.2.1 Çalışma Prensibi

SPR-AAS devresi güç sistemlerine seri olarak bağlanılmak üzere tasarlanmıştır. Normal çalışma ve arıza durumu olmak üzere iki çalışma modu bulunmaktadır. İki çalışma modu arasındaki geçiş yarıiletken anahtarların kontrol devresi sinyalleri ile anahtarlanmasıyla sağlanmaktadır.

Şekil 3.12'de normal çalışma ve Şekil 3.13'de ise arıza durumları için devre üzerindeki akım yolu gösterilmektedir. Normal işletimde, C_{sr} kapasitesine paralel bağlı olan IGBT anahtarlar kesimdedir. Devrenin alt kolunda bulunan L_{sp} bobini ve C_{sr} kondansatörü şebeke frekansında seri rezonanstadır. Bundan dolayı bu iki elemanın değerleri şebeke frekansında seri rezonansı sağlayacak büyüklükte belirlenmelidir. Alt kolun empedansı seri rezonans marifetiyle C_{pr} ve R_{pr}' den oluşan paralel kol empedansına göre ihmal edilebilecek kadar küçük bir değere sahip olduğundan dolayı hat akımı buradan geçmektedir. Seri rezonans ile arıza dışı durumlarda devre üzerinde güç kaybı ve gerilim düşümü oluşmaması sağlanarak, sistemde arıza akımı sınırlayıcının bozucu bir etki oluşturması önlenmektedir.



Şekil 3.12 Normal çalışma için devrenin akım yolu



Şekil 3.13 Arıza durumundaki devrenin akım yolu

Kontrol devresi sistemde bir kısa devre arızasının meydana gelmesiyle birlikte anahtarlara iletim sinyali göndermektedir. IGBT'lerin iletime girmesi sınırlayıcı devrenin arıza moduna geçişini başlatmaktadır. Alt kolun akım yolu L_{sp} bobini ve yarıiletken anahtarlar üzerinden devam etmektedir. Böylelikle, C_{sr} kondansatörü devre dışı kalır ve seri rezonans ortadan kalkar. Bu andan itibaren üst koldaki C_{pr} kondansatörü ile alt koldaki L_{sp} bobini şebeke frekansında paralel rezonanstadır ki bu iki elemanın değeri de buna uygun olarak tayin edilmelidir. SPR-AAS'nin paralel rezonansla oluşturduğu yüksek empedans sayesinde, arıza akımı ilk tepe değerinden itibaren hızlıca sınırlanır. Alt kolun sıfır empedans durumu da ortadan kalktığından dolayı hat akımı empedansları oranında iki koldan da taşınmaya başlar.

Kontrol devresi, SPR-AAS'nin uygulandığı devrede bazı noktalardan sağlanan anlık akım ve gerilim ölçümlerine göre anahtarlama sinyalleri oluşturmaktadır. Bu nedenle, kontrol sinyalleri doğrultusunda arıza süresince yarıiletken anahtarlar kısa süreli de olsa kesime girip tekrar iletime geçmektedir. Arızadan sonra ise anahtarlar bir sonraki arızaya kadar kalıcı olarak kesime girmektedir. SPR-AAS hızlı bir

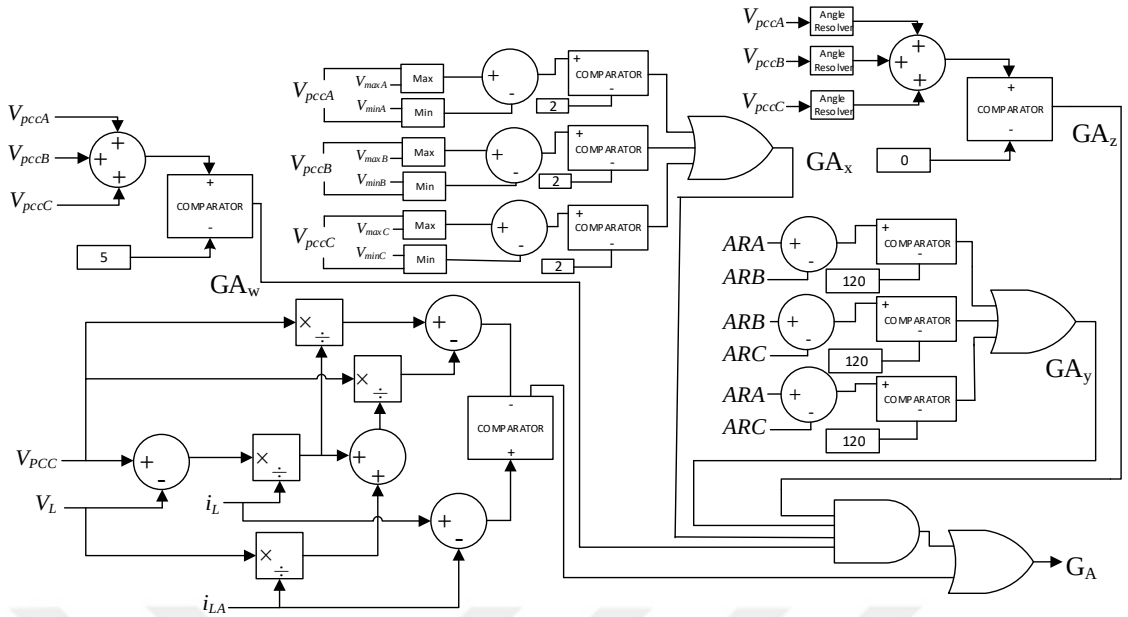
toparlanma sağlar ve kararlı çalışmada hat akımı yeniden seri rezonansta olan alt koldan geçmeye devam eder.

Önerilen SPR-AAS sahip olduğu seri rezonans kolu sayesinde, arıza dışı durumlarda gerilim düşümü ve güç kaybına neden olmadan sistemde yer alabilmektedir. Kısa devre arızasından sonra devreye aldığı paralel rezonans empedansı, farklı kısa devre tiplerinde oluşan arıza akımlarını etkin bir biçimde bastırabilmektedir. Arıza tipine bağlı olarak arıza akımı sınırlama kapasitesinin ciddi bir değişim göstermemesi önemli bir avantajıdır. Aynı zamanda, SPR-AAS'nin yerleştirildiği OKN'nin geriliminde yükselen arıza akımlarından kaynaklanan büyük düşüşler başarılı bir şekilde engellenebilmektedir. Bu sayede, OKN'ye bağlı hassas yükler ve dağıtık üretim tesislerinin gerilim değişimlerinden etkilenmesi önlenmektedir.

3.2.2 Kontrol Yöntemi

SPR-AAS'nin sahip olduğu yarıiletken anahtarların kontrolü için kullanılan devre Şekil 3.14'te sadece A fazı için gösterilmektedir. Aynı kontrol devresi her faz için ayrı ayrı uygulanmaktadır. Kontrol yöntemi temel olarak sınırlayıcının uygulandığı bölgenin kaynak ve yük tarafından alınan akım ile gerilim ölçüm değerlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Kontrol sinyalinin (G_A) oluşturulabilmesi için arıza akımı sınırlayıcının bağlandığı noktadaki ortak kuplaj noktası gerilimi (V_{pccA}) ve yük barası gerilimi (V_L) ile hat akımı (i_L) ve yük akımı (i_{LA}) kullanılmaktadır.

Önerilen devre topolojisinde C_{sr} kapasitesine ters paralel bağlı olan IGBT'ler normal koşullarda kesimdedir. Güç sisteminde bir kısa devre arızasının oluşumu, sınırlayıcı empedansı ve yük empedansı kullanılarak hesaplanan akım büyükleri ile direkt olarak ölçülen hat akımı ve yük akımı değerlerinin arasındaki farkın karşılaştırılması ile saptanmaktadır. Kısa devre arızası başladıktan bir çözüm adımı sonra, yarıiletken anahtarlar hızlıca iletime geçebilmektedir.



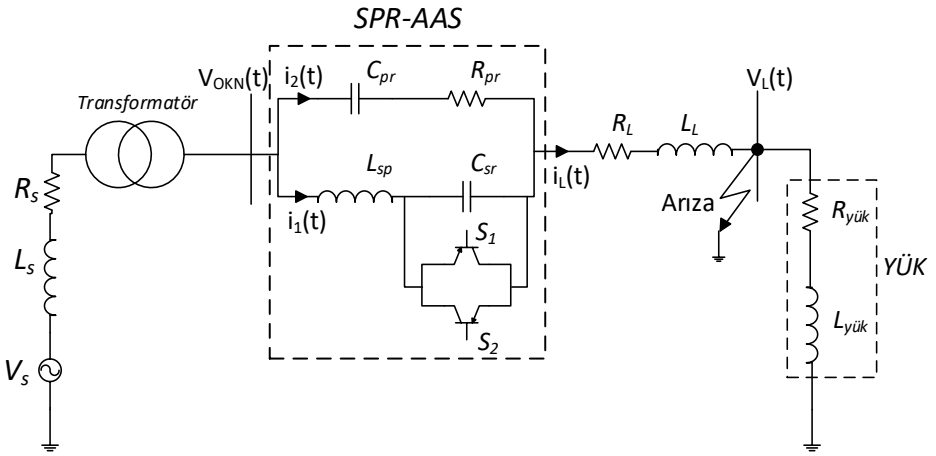
Şekil 3.14 Kontrol devresi

Geliştirilen kontrol tekniğiyle, yüksek arıza akımlarını sınırlamanın yanı sıra arıza akımı sınırlayıcı uygulaması yapılan ortak kuplaj noktası geriliminin de tüm kısa devre arıza tiplerinde nominal değerine yakın bir seviyede korunabilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle arıza akımının ilk yükselişi ile birlikte görülen bara gerilimindeki çökme ve arızanın sonuçlanması ile oluşan bara gerilimindeki yükselmenin engellenebilmesi gerilim kararlılığı açısından önem arz etmektedir. Gerilimin toparlanması arıza tipi, devre elemanlarının büyüklükleri ve kısa devre direncine bağlı olarak değişebilmektedir. Kontrol devresinde A fazı için gösterilen GA_w, GA_x, GA_y ve GA_z sinyalleri gerilimin hızlıca toparlanabilmesi için kullanılmıştır. Bunlar; sırasıyla OKN faz gerilimlerinin toplamlarının hesaplanması, OKN faz gerilimlerinin maksimum ve minimum mutlak değerlerinin karşılaştırılması, OKN faz gerilimi açılarının birbirleri ile kıyaslanması ve OKN faz gerilimi açılarının toplamının belirlenmesine bağlı olarak üretilen sinyallerdir.

3.2.3 Matematiksel Modelleme

Normal işletim koşulları ve arıza durumunda, SPR-AAS'nin sistemde aktif olarak bulunan devre elemanları farklılık göstermektedir. Yarıiletken anahtarların iletime geçmesi devrenin seri rezonanstan paralel rezonansa geçmesine imkan sağlarken, aynı zamanda anahtarların C_{sr} kondansatörünü de baypas etmesine yol açmaktadır. Bundan dolayı, C_{sr} sadece normal işletimde seri rezonansı oluşturmak için devrede

kalmaktadır. SPR-AAS' nin iki çalışma zamanı için de matematiksel modellemesinin yapılabilmesi için Şekil 3.15'teki iki baralı güç sistemi modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.15 İki baralı güç sistemi modeli

Normal işletme koşullarında, önerilen SPR-AAS devresinin de uygulandığı iki baralı bir güç sisteminin çalışması (3.1) ile ifade edilmektedir.

$$V_m \, sin(\omega t) = R_n i_L(t) + L_n \frac{di_L(t)}{dt} + L_{sp} \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{1}{C_{sr}} \int i_1(t) dt \qquad (3.1)$$

Burada, V_m gerilim kaynağının maksimum değerini, L_n normal işletim koşullarındaki sistemin toplam endüktansını, R_n normal şartlardaki sistemin toplam direnç değerini, L_{sp} hem normal çalışma hem de arıza durumlarında sürekli aktif olarak devrede olan SPR-AAS endüktansını ve C_{sr} seri rezonansı sağlayan kapasite değerini belirtmektedir. R_n ve L_n, (3.2) ve (3.3) ifadelerinde verilen direnç ve endüktans değerlerinin toplamlarıdır.

$$R_n = R_s + R_L + R_{yük} \qquad (3.2)$$

$$L_n = L_s + L_L + L_{yük} \qquad (3.3)$$

R_s ve L_s kaynak direnci ile endüktansını, R_L ve L_L hat direnci ile endüktansını, $R_{yük}$ ve $L_{yük}$ ise yük direnci ile endüktansını tanımlamaktadır. Önerilen devrenin üst kolunda bulunan C_{pr} kapasitesi ve R_{pr} direnci, arıza dışı durumlarda seri rezonans ile etkisiz bırakıldıklarından dolayı normal çalışmada ihmal edilmektedirler. (3.1) denklemi düzenlenerek (3.4) ifadesindeki diferansiyel denklem haline getirilmiştir.

$$\frac{d^2 i_L(t)}{dt^2} + \left(\frac{R_n}{L_{sp} + L_n}\right)\frac{di_L(t)}{dt} + \left(\frac{1}{C_{sr}\left(L_{sp} + L_n\right)}\right) i_L(t) - \frac{\omega V_m \cos(\omega t)}{L_{sp} + L_n} = 0 \tag{3.4}$$

Hat akımı olan $i_L(t)$, diferansiyel denklem çözülerek doğal ve zorlanmış çözümlerin toplamı cinsinden (3.5) denklemi ile yazılabilir. (3.6)'daki ifade ile zorlanmış çözüm ve (3.7) denklemi kullanılarak ise doğal çözüm hesaplanmaktadır.

$$i_L(t) = Ae^{-\left(\frac{R_n}{L_n + L_{sp}}\right)(t - t_0)} + B(t) \tag{3.5}$$

$$B(t) = \frac{V_m \sin(\omega t - \varphi_n)}{Z_n} \tag{3.6}$$

$$A = I_L(t_0) - \frac{V_m \sin(\omega t_0 - \varphi_n)}{Z_n} \tag{3.7}$$

Bu ifadelerde kullanılan normal işletimdeki sistem empedansı olan Z_n ve faz farkı φ_n (3.8) ve (3.9) eşitliklerinde verilmiştir. $t = t_0$ anında hat akımı $i_L(t)$'nin değeri $I_L(t_0)$'dır. $t = t_1$' de Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yük barasında bir kısa devre arızasının meydana gelmesi ve SPR-AAS uygulanmaması durumunda, hat akımının değişimini (3.10) ifadesi vermektedir.

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2} \tag{3.8}$$

$$\varphi_n = tan^{-1}\left(\frac{\omega\left(L_n + L_{sp}\right)}{R_n}\right) \tag{3.9}$$

$$i_L(t) = \left(I_L(t_0) - \frac{V_m \sin\left(\omega t_0 - \varphi_f\right)}{\sqrt{R_f^2 + \omega^2 L_f^2}}\right) e^{-\left(\frac{R_f}{L_f}\right)(t - t_0)} + \frac{V_m \sin\left(\omega t - \varphi_f\right)}{\sqrt{R_f^2 + \omega^2 L_f^2}} \tag{3.10}$$

Burada,

$$\varphi_f = tan^{-1}\left(\frac{\omega L_f}{R_f}\right) \tag{3.11}$$

$$R_f = R_s + R_L + R_a \tag{3.12}$$

$$L_f = L_s + L_L \tag{3.13}$$

ile belirlenmektedir. S_1 ve S_2 yarıiletken anahtarlar daha önce de belirtildiği üzere, arıza devam ettiği sürece kontrol sinyaline bağlı olarak zaman zaman kesime girmektedir. Bundan dolayı, hat akımı anahtarlar kesimde ise (3.10) eşitliği, iletimde ise (3.14) denklemleriyle ifade edilmektedir. (3.14) ifadesindeki $s_{1,2}$, α ve ω_d^2 değişkenleri sırasıyla (3.15), (3.16) ve (3.17) eşitlikleri ile tanımlanmıştır.

$$i_L(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} + I_{L,m} \sin(\omega t + \psi_I) \tag{3.14}$$

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_d^2} \tag{3.15}$$

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(\frac{R_f}{L_f + L_{sp}} + \frac{1}{R_{pr}C_{pr}}\right) \tag{3.16}$$

$$\omega_d^2 = \frac{R_f}{R_f + R_{pr}} \frac{1}{\left(L_f + L_{sp}\right)C_{pr}} \tag{3.17}$$

Anahtarlar iletimdeyken, hat akımının zorlanmış çözümünün hesaplanmasında kullanılan $I_{L,m}$ (3.18) ifadesinde verilmiştir.

$$I_{L,m}\angle\psi_1 = \frac{V_m}{Z_f}\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{3.18}$$

Buradaki,

$$Z_f = R_f + j\omega L_f + Z_1 // Z_2 \tag{3.19}$$

$$Z_1 = R_{pr} - j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \tag{3.20}$$

$$Z_2 = j\omega L \tag{3.21}$$

olarak ifade edilebilir. Hat akımının arıza durumundaki değişimi (3.23)'deki diferansiyel denklem ile de belirlenebilmektedir. Bunun için öncelikle (3.22)'de verilen denklem ile C_{pr} kondansatörü ve R_{pr} direncinin bulunduğu koldan geçen $i_2(t)$ akımının hesaplanması gerekmektedir.

$$\begin{aligned} &\frac{d^3 i_2(t)}{dt^3} + \left(\frac{R_f + R_{pr}}{L_f} + \frac{R_{pr}}{L_{sp}}\right)\frac{d^2 i_2(t)}{dt^2} \\ &+ \left(\frac{R_f R_{pr}}{L_{sp}L_f} + \frac{1}{L_{sp}C_{pr}} + \frac{1}{L_f C_{pr}}\right)\frac{di_2(t)}{dt} \\ &+ \left(\frac{R_f}{L_f L_{sp} C_{pr}}\right) i_2(t) + \frac{\omega^2 V_s \sin(\omega t)}{L_f} = 0 \end{aligned} \tag{3.22}$$

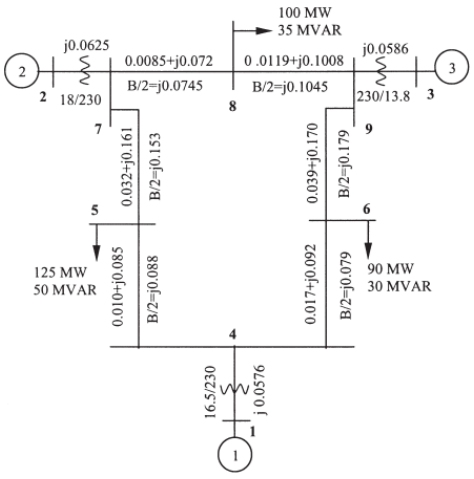
$$\frac{d^2 i_L(t)}{dt^2} + \frac{R_f}{L_f}\frac{di_L(t)}{dt} + \frac{R_{pr}}{L_f}\frac{di_2(t)}{dt} + \frac{1}{L_f C_{pr}} i_2(t) - \frac{\omega V_s \cos(\omega t)}{L_f} = 0 \quad (3.23)$$

4
MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, önerilen SPR-AAS ile incelenen diğer arıza akımı sınırlayıcı devre ve cihazların PSCAD/EMTDC programında oluşturulan simülasyon modelleri ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Klasik arıza akımı sınırlama yöntemlerinden olan seri reaktör ve yüksek empedanslı transformatör ile modern kontrollü seri reaktörlü katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre, sistemin normal çalışması ve arıza durumları için karşılaştırılmıştır. SPR-AAS'yi oluşturan elemanlar belirlenen tasarım parametrelerine göre boyutlandırılarak, sınırlayıcının arıza akımı sınırlama ve ortak kuplaj noktası gerilim kararlılığını koruma performansı analiz edilmiştir. SPR-AAS ile literatürde önerilmiş diğer paralel rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcıların farklı arıza tiplerindeki etkinliği; arıza akımı sınırlama, arıza süresince OKN gerilim kararlılığını sağlama, arıza anında üzerlerinde oluşan güç kaybı ile enerji tüketimi, toparlanma süresi, yarıiletken anahtarların maruz kaldığı maksimum gerilim ve akım seviyesi gibi parametreler bakımından mukayese edilmiştir.

4.1 Test Sistemleri

Klasik arıza akımı sınırlama yöntemleri ile modern katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre Şekil 4.1'de gösterilen IEEE'nin 9 baralı test sisteminde uygulanarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1 IEEE'nin 9 baralı sisteminin tek hat diyagramı [147]

IEEE'nin 9 baralı test sistemi; üç generatör, üç transformatör ve farklı baralara bağlı üç sabit yükten oluşmaktadır. IEEE'nin 9 baralı test sisteminde yer alan iletim hatları ve transformatörlerin özellikleri Tablo 4.1'de, bara gerilimleri ile generatör güçleri ise Tablo 4.2'de sunulmuştur.

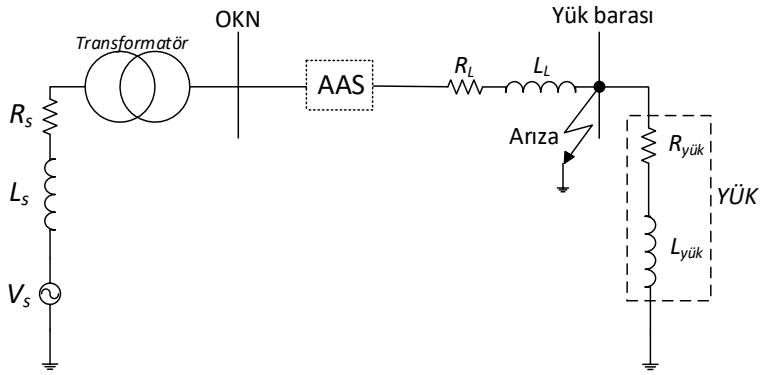
Tablo 4.1 IEEE'nin 9 baralı test sisteminde bulunan iletim hatları ile transformatörlerin özellikleri

Hattın bağlandığı baralar		**R (pu)**	**X (pu)**	**B (pu)**
2	7	0,0000	0,0625	0,0000
7	8	0,0085	0,0720	0,1490
7	5	0,0320	0,1610	0,3060
5	4	0,0100	0,0850	0,1760
4	1	0,0000	0,0576	0,0000
4	6	0,0170	0,0920	0,1580
6	9	0,0390	0,1700	0,3580
9	3	0,0000	0,0586	0,0000
9	8	0,0119	0,1008	0,2090

Tablo 4.2 Bara gerilimleri ve generatör güçleri

Bara	**V (pu)**	**P_g (pu)**	**Q_g (pu)**	**P_L (pu)**	**Q_L (pu)**
1	1,04	0	0	0	0
2	1,025	1,63	0,067	0	0
3	1,025	0,85	0,108	0	0
5	1	0	0	1,25	0,5
6	1	0	0	0,9	0,3
8	1	0	0	1	0,35

Önerilen SPR-AAS devresi ve diğer paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devreler ise Şekil 4.2'de verilen ve bir generatör, bir transformatör ve bir RL yükünden oluşan iki baralı güç sisteminde incelenmiştir. Tüm rezonans tipi sınırlayıcılar ortak kuplaj noktası barasının çıkışında konumlandırılmış ve yük barasında gerçekleşen kısa devre arızaları için analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2 İki baralı güç sistemi

İki baralı güç sisteminin özellikleri Tablo 4.3'de verilmektedir.

Tablo 4.3 İki baralı güç sisteminin özellikleri

Parametre		**Değer**
Şebeke gerilimi (Fazlar arası)	V_s	20 kV
Kaynak direnci	R_s	1 Ω
Kaynak endüktansı	L_s	0.01 H
Hat direnci	R_L	2 Ω
Hat endüktansı	L_L	0.01 H
Yük direnci	$R_{yük}$	48.4 Ω
Yük endüktansı	$L_{yük}$	0.1 H
Şebeke frekansı	f_s	50 Hz
Arıza direnci	R_a	0.1 Ω

4.2 Klasik ve Modern Arıza Akımı Sınırlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Klasik arıza akımı sınırlama yöntemlerinden olan seri reaktör ve yüksek empedanslı transformatör ile modern bir arıza akımı sınırlayıcı olan kontrollü katı hal seri reaktörü, IEEE'nin 9 baralı test sisteminde uygulanarak normal çalışma ve arıza durumları için mukayese edilmiştir. Bu üç sınırlayıcı tipinin de arıza akımlarını sahip oldukları endüktif reaktans büyüklükleri ile sınırlamaları karşılaştırılabilir olmalarını sağlamaktadır [148].

Uygulanan arıza akımı sınırlayıcıların sayısı, yerleşim yerleri ve büyüklüklerine bağlı olarak güç sisteminin farklı noktalarında arıza akımlarının sınırlandığı seviyeler değişmektedir. Bu nedenle, bu sistem için bir arıza akımı limit değeri ve uygulanacak sınırlayıcı sayısı belirlenerek sınırlayıcılar konumlandırılmıştır. Buna göre, 9 baralı sistemde bir sınırlayıcı kullanılmasına ve hat akımlarının arıza anında

10 kA'i aşmasını engelleyebilecek şekilde yerleştirilmelerine karar verilmiştir. Arıza akımları üç faz arızasında en yüksek seviyesine ulaştığından dolayı, bu arıza tipi sistemdeki tüm baralarda gerçekleştirilmiştir. En yüksek arıza akımının, 7 nolu barada meydana gelen üç faz arızasında oluşacağı ve arıza akımının 2 ile 7 nolu baralar arasında 15,623 kA seviyesine ulaşacağı tespit edilmiştir. Bu arıza akımını en yüksek oranla sınırlayabilmek için sistemdeki en uygun sınırlayıcı yerleşim lokasyonunun 2 nolu baranın çıkışı olduğu belirlenmiştir. Tablo 4.4'te test sisteminin normal çalışması için hat akımlarının maksimum değerleri ile 7 nolu barada oluşan üç faz arızasında arıza akımlarının en yüksek değerleri verilmektedir.

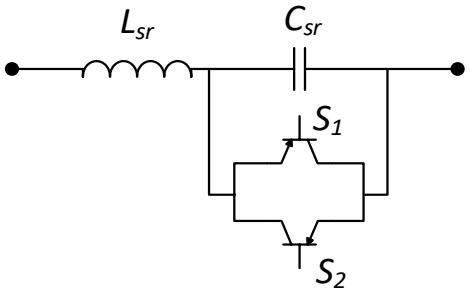
Tablo 4.4 Normal çalışma ve arıza durumundaki hat akımları

			Hat Akımları (kA)	
Hat	**Hattın bağlandığı baralar**		**Normal çalışma**	**Arıza durumu**
1	1	4*	3,743	9,868
2	1	4	0,265	0,711
3	2	7*	7,288	**15,623**
4	2	7	0,571	1,231
5	3	9*	4,949	10,188
6	3	9	0,298	0,617
7	7	8	0,272	0,886
8	8	8**	0,379	0,603
9	8	9	0,122	0,803
10	9	6	0,219	0,533
11	6	6**	0,339	0,504
12	6	4	0,129	0,832
13	5	4	0,198	0,785
14	5	5**	0,474	0,692
15	7	5	0,300	0,794

*Transformatörün primer tarafındaki hat akımı
**Baradan yüke giden akım

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarıyla, endüktans değerleri 140,7 mH olan seri reaktör, yüksek empedanslı transformatör ve kontrollü katı hal seri reaktörün 2 nolu bara çıkışına yerleştirilmeleri durumunda, gösterecekleri endüktif reaktansla sistemin genelinde arıza akımlarını 10 kA'in altına düşürebilecekleri belirlenmiştir. Diğer iki sınırlayıcı bu noktaya bağlanırken yüksek empedanslı transformatör kullanımı ise 2 ile 7 baraları arasındaki mevcut transformatörün endüktansı belirlenen değere yükseltilerek incelenmiştir. Şekil 4.3'te gösterilen kontrollü seri reaktör normal çalışma koşullarında sistemde seri rezonans durumunda yer

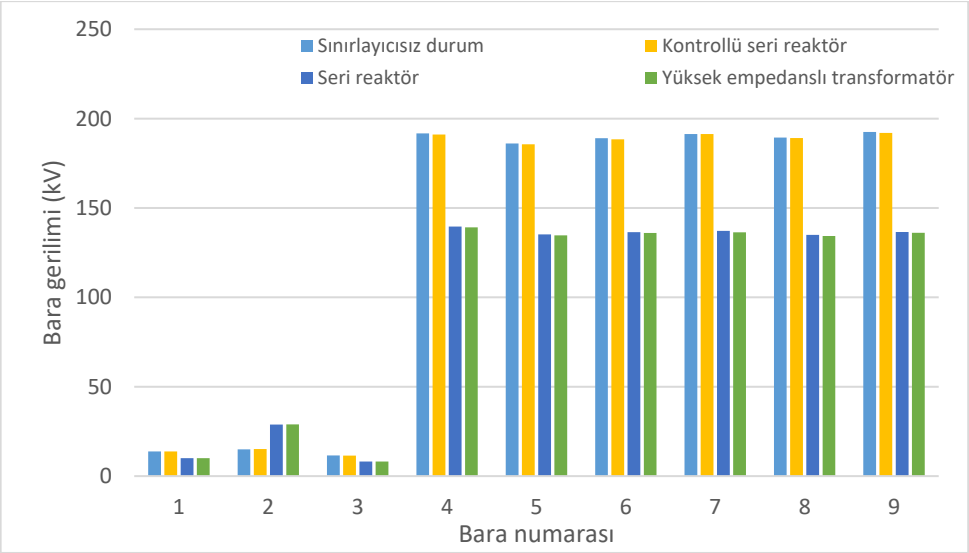
almaktadır. Bundan dolayı, sahip olduğu bobinin endüktans değeri ile kondansatörün kapasite değeri seri rezonansı sağlayacak büyüklükte kullanılmalıdır. Endüktans değeri diğer sınırlayıcılarla aynı büyüklük olan 140,7 mH ve kapasite değeri ise şebeke frekansında seri rezonansı meydana getiren 50 μF değerinde uygulanmıştır.



Şekil 4.3 Kontrollü katı hal seri reaktör tipi arıza akımı sınırlayıcı

Kontrollü katı hal seri reaktörün C_{sr} kondansatörüne ters paralel olarak bağlanmış IGBT anahtarları olan S_1 ve S_2 normal çalışmada kesimdedir. Kısa devre arızasının ardından, yarıiletken anahtarlar iletime geçerek C_{sr} kondansatörünü devre dışı bırakmaktadır. Böylece, arıza akımı L_{sr} bobininin sahip olduğu endüktif reaktansın sisteme dahil olmasıyla sınırlanır. Arızanın ortadan kalkmasıyla birlikte, anahtarlar tekrar kesime sokularak devrenin seri rezonans ile sistemde kalması sağlanmaktadır.

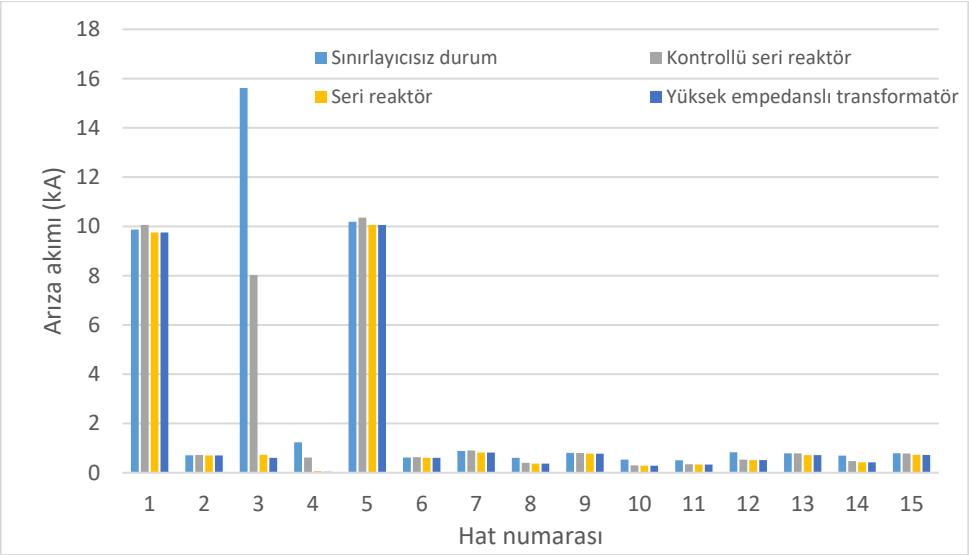
Klasik arıza akımı sınırlama yöntemleri modern tekniklerin aksine, herhangi bir arızanın olmadığı normal çalışma koşullarında da sistemde yer alarak gerilim düşümü ile güç kaybının oluşmasına ve sistem kararlılığı ile güvenilirliliğinin de zayıflamasına sebep olurlar. 2 nolu barada seri reaktör, yüksek empedanslı transformatör ve kontrollü seri reaktör kullanılması durumları için normal işletimdeki bara gerilimleri Şekil 4.4'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4 Normal işletim koşullarındaki bara gerilimleri

Kontrollü katı hal seri reaktörün sistemde herhangi bir arızanın olmadığı normal çalışma şartlarında, bara gerilimleri üzerinde etkisiz kaldığı ve baraların nominal değerlerinin korunduğu görülmektedir. Ancak, arıza akımlarını sınırlamak için kullanılan diğer iki yöntem de normal koşullarda bara gerilimlerinin düşmesine veya yükselmesine neden olmaktadır. Öyle ki, uygulandıkları 2 nolu baranın geriliminin %93 yükselmesine ve 9 nolu baranın geriliminin ise %29 düşmesine sebep olmuşlardır.

Arıza akımı sınırlayıcıların akım sınırlama performansları, 7 nolu baradaki 3 faz arızası için değerlendirilmiş olup, sınırlayıcıların arıza akımını sınırladıkları seviye sınırlayıcısız durumla karşılaştırmalı olarak Şekil 4.5'te sunulmaktadır. Buna göre, hatlarda oluşan arıza akımları farklı yöntemler kullanıldığında genel olarak birbirine oldukça yakın iken, en ciddi fark sınırlayıcısız durumda 15,623 kA ile en yüksek arıza akımının meydana geldiği 3 numaralı hatta oluşmaktadır. Bu hatta arıza akımı, kontrollü seri reaktör, seri reaktör ve yüksek empedanslı transformatör ile sırasıyla 8,025 kA, 0,728 kA ve 0,606 kA değerlerine sınırlanmaktadır. Bunun en önemli nedeni, sürekli sistemde bulunarak baralarda yüksek gerilim düşümü ve güç kayıplarına neden olan seri reaktör ve yüksek empedanslı transformatörün, sistemin güç akışını da değiştirmelerinden dolayı arıza akımı değerinin bu barada yükselmemesidir.



Şekil 4.5 Farklı sınırlayıcılar kullanılması durumunda arıza akımı değerleri

4.3 Seri-Paralel Rezonans Tipi Katı Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı Simülasyonları

Önerilen SPR-AAS devresi ile tüm kısa devre arıza tiplerinde arıza akımlarının etkin bir şekilde sınırlanabilmesi ve arıza süresince ortak kuplaj noktası gerilim kararlılığının korunabilmesi amaçlanmaktadır. SPR-AAS'nin bu iki temel görevi için yeterliliği, Şekil 4.2'deki iki baralı güç sisteminde uygulandığı durum için PSCAD/EMTDC programında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile analiz edilmiştir. SPR-AAS ortak kuplaj noktası barası çıkışında iletim hattından önce kullanılmıştır.

4.3.1 Tasarım Parametreleri

Normal çalışmada seri rezonansta olan SPR-AAS, kısa devre arızasıyla birlikte kontrol devresinden gelen sinyaller doğrultusunda arıza moduna geçerek, paralel rezonans empedansıyla arıza akımını sınırlamaktadır. SPR-AAS'nin arıza akımı sınırlama empedansı L_{sp}, C_{pr} ve R_{pr} elemanlarından oluşmaktadır. Arıza ve normal çalışma modlarının her ikisinde de devrede olan L_{sp}'nin büyüklüğü, şebeke frekansında C_{sr} ile seri rezonansı ve C_{pr} ile de paralel rezonansı sağlayacak değerde belirlenmelidir. C_{pr} ile aynı kolda kullanılan R_{pr} direnci ise SPR-AAS'nin arıza anında OKN gerilim kararlılığını muhafaza edebilmesini sağlamak, akım sınırlama oranını yükseltmek ve toparlanma süresini kısaltmak amacıyla uygulanmaktadır. R_{pr} direncinin büyüklüğü, SPR-AAS'yi oluşturan diğer elemanlara bağlı olarak

değişmesi gerektiğinden dolayı, öncelikle endüktans ve kapasite değerleri belirlenmelidir.

SPR-AAS'de yer alan elemanların büyüklükleri sınırlayıcının performansını etkilemektedir. Bu nedenle, farklı eleman büyüklükleri kullanılarak üç faz arızası için simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirlenen tasarım parametreleri için elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, incelenen sistemde SPR-AAS için ideal eleman büyüklükleri tespit edilmiştir. Farklı eleman büyüklükleri için simülasyon çalışmasından elde edilen tasarım parametrelerinin değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5 Farklı eleman büyüklükleri için tasarım parametrelerinin değerleri

Kapasite (μF) (C_{sr}, C_{pr})	**Endüktans (mH) (L_{sp})**	**Direnç (Ohm) (R_{pr})**	**Arıza Akımının Tepe Değeri (A)**	**En Yüksek OKN Gerilimi (kV)**	**En Yüksek Anlık Güç Kaybı (MW)**	**En Yüksek IGBT Gerilimi (kV)**
250	40,6	4	1040	16,69	2,53	12,94
200	50,7	6	908	16,56	2,28	12,74
150	67,8	10	773	16,38	2,03	12,46
100	**101,6**	**21**	**619**	**16,04**	**1,68**	**11,91**
50	203,2	90	394	15,48	1,00	15,61

SPR-AAS'nin tasarım parametrelerine göre belirlenen eleman büyüklükleri; 101,6 mH'lik L_{sp} endüktansı, 100 μF'lık C_{sr} ve C_{pr} kondansatörleri ile 21 Ω'luk R_{pr} direnci olmuştur. Seçilen bu eleman büyüklükleri ile,

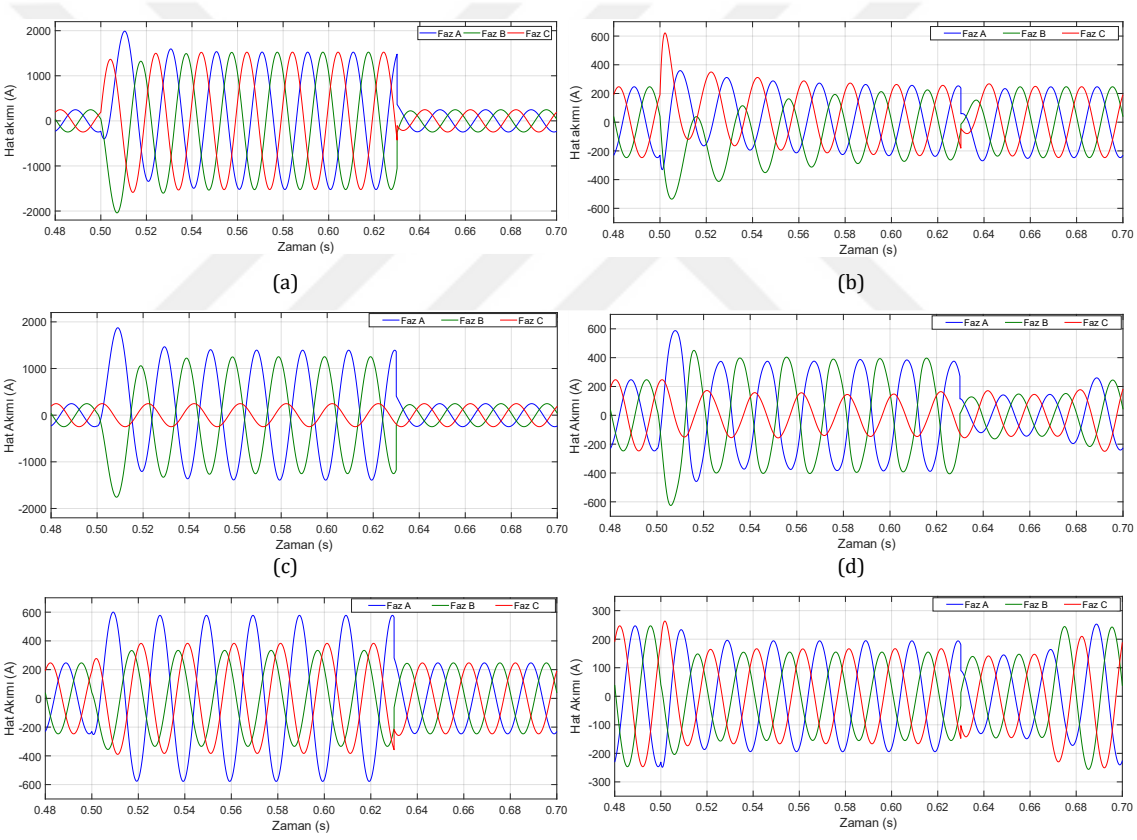
- Arıza anında OKN geriliminde oluşabilecek gerilim yükselmelerinin önlenebilmesi,
- Arıza akımının büyüklüğüne bağlı olarak SPR-AAS üzerinde oluşan anlık güç kayıplarının daha düşük bir seviyede tutulabilmesi,
- IGBT anahtarların arıza anında anahtarlamaları sırasında oluşan geçici gerilim artışlarının minimize edilebilmesi,
- Arıza akımının yüksek bir oranla sınırlanabilmesi sağlanacaktır.

SPR-AAS'nin kullanıldığı iki baralı sistemde gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, yük barasında 130 ms süreyle farklı tiplerde kısa devre arıza

durumlarının oluşması incelenmiştir. SPR-AAS'nin arıza akımı sınırlama ve OKN kararlılığına olan katkısı ortaya konulmuştur.

4.3.2 Arıza Akımı Sınırlama Performansının İncelenmesi

Kısa devre arızalarında, büyük bir düşüş gösteren sistem empedansına sınırlayıcı tarafından empedans dahil edilmesiyle arıza akımları sınırlanmaktadır. Dolayısıyla, sınırlama empedansının büyüklüğü arıza akımı sınırlama kapasitesini belirlemektedir. SPR-AAS'nin tasarım parametrelerine göre belirlenen eleman büyüklükleri için arıza akımı sınırlama performansı incelenmiştir. Üç faz, faz-faz ve faz-toprak arızalarında, sınırlayıcısız durumdaki arıza akımları ile SPR-AAS kullanılarak sınırlanan arıza akımlarının değişimleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Üç faz arızasındaki hat akımı; a) Sınırlayıcısız durum, b) SPR-AAS'li durum, faz-faz arızasındaki hat akımı; c) Sınırlayıcısız durum, d) SPR-AAS'li durum, faz-toprak arızasındaki hat akımı; e) Sınırlayıcısız durum, f) SPR-AAS'li durum

Yük barasında gerçekleşen üç faz kısa devre arızasında, sistemde sınırlayıcı kullanılmadığı durumda arıza akımı 2040 A seviyesine kadar yükselmekte ve daha sonra 1523 A genliğindeki salınımlar meydana gelmektedir. SPR-AAS

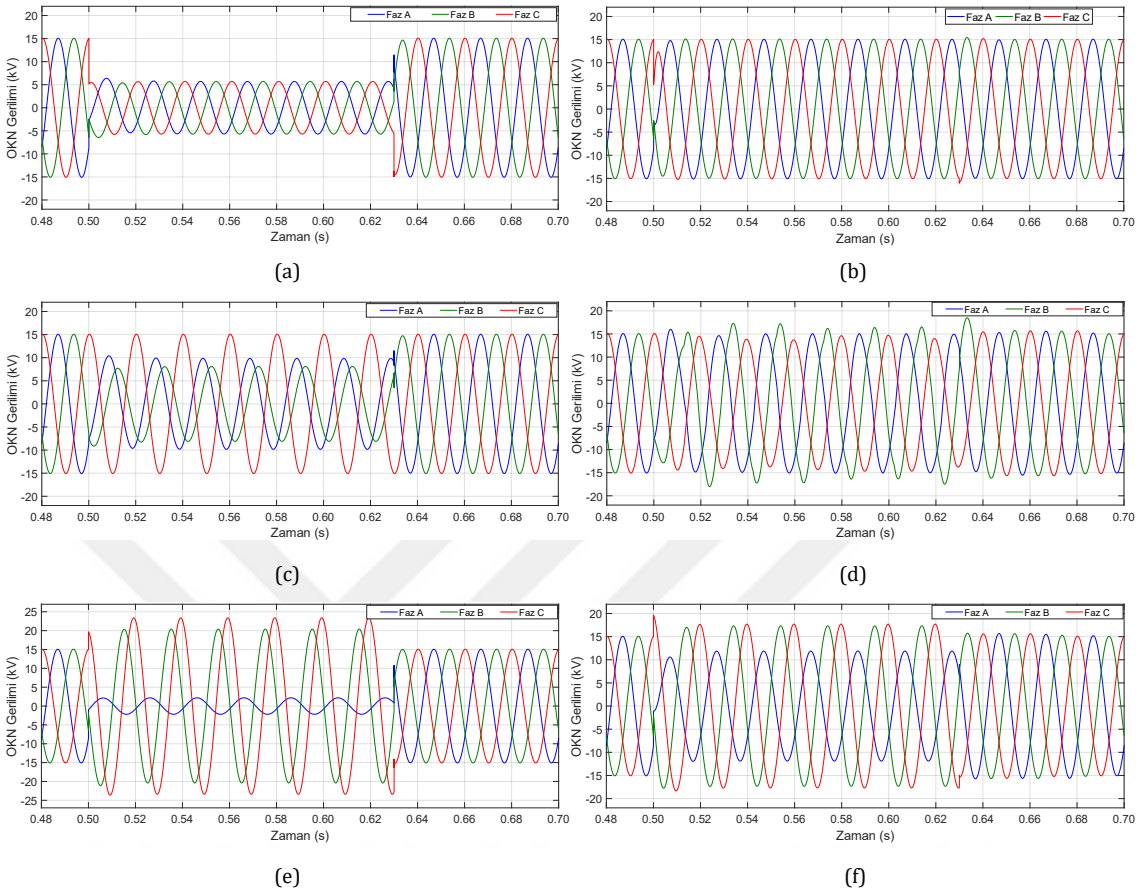
uygulandığında ise arıza akımı %70 oranında sınırlanarak, 619 A değerine kadar düşürülebilmektedir. Sistemde sınırlayıcı yer almadığı durumda, A ve B fazları arasında gerçekleşen faz-faz arızasında ise arıza akımı A fazında 1873 A ve B fazında ise 1758 A düzeyinde oluşmaktadır. SPR-AAS'nin sağladığı yüksek empedans sayesinde, arızalı A ve B fazlarının akımları sırasıyla 583 A ve 622 A değerlerinde sınırlanabilmektedir. Faz-toprak arızasında ise 600 A ile pik değerine ulaşan arıza akımı, SPR-AAS ile 264 A değerine etkin bir şekilde bastırılabilmektedir.

4.3.3 Arıza Anında Ortak Kuplaj Noktası Gerilimine Katkısı

Kısa devre arızasıyla birlikte hızlıca yükselen arıza akımı, bara gerilim seviyelerinde ciddi düşüşlerin oluşmasına neden olabilmektedir. Özellikle, hassas yüklerin bağlı olduğu baraların korunabilmesi ve dağıtık üretim tesislerinin geçici durum arızalarında sistemde kalabilmesi için bu gerilim değişimleri çözülmesi gereken bir güç kalitesi problemidir. SPR-AAS yüksek arıza akımlarını sınırlarken, aynı zamanda OKN gerilim kararlılığını da koruyabilecek bir devre yapısına sahiptir. SPR-AAS için geliştirilen kontrol devresi, arıza anında devreden aldığı akım ve gerilim ölçümlerine göre yarıiletken anahtarlara sağladığı kontrol sinyalleri ile OKN gerilim kararlılığını muhafaza etmektedir. Bu nedenle, tasarım parametrelerinde OKN gerilim seviyesi de göz önünde bulundurulmuş ve SPR-AAS'nin elemanları arıza anında OKN gerilim kararlılığını da sağlayacak büyüklüklerde seçilmiştir. SPR-AAS'nin arıza akımı sınırlama performansının incelendiği kısa devre arızaları için OKN gerilim değişimleri de elde edilerek, sınırlayıcısız durumdaki gerilimler ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.7'de sunulmuştur.

İki baralı güç sisteminin normal çalışmadaki ortak kuplaj noktası nominal geriliminin maksimum değeri 15,1 kV iken, sınırlayıcı kullanılmadığı durumda gerçekleşen üç faz arızasında 5,7 kV'a kadar düşmektedir. Üç faz arızasında OKN gerilim seviyesindeki %62,25'lik bu düşüş, SPR-AAS uygulanarak ortadan kaldırılmış ve arıza anında da OKN gerilimi nominal seviyesinde sürdürülebilmiştir. Faz-faz arızasında ise arızanın gerçekleştiği A ve B fazlarının OKN gerilimleri 9,85 kV ve 8,1 kV'a kadar düşerken, SPR-AAS ile arıza anındaki gerilimin nominal seviyesine yaklaşması sağlanmıştır. Faz-toprak arızasında, arızalı A fazının 2,18 kV seviyesine inen gerilimi, nominal gerilim değerinin %64,2'si kadar yükseltilebilmiş

ve sınırlayıcısız durumda diğer fazlarda oluşan gerilim artışları da %37,7 oranında azaltılabilmiştir.



Şekil 4.7 Üç faz arızasında OKN gerilimi; a) Sınırlayıcısız durum, b) SPR-AAS'li durum, faz-faz arızasında OKN gerilimi; c) Sınırlayıcısız durum, d) SPR-AAS'li durum, faz-toprak arızasında OKN gerilimi; e) Sınırlayıcısız durum, f) SPR-AAS'li durum

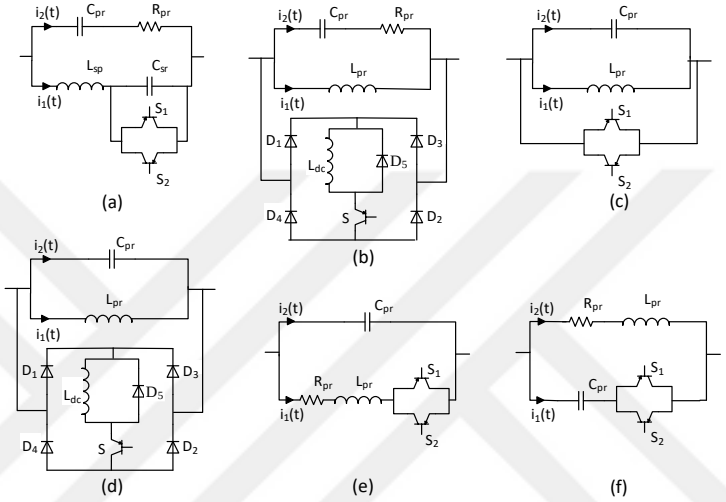
4.4 Seri-Paralel Rezonans Tipi Arıza Akımı Sınırlayıcı ile Diğer Rezonans Tipi Arıza Akımı Sınırlayıcıların Karşılaştırılması

Geliştirilen seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı, literatürde önerilmiş olan 5 farklı paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre ile belirlenen performans ve tasarım parametreleri bakımından karşılaştırılmıştır. Sınırlayıcıların hepsi aynı konumda, Şekil 4.2'de verilen güç sisteminde OKN barası çıkışında iletim hattından önce uygulanmıştır. Yük barasında farklı kısa devre arıza tiplerinin gerçekleştiği durumlar incelenmiştir. Devrelerin tümünde yarıiletken anahtar olarak IGBT kullanılmış olup, kontrolleri ise SPR-AAS için geliştirilen kontrol devresiyle sağlanmıştır. İki baralı güç sisteminde SPR-AAS'nin tasarım

parametrelerine göre belirlenmiş olan eleman büyüklükleri, diğer paralel rezonans devrelerinde de aynı büyüklükte uygulanmıştır. Buna göre, L_{sp}'nin endüktansı 101,6 mH, C_{pr} ve C_{sr}'nin kapasitesi 100 μF ve R_{pr} direnci ise 21Ω olarak kullanılmıştır.

4.4.1 Paralel Rezonans Tipi Arıza Akımı Sınırlayıcı Devreler

Önerilen SPR-AAS ve karşılaştırıldığı paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devreler Şekil 4.8'de gösterilmekte olup, topolojilerin önerildiği referans yayınlar Tablo 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.8 a) Önerilen SPR-AAS devresi [149], b) Paralel LC rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [128], c) Kontrollü rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [142], d) Kontrollü paralel rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [150], e) IGBT kontrollü rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [151], f) Rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı [143]

Paralel LC rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı (Topoloji b), paralel rezonans empedansı ve ona paralel köprü diyottan oluşmaktadır. Normal çalışma şartlarında, diyot köprüsünün DC çıkış veren uçlarına bağlı olan S yarıiletken anahtarı sürekli olarak iletimdedir. Hat akımı pozitif alternansta D_1, L_{dc}, S, D_2 ve negatif alternansta ise D_3, L_{dc}, S, D_4 üzerinden geçmektedir. Kısa devre arızasının ardından, S kesime sokulur. Arıza akımının ilk pikinin sınırlanmasına anahtarın kesime girdiği ilk anda L_{dc} de katkıda bulunur. Anahtarın kesime girmesinden dolayı, arıza akımı L_{pr}, C_{pr} ve R_{pr}'nin paralel rezonans empedansını oluşturduğu kola yönlenir ve sisteme dahil olan yüksek empedans ile arıza akımı sınırlanır. Arızanın ardından, S anahtarı tekrar iletime geçirilir ve sistem normal çalışmasına geri döner.

Tablo 4.6 Paralel rezonans tipi sınılayıcıların önerildiği referans yayınlar

Topoloji	Referans No	Referans Açıklaması
a (SPR-AAS)	[149]	O. Arikan and B. Kucukaydin, "A new approach to limit fault current with series–parallel resonance strategy," Electrical Engineering, vol. 102, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00952-5.
b	[128]	S. B. Naderi, M. Jafari, and M. Tarafdar Hagh, "Parallel-Resonance-Type Fault Current Limiter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 7, Jul. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2196899.
c	[142]	G. G. Karady, "Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit," IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, vol. 139, no. 1, 1992, doi: 10.1049/ip-c.1992.0001.
d	[150]	G. Rashid and M. H. Ali, "Fault ride through capability improvement of DFIG based wind farm by fuzzy logic controlled parallel resonance fault current limiter," Electric Power Systems Research, vol. 146, May 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.01.018.
e	[151]	C. S. Chang and P. C. Loh, "Designs synthesis of resonant fault current limiter for voltage sag mitigation and current limitation," in 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings , 2000, pp. 2482–2487, doi: 10.1109/PESW.2000.847199.
f	[143]	M. J. Damghani, D. Faramarzi, H. A. Abyaneh, and B. Vahidi, "Application of a parallel-resonance-type FCL for maintaining the recloser-fuse coordination in a power distribution system with a dispersed generation," in 2015 30th International Power System Conference (PSC), Nov. 2015, pp. 190–194, doi: 10.1109/IPSC.2015.7827747.

Kontrollü rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcının (Topoloji c), birbirlerine ters paralel bağlanmış S_1 ve S_2 IGBT anahtarları normal işletimde iletimdedir. Bu sayede, paralel kollarında bulunan C_{pr} ve L_{pr}'den oluşan paralel rezonans empedansı baypas edilmektedir. Kısa devre arızasının meydana gelmesiyle, yarıiletken anahtarlar kesime sokulur ve arıza akımı paralel rezonans empedansı ile sınırlanır. Arıza durumunun ortadan kalkması ile IGBT'ler tekrar iletime geçirilir.

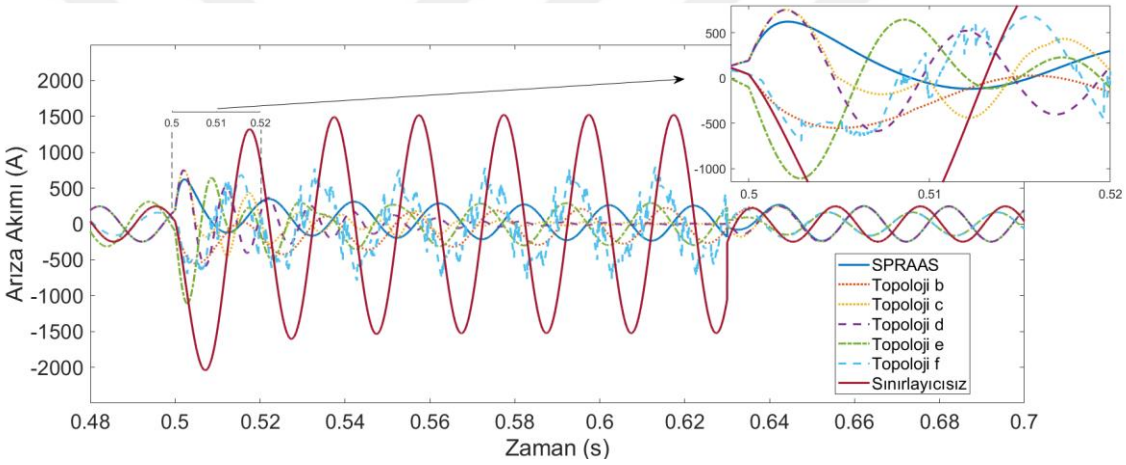
Kontrollü paralel rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcının (Topoloji d) devre yapısı topoloji b ile benzerlik gösterirken, çalışma prensipleri ise aynıdır. İki devre arasındaki en temel fark topoloji b'nin sınırlama empedansı L_{pr}, C_{pr} ve R_{pr}'den oluşurken, topololoji d'nin arıza akımını sınırladığı paralel rezonans empedansının sadece L_{pr} ve C_{pr}'den meydana gelmesidir.

IGBT kontrollü rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcı (Topoloji e) ve rezonans tipi arıza akımı sınırlayıcının (Topoloji f), normal çalışmada da sistemde aktif olarak yer

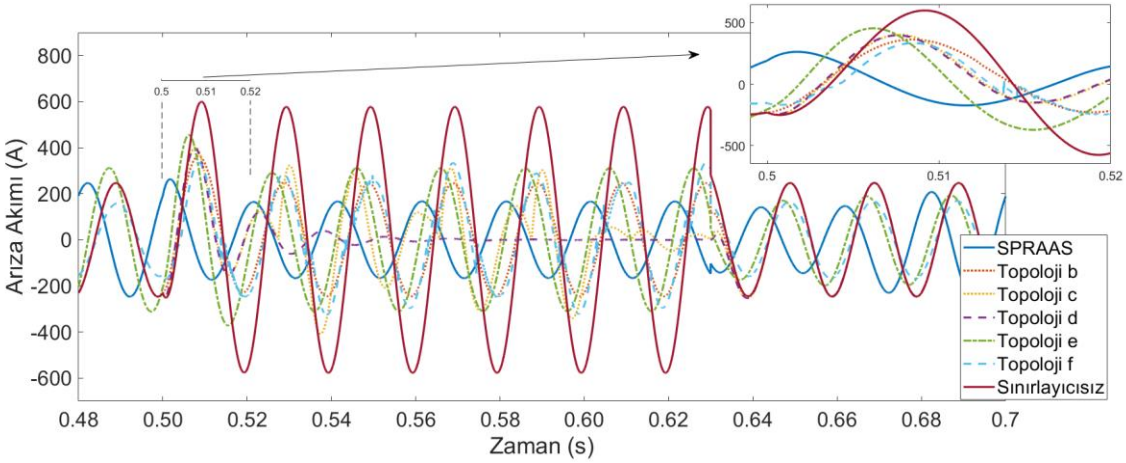
alan elemanları bulunmaktadır. Topoloji e'nin C_{pr} kondansatörü ile topoloji f'nin R_{pr} ve L_{pr} elemanları arıza dışı durumlarda hat akımını üzerlerinden geçirdiklerinden dolayı, gerilim düşümü, güç kayıpları ve bazı baralarda gerilimlerin yükselmesine neden olmaktadırlar. Kısa devre arızasının sonrasında ise uzun bir toparlanma süresine ihtiyaç duyulmaktadır.

4.4.2 Arıza Akımını Sınırlama Performanslarının Karşılaştırılması

Eleman büyüklükleri aynı olan SPR-AAS ve diğer paralel rezonans tipi sınırlayıcılar, ilk olarak arıza akımı sınırlama kapasiteleri bakımından karşılaştırılmıştır. Sınırlayıcısız durum ile farklı arıza akımı sınırlayıcıların uygulanması durumunda meydana gelen arıza akımı değişimleri, Şekil 4.9'da üç faz arızası ve Şekil 4.10'da ise tek faz-toprak arızası için verilmektedir.

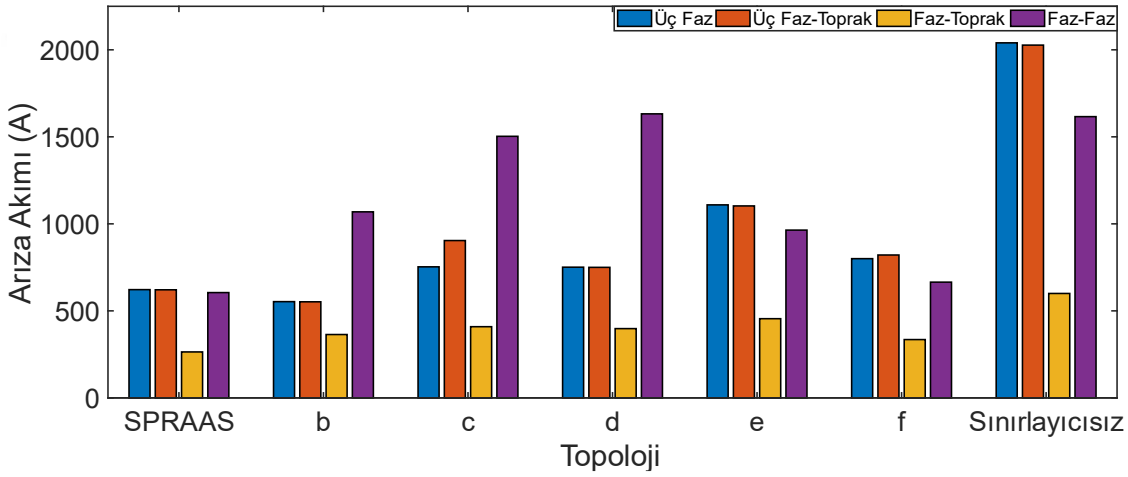


Şekil 4.9 Üç faz arızasındaki arıza akımlarının değişimi



Şekil 4.10 Faz-toprak arızasındaki arıza akımlarının değişimi

Sınırlayıcısız durumdaki üç faz arızasında, B fazının arıza akımı 2040 A'e kadar yükselmektedir. İncelenen paralel razonans tipi sınırlayıcılar uygulandığında ise arıza akımı, topoloji e dışındaki sınırlayıcılarda %61-73 aralığında değişen oranlarda sınırlanırken, topoloji e ise %46 oranında bir sınırlama ortaya koymaktadır. Faz-toprak arızasında, sınırlayıcı kullanılmadığı durumda arıza akımı A fazında 600 A seviyesine yükselmektedir. Bu arıza tipinde SPR-AAS %56 ile en yüksek arıza akımı sınırlama oranına ulaşmaktadır. Her paralel rezonans tipi sınırlayıcı devre uygulaması için farklı arıza tipleri gerçekleştirilerek arıza akımlarının ulaştığı maksimum değerler belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de sunulmuştur.

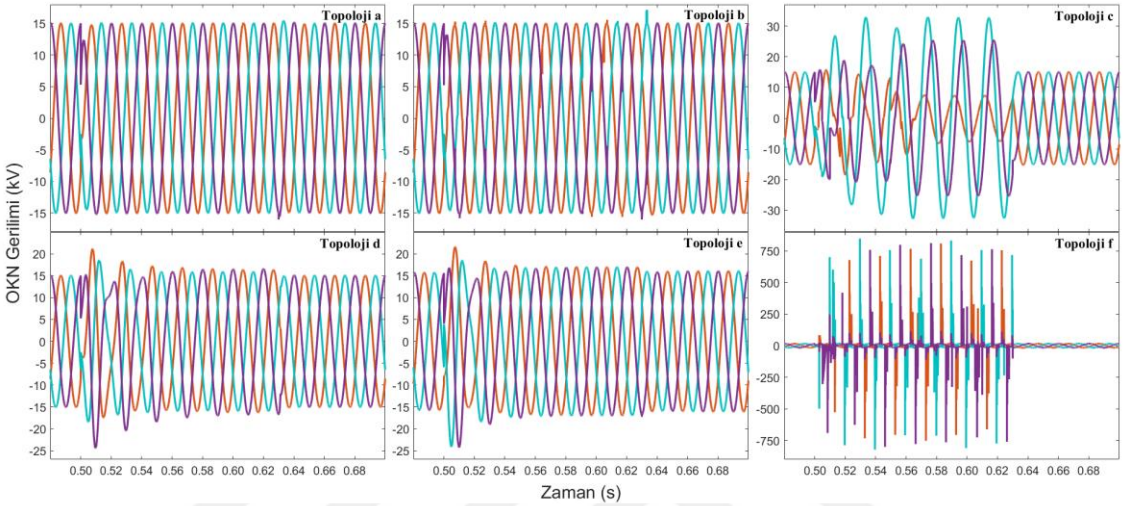


Şekil 4.11 Arıza akımlarının sınırlandığı maksimum değerler

Arıza tipine bağlı olarak, sınırlayıcıların arıza akımlarını sınırladıkları seviyeler büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin; topoloji d simetrik arızalarda arıza akımını 751 A değerinde sınırlarken, faz-faz arızasında ise arıza akımını ancak 1632 A seviyesinde tutulabilmiştir. Aynı şekilde, topoloji b ve topoloji c de diğer arıza tiplerine göre faz-faz arızasında oldukça dezavantajlı bir sınırlama kapasitesine sahiptir. Tüm kısa devre arızaları içerisinde SPR-AAS'nin arıza akımını sınırladığı en yüksek seviye 622 A iken, bu değer diğer sınırlayıcılarda 1069 A, 1503 A, 1632 A, 1109 A ve 821 A olarak gerçekleşmiştir. Önerilen SPR-AAS incelenen diğer paralel rezonans tipi sınırlayıcılar arasında, en kararlı arıza akımı sınırlama kapasitesine sahip devredir.

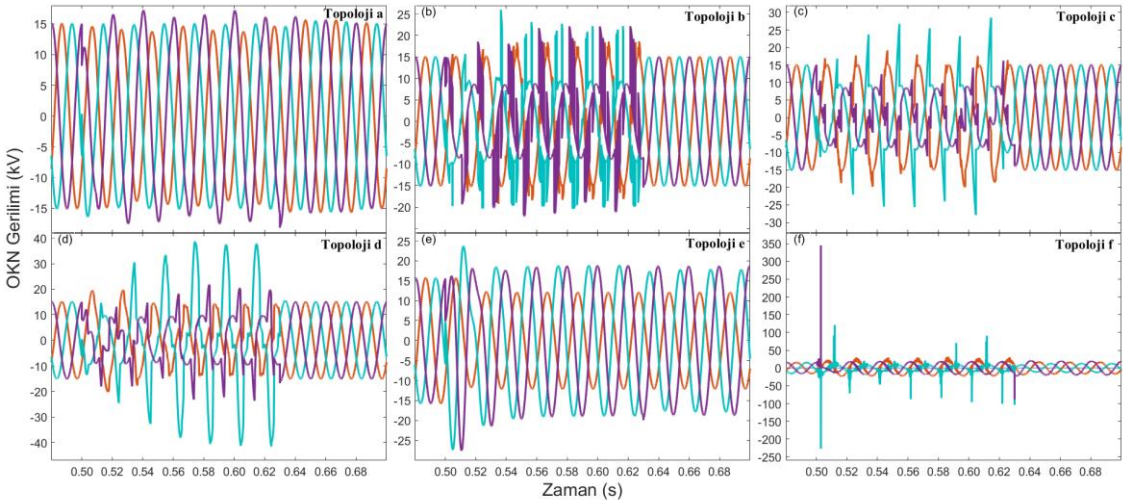
4.4.3 Ortak Kuplaj Noktası Gerilimi Kararlılığına Etkileri

Önerilen SPR-AAS, kısa devre arızalarında yüksek arıza akımlarını sınırken, OKN gerilim kararlılığını da koruyabilen bir devredir. Diğer paralel rezonans devrelerinin de OKN gerilimine katkısı incelenmiş olup, üç faz arızasındaki OKN gerilimi değişimleri Şekil 4.12'de ve faz-faz arızasındaki OKN gerilimi değişimleri ise Şekil 4.13'te sunulmuştur.



Şekil 4.12 Üç faz arızasındaki OKN gerilimlerinin değişimi

SPR-AAS (Topoloji a) ve topoloji b, üç faz arızasında OKN geriliminin nominal seviyesinde kalmasını sağlayabilmiştir. Arızanın ortadan kalktığı anda topoloji b kullanılması durumunda oluşan gerilim yükselmesi SPR-AAS'ye göre 1,2 kV daha yüksek olarak gerçekleşmiştir. Diğer devrelerde ise arıza boyunca OKN gerilim kararlılığının sağlanamadığı ve gerilim düzeyinin sırasıyla 32,9 kV, 24,4 kV, 24,3 kV ve geçici gerilimlerde 848 kV değerlerine kadar yükselebildiği görülmektedir. Topoloji f, üç faz arızasında neden olduğu geçici gerilim yükselmeleri sebebiyle uygulanabilir olmaktan uzaktır.



Şekil 4.13 Faz-faz arızasındaki OKN gerilimlerinin değişimi

SPR-AAS devresi faz-faz arızasında OKN geriliminde oluşabilecek yükselme ve düşüşleri kabul edilebilir bir seviyede tutmaktadır. Diğer sınırlayıcılar ise OKN geriliminde ciddi yükselmelere sebep olmaktadır.

4.4.4 Arıza Akımı Sınırlayıcılarda Oluşan Güç Kayıpları

SPR-AAS ve ideal özelliklere sahip diğer sınırlayıcılar, normal işletim koşullarında sistem üzerinde ihmal edilebilecek büyüklükte bir empedans göstermekte ve bu sayede sınırlayıcı üzerinde kayda değer bir güç kaybı oluşmamaktadır. Kısa devre arızasıyla birlikte, sınırlayıcı empedansının arıza akımına maruz kalması nedeniyle, üzerinde ciddi büyüklükte güç kayıplarının meydana gelmesi beklenmektedir. Bundan dolayı, bir tasarım parametresi olarak ele alınan sınırlayıcılar üzerinde oluşan anlık güç kayıpları farklı arıza durumları için incelenmiş ve tespit edilen en yüksek değerler Tablo 4.7'de verilmektedir.

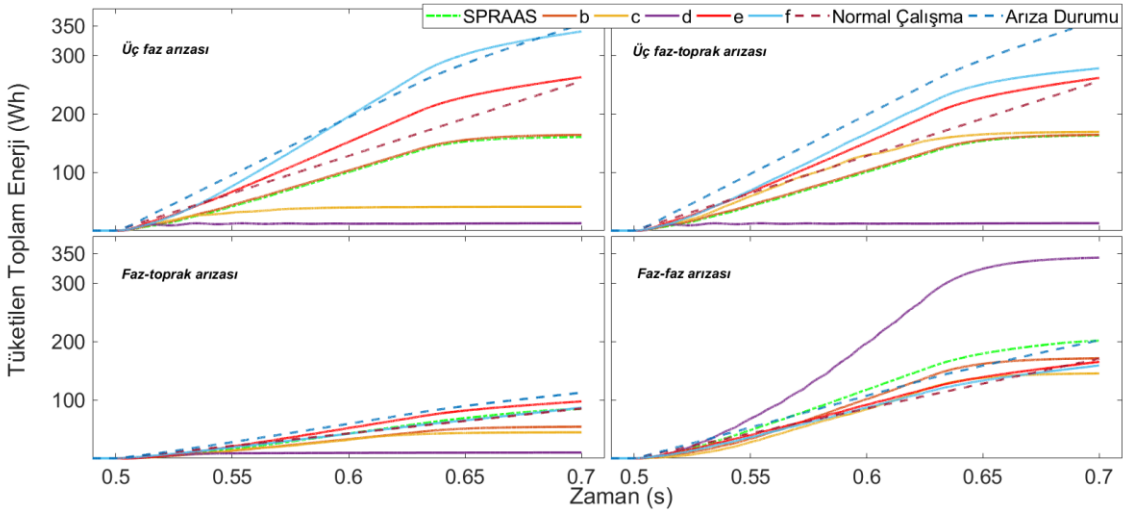
Tablo 4.7 Sınırlayıcılar üzerinde oluşan anlık en yüksek güç kayıpları

Topoloji	**Güç Kayıpları (MW)**			
	Üç Faz	**Üç Faz-Toprak**	**Faz-Toprak**	**Faz-Faz**
a (SPR-AAS)	1,67	1,66	0,99	2,86
b	1,68	1,67	1,59	4,19
c	2,07	3,12	1,91	3,89
d	1,82	1,80	1,22	7,49
e	2,46	2,44	2,55	2,91
f	3,53	3,22	1,12	3,01

Tüm kısa devre arızalarında diğer sınırlayıcılara göre SPR-AAS üzerinde en düşük güç kaybının oluştuğu devre olmuştur. Üzerinde daha az güç kaybı oluşan SPR-AAS'nin diğer devrelere göre daha az ısınacağı ve bundan dolayı da ömür ve güvenilirlik açısından daha avantajlı bir yapıya sahip olduğu açıkça ortadadır.

4.4.5 Arıza Anında Sınırlayıcıların Toplam Enerji Tüketimi

Arıza akımı sınırlayıcıların sistemin geçici kararlılığına etkisini değerlendirebilmek için arıza boyunca tükettikleri toplam enerji miktarı analiz edilmiştir. Bunun için sistemde sınırlayıcının yer almadığı normal çalışma ve arıza durumlarında sistemde üretilen toplam enerji miktarı, arıza süresi olan 130 ms boyunca toplanarak lineer enerji değişim eğrileri elde edilmiştir. Sınırlayıcıların tükettikleri enerjinin miktarını belirleyebilmek için de aynı yöntem izlenmiştir. Arızanın başında devreye giren sınırlama empedansı ile enerji tüketilmeye başlanmakta ve arıza neticeleninceye kadar olan süre zarfında anlık enerji tüketimi toplanarak, sınırlayıcının enerji tüketim karakteristiği elde edilmektedir. Sınırlayıcının normal durumdaki enerji değişim eğrisine yakın bir tüketime sahip olması, sistemin geçici kararlılığının korunmasına katkı sağlamaktadır. Paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcıların farklı arıza durumları için toplam enerji tüketim eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 4.14'te yapılmıştır.



Şekil 4.14 Sınırlayıcıların arıza boyunca toplam enerji tüketimleri

Topoloj d üç faz arızasında çok düşük bir enerji tüketimine sahipken, faz-faz arızasında ise arıza durumu için oluşturulan eğrinin çok üzerinde bir seviyeye ulaşmaktadır. Topoloji c ise sadece üç faz arızasında enerji tüketimi bakımından

düşük bir düzeyde kalmaktadır. SPR-AAS ile topoloji b'nin toplam enerji tüketim eğrileri üç faz ve üç faz-toprak arızalarında birbirine oldukça yakındır. Faz-toprak arızasında SPR-AAS'nin enerji tüketimi sistemin normal çalışmadaki üretimi ile aynı olmaktadır. Arıza akımı sınırlama ve OKN gerilimi kararlılığını sağlama bakımından avantajları ortaya konan SPR-AAS, sistemin geçici kararlılığı açısından da ideal bir sınırlayıcıdır.

4.4.6 Paralel Rezonans Tipi Sınırlayıcıların Uygulanabilirliklerinin İncelenmesi

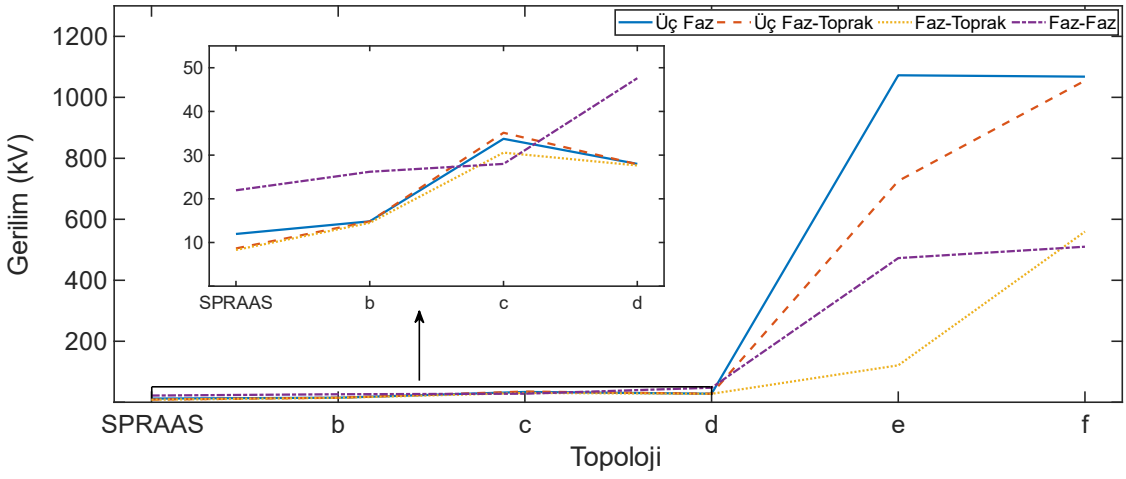
Önerilen SPR-AAS'nin uygulanabilirliği, beş farklı paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı ile karşılaştırılmış ve belirlenen performans ile tasarım parametreleri açısından üstünlüğü ortaya konulmuştur. Ele alınan parametreler bakımından farklı arıza durumları için elde edilen sonuçlar Tablo 4.8'de karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında uygulanan simetrik ve asimetrik dört farklı tipteki kısa devre arızasında, SPR-AAS'nin arıza akımlarını 264 A - 622 A gibi dar bir aralıkta sınırlayabilmesi yüksek arıza akımı sınırlama kararlılığını göstermektedir. Diğer sınılayıcılardan farklı olarak tüm arıza tiplerinde, yakın bir sınırlama performansına sahiptir. OKN gerilim kararlılığının arıza anında korunabilmesi için SPR-AAS en büyük katkıyı vermektedir. Tüm arıza tiplerinde, OKN geriliminin nominal seviyesinde kalmasını sağlarken, arıza sonunda normal çalışmaya geçişte OKN geriliminde oluşan yükselmenin de en düşük olduğu sınırlayıcıdır. Aynı şekilde, tüm kısa devre arızalarında üzerinde oluşan anlık güç kaybı en düşük devredir ve arıza sonrasında hızlı bir toparlanma oluşturabilmektedir.

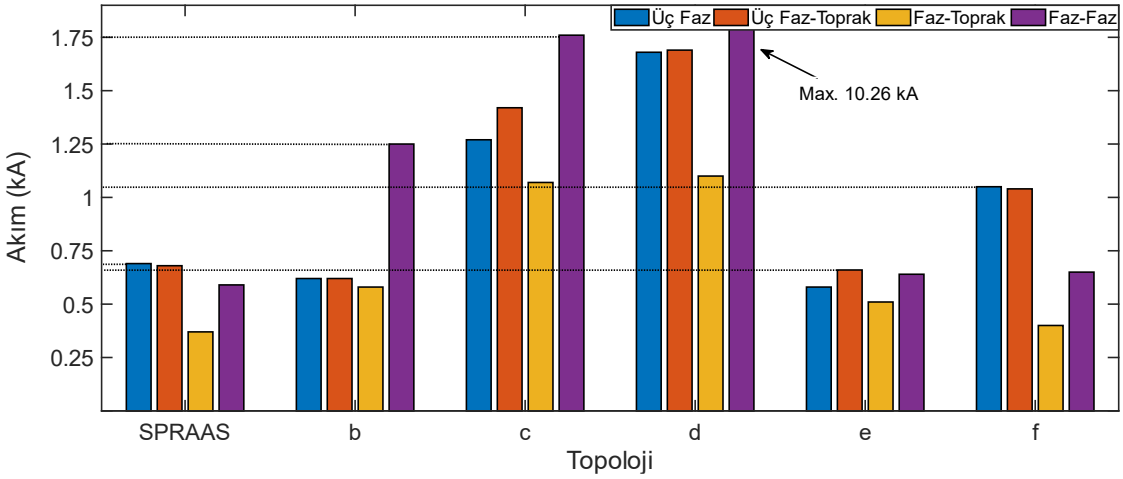
Katı hal arıza akımı sınırlayıcıların maliyeti ve güvenilirliği açısından, yarıiletken anahtarların maruz kaldıkları gerilim ve akım seviyesi belirleyici bir faktördür. Akım ve gerilim dayanımlarının en kötü duruma göre belirlenmesi gerektiğinden dolayı, farklı kısa devre arızaları için sınırlayıcının yarıiletken anahtarlarının ulaştığı maksimum gerilim ve akım seviyesi tespit edilmelidir. Yarıiletken anahtarların farklı kısa devre arızalarında maruz kaldığı maksimum gerilim seviyeleri Şekil 4.15'te ve en yüksek akım değerleri ise Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.8 Sınırlayıcıların çeşitli parametreler bakımından karşılaştırılması

Arıza	Topoloji	En yüksek arıza akımı (A)	En yüksek OKN gerilimi (kV)	OKN gerilim kalitesi	En düşük güç kaybı	Toparlanma süresi (ms)
Üç Faz	a (SPR-AAS)	619	16,04	✓	✓	10,6
	b	553	17,16	✓	-	143,61
	c	753	32,86	✓	-	10,45
	d	751	24,43	✓	-	906,95
	e	1109	24,26	✓	-	<<
	f	800	848,04	Distorsiyon	-	<<
Üç Faz-Toprak	a (SPR-AAS)	621	16,04	✓	✓	17,12
	b	552	17,13	✓	-	103,61
	c	904	31,45	Distorsiyon	-	10,42
	d	750	24,37	✓	-	906,95
	e	1103	24,17	✓	-	<<
	f	821	836,71	Distorsiyon	-	<<
Faz-Toprak	a (SPR-AAS)	264	19,68	✓	✓	73,66
	b	364	19,68	✓	-	1380,28
	c	409	29,93	Distorsiyon	-	10,41
	d	398	27,3	✓	-	<<
	e	455	22,82	✓	-	<<
	f	335	511,03	Distorsiyon	-	<<
Faz-Faz	a (SPR-AAS)	622	18,16	✓	✓	57,31
	b	1069	26,01	Distorsiyon	-	23,61
	c	1503	28,54	Distorsiyon	-	13,7
	d	1632	41,52	Distorsiyon	-	<<
	e	964	24	✓	-	<<
	f	665	379,81	Distorsiyon	-	<<



Şekil 4.15 Yarıiletken anahtarların maruz kaldığı maksimum gerilim seviyeleri



Şekil 4.16 Yarıiletken anahtarların taşıdıkları maksimum akım değerleri

Diğer topolojiler ile karşılaştırıldığında, SPR-AAS'de bulunan IGBT'lerin üzerinde oluşan gerilim seviyesi en düşüktür. Faz-faz arızasında, SPR-AAS'nin yarıiletkenleri maksimum 21,95 kV'luk gerilim değerine ulaşırken, en yakın devre olan topoloji b'de 4,2 kV daha yüksek bir gerilim meydana gelmektedir.

Topoloji e ve SPR-AAS, yarıiletken anahtarların en düşük akım seviyesinde kaldığı devrelerdir. Genel olarak, faz-faz arızasında anahtarların maruz kaldığı akım seviyesi yükselmektedir. Örneğin; faz-faz arızasında bu değer topoloji d için 10,26 kA'dir.

5
SERİ-PARALEL REZONANS TİPİ KATI HAL ARIZA AKIMI SINIRLAYICININ GÜÇ SİSTEMİNE KONUMLANDIRILMASININ OPTİMİZASYONU

Bir güç sisteminde kısa devre arıza akımlarının büyüklüğünü, izin verilen güvenli düzeye düşürebilmek için gerekli arıza akımı sınırlayıcı sayısı, boyutları ve yerleşim yerleri çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir. Arıza akımının şebeke yönetmeliklerinde belirlenen kritik değerin üzerine çıktığı her barada kullanılması, sınırlayıcıların maliyetleri de dikkate alındığında efektif ve ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle, geliştirilen optimizasyon algoritmaları ile minimum sayıda ve boyutta arıza akımı sınırlayıcının sistemdeki optimum noktalarda kullanılmasıyla, tüm baralarda etkin bir arıza akımı sınırlama performansının yakalanabilmesi hedeflenmektedir.

5.1 SPR-AAS'nin Güç Sistemlerinde Optimum Yerleşimi ve Boyutlandırılması

Önerilen SPR-AAS'nin güç sistemlerinde kullanılırken, optimum yerleşim yeri ve boyutunun belirlenebilmesi için bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Optimizasyon algoritması ile sistemde yüksek arıza akımlarının izin verilen seviyede sınırlanabilmesi için kullanılması gereken arıza akımı sınırlayıcı sayısı, boyutları ve konumları belirlenmektedir. Optimizasyon çalışmaları IEEE'nin 9 baralı test sisteminde SPR-AAS uygulanması durumu için gerçekleştirilmiştir. Test sisteminde yer alan iletim hatları, transformatör ve generatörlerin özellikleri Bölüm 4'te sunulmuştu. Sistemin generatör baralarının gerilimleri 13,8 kV, 16,5 kV ve 18 kV iken, iletim hatları ise 230 kV'luk bir gerilim düzeyine sahiptir.

5.1.1 Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar

Arıza akımı sınırlayıcıların empedans büyüklüğü, arıza akımı sınırlama kapasitelerini ve maliyetlerini etkilemektedir. Bu nedenle, arıza akımının belirlenen seviyeye düşürülebilmesi için sınırlayıcının optimum yerleşim yeri ve büyüklüğü tayin edilirken, maliyetinin de minimum seviyede olması amaç fonksiyonu olarak

ele alınmıştır. Arıza akımı sınırlayıcının uygulandığı gerilim seviyesi yükseldikçe daha maliyetli bir yapıya sahip olacağından dolayı, gerilim düzeylerine göre sınırlayıcı empedansı için birim maliyet katsayısı belirlenmiştir. SPR-AAS'nin sistemdeki optimum konumu ve boyutunun belirlenebilmesi için kullanılan amaç fonksiyonu (5.1) ifadesi ile verilmektedir.

$$AF = \sum_{H}^{HS} M_H . Z_H \tag{5.1}$$

Bu ifadede,

AF : Amaç fonksiyonu,

HS : Sistemdeki toplam hat sayısı,

H : Arıza akımı sınırlayıcının uygulandığı hat,

M_H : Arıza akımı sınırlayıcının uygulandığı gerilim seviyesine bağlı olarak değişen empedansının birim maliyet katsayısı, (230 kV'tan düşük gerilim seviyesine sahip hatlarda M_H=1 ve 230 kV gerilim seviyesindeki hatlar için M_H=5 olarak alınmıştır.)

Z_H : H hattına uygulanan arıza akımı sınırlayıcının empedans büyüklüğü,

olarak tanımlanmaktadır. Optimizasyon çalışmaları önerilen SPR-AAS için gerçekleştirildiğinden dolayı, kullanılan Z_H empedans büyüklükleri bu devre için hesaplanmıştır. SPR-AAS iki paralel koldan oluşmakta olup, üst kol empedansı olan Z_1 ile alt kol empedansı olan Z_2 kullanılarak, sınırlayıcının eşdeğer empedansı belirlenmiştir. (5.2), (5.3) ve (5.4) ifadeleri SPR-AAS empedansının hesaplanması için kullanılmıştır.

$$Z_1 = R_{pr} - j\left(\frac{1}{\omega C_{pr}}\right) \tag{5.2}$$

$$Z_2 = j\omega L_{sp} \tag{5.3}$$

$$Z_H = Z_1 // Z_2 \tag{5.4}$$

(5.5) ifadesini tüm baralar için sağlayan ve amaç fonksiyonunu minimize eden çözüm, sistemde kullanılan arıza akımı sınırlayıcı sayısı, boyutu ve yerleşim yerleri bakımından optimizasyonu sağlamaktadır.

$$I_A < I_{kr} \tag{5.5}$$

Burada, I_A arıza akımının büyüklüğünü (kA) ve I_{kr} ise arıza akımlarının sınırlanmak istediği değeri (kA) ifade etmektedir. Amaç fonksiyonunda yer alan Z_H empedansını oluşturan L_{sp} ile R_{pr} için optimizasyon probleminin çözümünde, (5.6) ve (5.7)'deki kısıtlar getirilmiştir.

$$L_{min} \leq L_{sp} \leq L_{max} \tag{5.6}$$

$$R_{min} \leq R_{pr} \leq R_{max} \tag{5.7}$$

Bu ifadelerde, endüktans değerleri olarak $L_{min} = 10\ mH$ ve $L_{max} = 50\ mH$, direnç değerleri için $R_{min} = 10\ \Omega$ ve $R_{max} = 50\ \Omega$ olarak belirlenmiştir. C_{pr} ve C_{sr} kondansatörleri için kısıt oluşturulmamasının nedeni, L_{sp} bobininin endüktans değeri ile rezonansı sağlayacak büyüklüklerde kullanılmalarıdır. Direnç ve endüktans değerleri için belirlenen kısıtlar ile bu değer aralıklarının dışında kullanılan eleman büyüklüklerinde arıza akımı sınırlama seviyesinde oluşabilecek kararsızlıkların önüne geçilmektedir.

5.1.2 Bara Empedans Matrisi ve Thevenin Empedansı

Arıza akımı seviyesi bakımından güç sistemini en çok zorlayan arıza tipi olan üç faz arızası için analizler gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki tüm baralarda üç faz arızası gerçekleşmesi durumunda oluşacak arıza akımları incelenmiştir. Optimizasyon algoritması IEEE'nin 9 baralı sisteminde test edilmiştir. IEEE'nin 9 baralı sisteminde bulunan iletim hatlarının direnç, endüktif reaktans ve süseptans değerleri ile transformatörlerin endüktif reaktans değerleri kullanılarak bara admitans matrisi oluşturulmuştur. Bara admitans matrisinin tersi alınarak bara empedans matrisi elde edilmiş olup, üç faz arızasındaki bara akımlarının hesaplanmasında bu matrisin diyagonal elemanları kullanılmıştır. Üç faz arızasında sistemde herhangi bir SPR-AAS uygulanmadığı durumdaki bara akımları (5.8) ifadesi ile belirlenmiştir.

$$I_A = \frac{V_b}{|Z_{bb}|} \tag{5.8}$$

Burada, I_A akımı b barasında üç faz arızası oluşması durumunda meydana gelen arıza akımı, Z_{bb} bara empedans matrisinin b numaralı diyagoneli ve V_b ise aynı baranın arıza öncesi gerilim değeridir.

SPR-AAS uygulanması durumunda, sınırlayıcı empedansının büyüklüğüne bağlı olarak baraların Thevenin empedans değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Böylece, SPR-AAS empedansının uygulandığı bara ve diğer baralardaki arıza akımları üzerinde yarattığı etki görülebilmektedir. SPR-AAS empedansındaki her değişimde, baraların Thevenin empedansları yeniden hesaplanmaktadır. Eğer sınırlayıcı p ve r baraları arasında konumlandırılacak ise bara empedans matrisinde bulunan diyagonel dışındaki elemanların yeni değerleri (5.9) ifadesi ile belirlenmelidir [81], [152].

$$Z_{mn}^{yeni} = Z_{mn}^{eski} - \frac{(Z_{mp} - Z_{mr})(Z_{pn} - Z_{rn})}{Z_{pp} + Z_{rr} - 2Z_{pr} + Z_a} \tag{5.9}$$

Bu ifadedeki Z_{mn}^{eski} ve Z_{mn}^{yeni}, bara empedans matrisinde diyagonel dışındaki elemanların eski ve yeni değerlerini belirtmektedir. Sınırlayıcı empedansının baraların Thevenin empedansları üzerinde sağladığı artışın belirlenebilmesi için ihtayaç duyulan Z_d empedansı (5.10) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$Z_d = -\frac{Z_a(Z_a + Z_H)}{Z_H} \tag{5.10}$$

Sistemde bir SPR-AAS uygulanması durumunda, baraların Thevenin empedanslarında oluşacak değişimler her bara için ayrı olarak (5.11) ifadesi kullanılarak elde edilmektedir [89].

$$\Delta Z_{bb} = -\frac{(Z_{bp} - Z_{br})^2}{Z_{pp} + Z_{rr} - 2Z_{pr} + Z_d} \tag{5.11}$$

Buna göre b barasının yeni Thevenin empedans değeri (5.12) ifadesi ile tespit edilmektedir.

$$Z_{bb}^{yeni} = Z_{bb}^{eski} + \Delta Z_{bb} \tag{5.12}$$

Eğer sistemde birden fazla SPR-AAS uygulanıyor ise (5.13) ifadesi ile tüm sınırlayıcıların bara empedanslarına olan katkısı dahil edilmektedir.

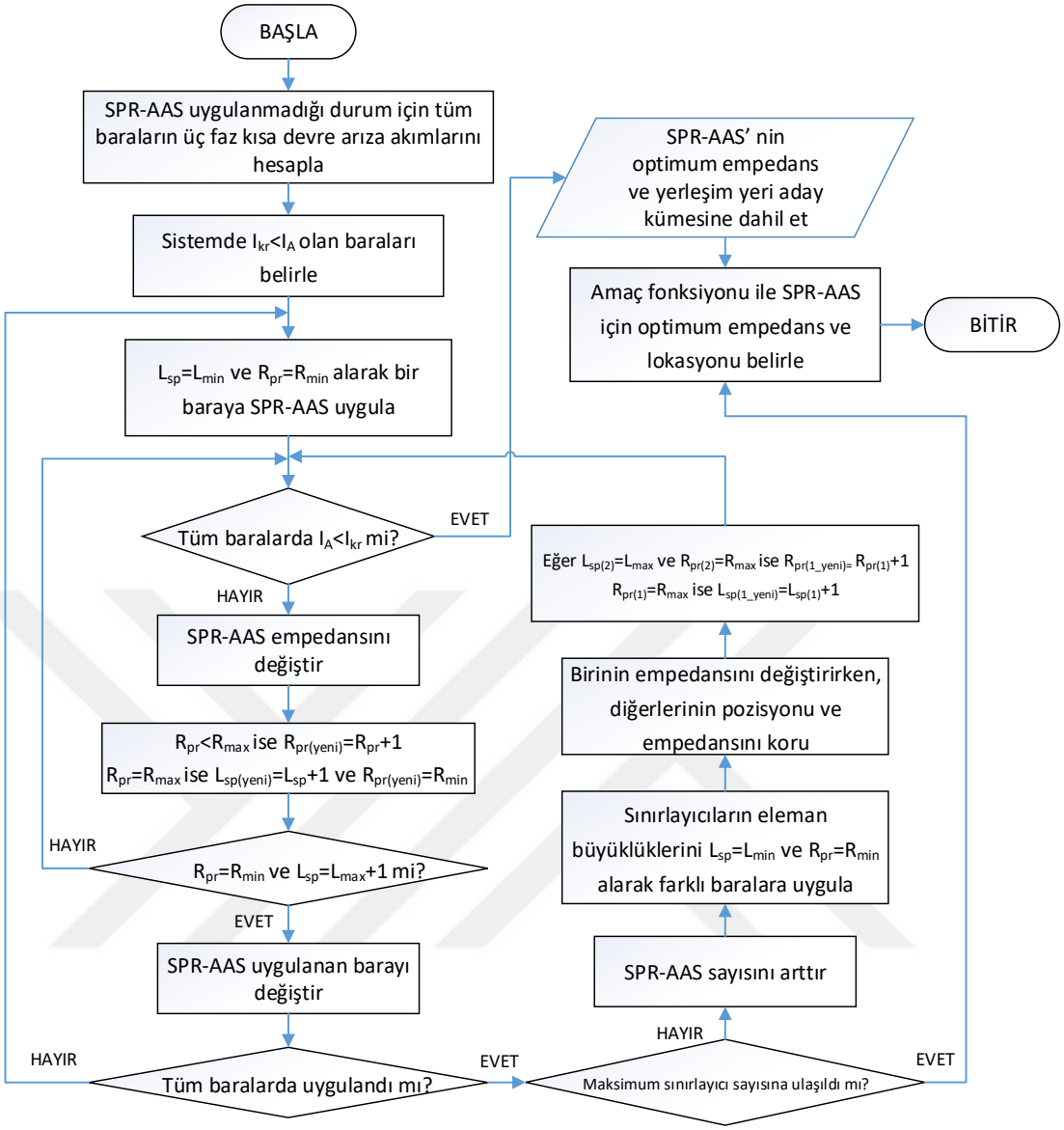
$$Z_{bb}^{yeni} = Z_{bb}^{eski} + \sum_{H}^{HS} \Delta Z_{bb}^{H} \quad (5.13)$$

5.1.3 Optimizasyon Algoritması

Arıza akımı sınırlayıcıların güç sistemlerindeki optimum yerleşim yerleri ve empedans büyüklüklerinin belirlenebilmesi için çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Önerilen SPR-AAS'nin konum ve boyut optimizasyonu için uygulanan optimizasyon algoritmasının akış diyagramı Şekil 5.1'de verilmektedir.

Optimizasyon algoritmasında öncelikli olarak, SPR-AAS'nin uygulanacağı güç sisteminde bulunan tüm baraların üç faz arızasındaki arıza akımı değerleri oluşturulan bara empedans matrisi kullanılarak belirlenmektedir. SPR-AAS yüksek empedansı ile sistemde izin verilen I_{kr} akım seviyesinin üzerindeki bara akımlarını bu değerin altına düşürebilmek için kullanıldığından dolayı, arıza akımları $I_{kr} < I_A$ olan baralar saptanmaktadır. Daha sonra, bir baraya $L_{sp} = L_{min}$ ve $R_{pr} = R_{min}$ eleman büyüklüklerine sahip bir sınırlayıcı konumlandırılarak devam edilmektedir.

SPR-AAS'nin L_{sp} ve R_{pr} elemanlarının değerleri her iterasyonda güncellenerek algoritma sürdürülmektedir. $R_{pr} = R_{min}$ ilk direnç değeri iken, sonraki iterasyonlarda $R_{pr(yeni)} = R_{pr} + 1$ olarak arttırılmakta ve L_{sp} ise sabit tutulmaktadır. $R_{pr} = R_{max}$ değerine ulaştığında, eğer $L_{sp} < L_{max}$ ise $L_{sp(yeni)} = L_{sp} + 1$ ve $R_{pr} = R_{min}$ alınarak, $L_{sp} = L_{max}$ ve $R_{pr} = R_{max}$ değerlerine ulaşılana kadar eleman büyüklüklerindeki değişiklikler bu şekilde gerçekleştirilmektedir. Endüktans ve direnç değerleri, eğer tüm baraların arıza akımları $I_A < I_{kr}$ olması sağlanamazsa belirlenen maksimum değerlerine kadar arttırılmaktadır. L_{sp} ve R_{pr}'nin herhangi bir değerinde baraların arıza akımları I_{kr} değerinin altına düştüğü takdirde, SPR-AAS'nin optimum lokasyonu ve Z_H empedansı için aday olarak tutulmaktadır. Sonrasında, buradaki sınırlayıcı kaldırılarak başka bir baraya $L_{sp} = L_{min}$ ve $R_{pr} = R_{min}$ değerlerine sahip bir SPR-AAS uygulanarak başka optimum çözümler bulunmaya çalışılmakta ve eleman değerlerinde aynı değişiklikler gerçekleştirilerek iterasyonlar sürdürülmektedir.



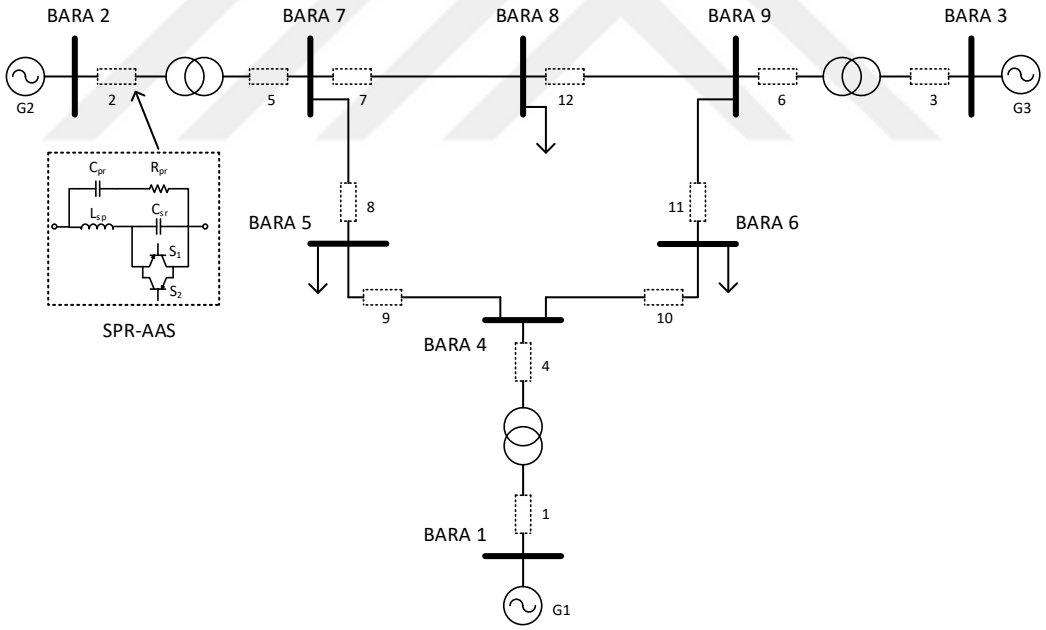
Şekil 5.1 Optimizasyon algoritması akış diyagramı

Bir SPR-AAS'nin sırasıyla tüm baralara uygulandığı ve istenilen arıza akımı sınırlama seviyesinin yakalanamadığı durumda, sisteme ikinci bir SPR-AAS dahil edilmektedir. Sistemde iki SPR-AAS olduğunda, L_{sp} ve R_{pr}'den oluşan empedanslarının değişimi için aynı yöntem izlenmektedir. Sistemde birden çok sınırlayıcı yer alması durumunda, bir SPR-AAS'nin empedans ve konum değişikliği yapılırken diğer sınırlayıcılar aynı yerleşimde ve empedansta sabit tutulmaktadır. Aynı SPR-AAS tüm baralarda uygulandığında, diğerlerinin de önce empedans daha sonra ise konumları değiştirilmektedir.

Sonuç olarak, sistemde farklı sayıda sınırlayıcı uygulanarak arıza akımının istenilen seviyeye sınırlanabilmesi için gerekli olan empedans değerleri arasında amaç fonksiyonu ile optimum empedans büyüklüğü belirlenmektedir. Bu empedans büyüklüğünde, arıza akımı sınırlayıcıların sistemdeki optimum yerleşim konumları olmaktadır.

5.2 Optimizasyon Yönteminin Uygulaması

Önerilen SPR-AAS için geliştirilen optimizasyon algoritması, IEEE'nin 9 baralı sisteminde uygulanarak analiz edilmiştir. Kullanılan optimizasyon yöntemi ile optimum boyut ve konumlarda sınırlayıcıların yerleştirilmesi ile arıza akımlarının düşürülebilmesi hedeflenmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kritik akım düzeyi 25 kA ve uygulanabilecek maksimum SPR-AAS sayısı 3 olarak belirlenmiştir. Kritik akım seviyesinin bu değeri ile arıza anındaki hat akımlarının 10 kA'i aşmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Şekil 5.2'de IEEE'nin 9 baralı sisteminde SPR-AAS'nin konumlandırılabileceği noktalar gösterilmektedir.



Şekil 5.2 IEEE'nin 9 baralı sistemi ve SPR-AAS uygulanabilecek noktalar

Optimizasyon algoritması Matlab programında ve IEEE'nin 9 baralı sisteminin kısa devre simülasyonları PSCAD/EMTDC programında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, sistemde SPR-AAS uygulanmadığı durumda baralarda meydana gelen üç faz arızalarında arıza akımlarının ulaşacağı en yüksek değerler, Matlab'te oluşturulan bara empedans matrisleri ve PSCAD/EMTDC simülasyonundan elde edilmiş olup,

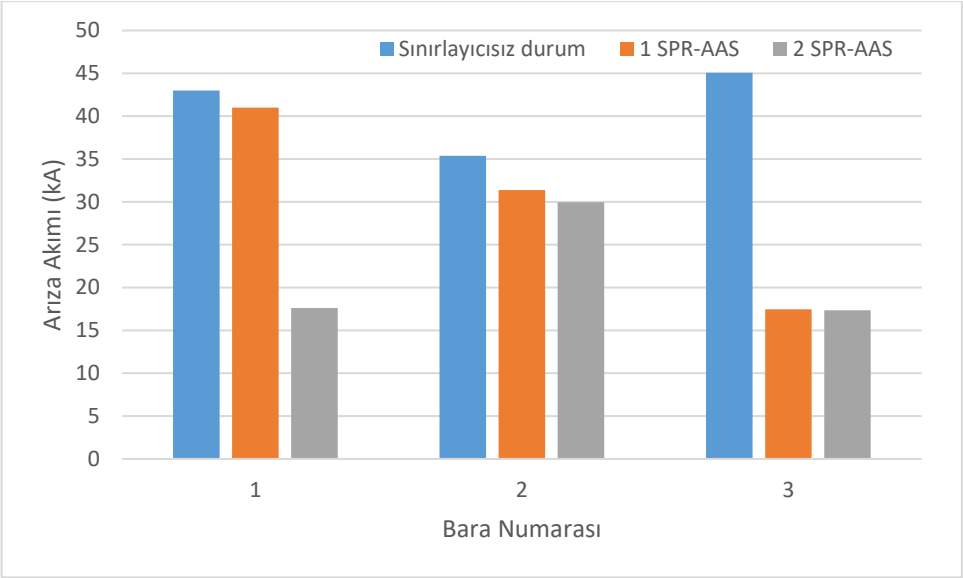
Tablo 5.1'de sunulmaktadır. Sistemin genelinde arıza akımlarının I_{kr} değerin altına düşürülmesi amaçlandığından dolayı, her barada üç faz kısa devre arızası oluşturularak arıza akımları elde edilmiştir.

Tablo 5.1 SPR-AAS uygulanmadığında oluşan arıza akımları

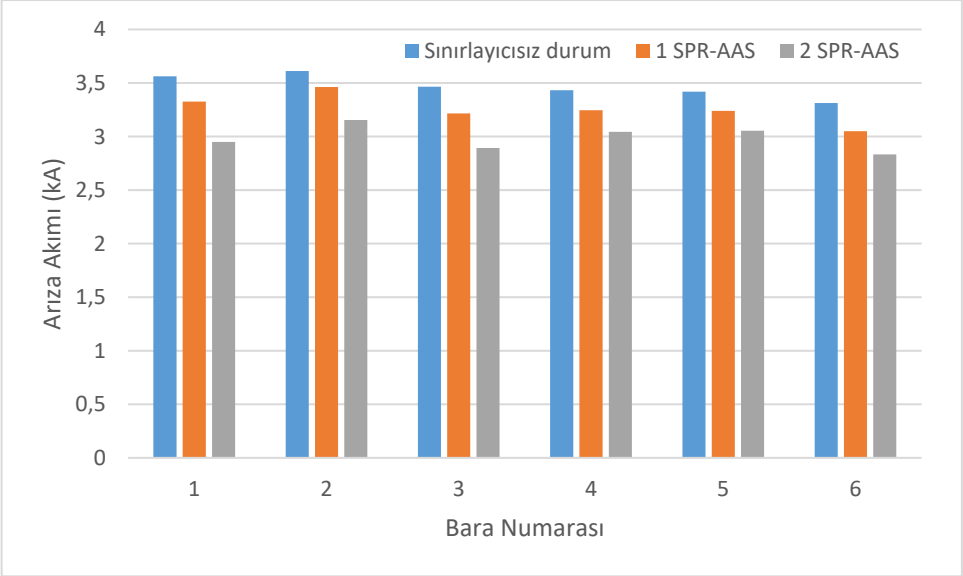
Bara Numarası	Arıza Akımları (kA)	
	Optimizasyon Algoritması (Matlab)	PSCAD
1	42,995	42,040
2	35,369	35,609
3	45,075	43,735
4	3,563	3,429
5	3,612	3,519
6	3,466	3,304
7	3,433	3,404
8	3,419	3,356
9	3,313	3,185

Sınırlayıcısız durum için optimizasyon algoritması ve simülasyondan elde edilen arıza akımlarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu ve aradaki farkın tüm baralar için %5'ten düşük kaldığı görülmektedir.

SPR-AAS, optimizasyon algoritması ile IEEE'nin 9 baralı test sisteminde uygulanabileceği 12 lokasyonda farklı sayıda ve farklı empedans büyüklükleri ile yerleştirilerek incelenmiştir. Bir ve iki SPR-AAS uygulanması durumunda, belirlenen eleman büyüklükleri ile ilgili kısıtlar dahilinde sistemdeki tüm baralarda $I_A < I_{kr}$ olmasının sağlanamadığı görülmüştür. $L_{sp} = L_{max}$ ve $R_{pr} = R_{max}$ eleman değerlerine ulaşıldığında, SPR-AAS'nin bir sınırlayıcılı durumda 3 numaralı lokasyona ve iki sınırlayıcılı durumda ise 1 ile 3 numaralı lokasyonlara yerleştirilmesi durumunda bara arıza akımlarının değişimi generatör baraları için Şekil 5.3'te ve diğer baralar için Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Bir ve iki adet sınırlayıcı uygulanması durumları için generatör baraları arıza akımlarının değişimi



Şekil 5.4 Bir ve iki adet sınırlayıcı uygulanması durumları için bara arıza akımlarının değişimi

Tüm baralarda $I_A<I_{kr}$ olmasını sağlayan, optimum sınırlayıcı sayısı, toplam sınırlama empedansı ve sınırlayıcı pozisyonları Tablo 5.2'de verilmektedir.

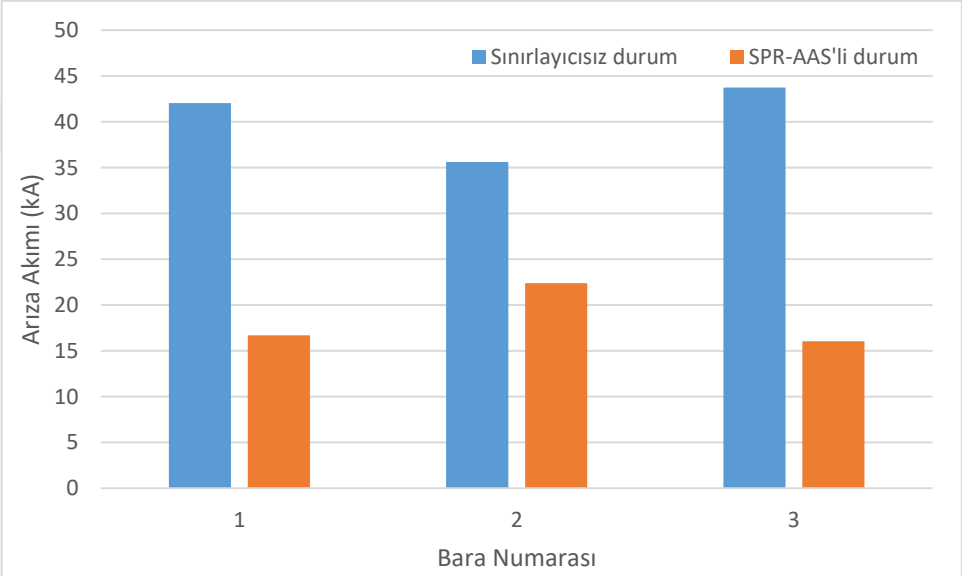
Tablo 5.2 Optimum SPR-AAS parametreleri

SPR-AAS Sayısı	SPR-AAS Konumları	Toplam Z_H (Ω)
3	1-2-3	12,1

İncelenen 9 baralı sistemde, belirlenen kısıtlarda minimum eleman büyüklükleri olan L_{sp} = 10 mH ve R_{pr} = 10 Ω değerlerinde elemanlara sahip üç adet SPR-AAS

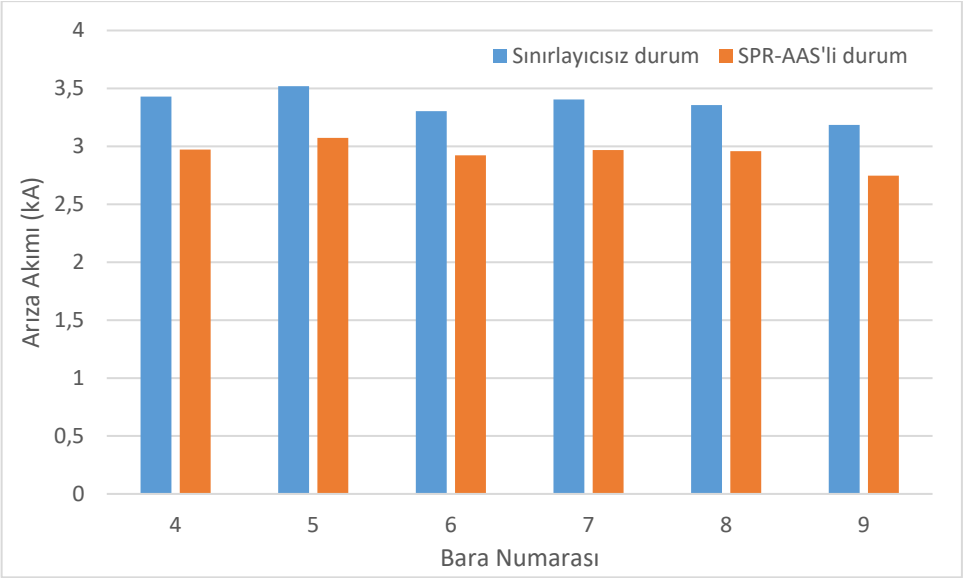
uygulanmasıyla, sistemin genelinde arıza akımları kritik değerin altına düşürülebilmektedir. Sınırlayıcıların sınırlama empedanslarının toplam büyüklüğünün 12,1 Ω olduğu belirlenmiştir. Sistemde iki sınırlayıcı konumlandırıldığında maksimum eleman büyüklükleri ile sağlanamayan arıza akımı düşüşleri, minimum endüktans ve direnç değerlerine sahip üç adet sınırlayıcıyla elde edilmiştir.

Üç faz arızasında sınırlayıcı uygulanan baralarda oluşan arıza akımlarının, optimum sayı, konum ve empedansta SPR-AAS uygulanmasıyla birlikte değişimleri Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Sınırlayıcı yerleştirilen baralarda arıza akımlarının değişimi

Arıza akımı sınırlayıcı kullanılan 1, 2 ve 3 nolu konumlarda arıza akımlarında sırasıyla %60,3, %37,15 ve %63,3 düşüşler sağlanabilmiştir. Sınırlayıcı bulunmayan diğer baralardaki arıza akımları, sınırlayıcısız durum ve SPR-AAS'li durum için karşılaştırılarak Şekil 5.6'da verilmektedir. Buna göre, sınırlayıcı kullanılmayan baralarda I_{kr} akım seviyesinin üzerinde olmayan arıza akımlarında da SPR-AAS sayesinde değişen oranlarda bir azalma oluşmaktadır.

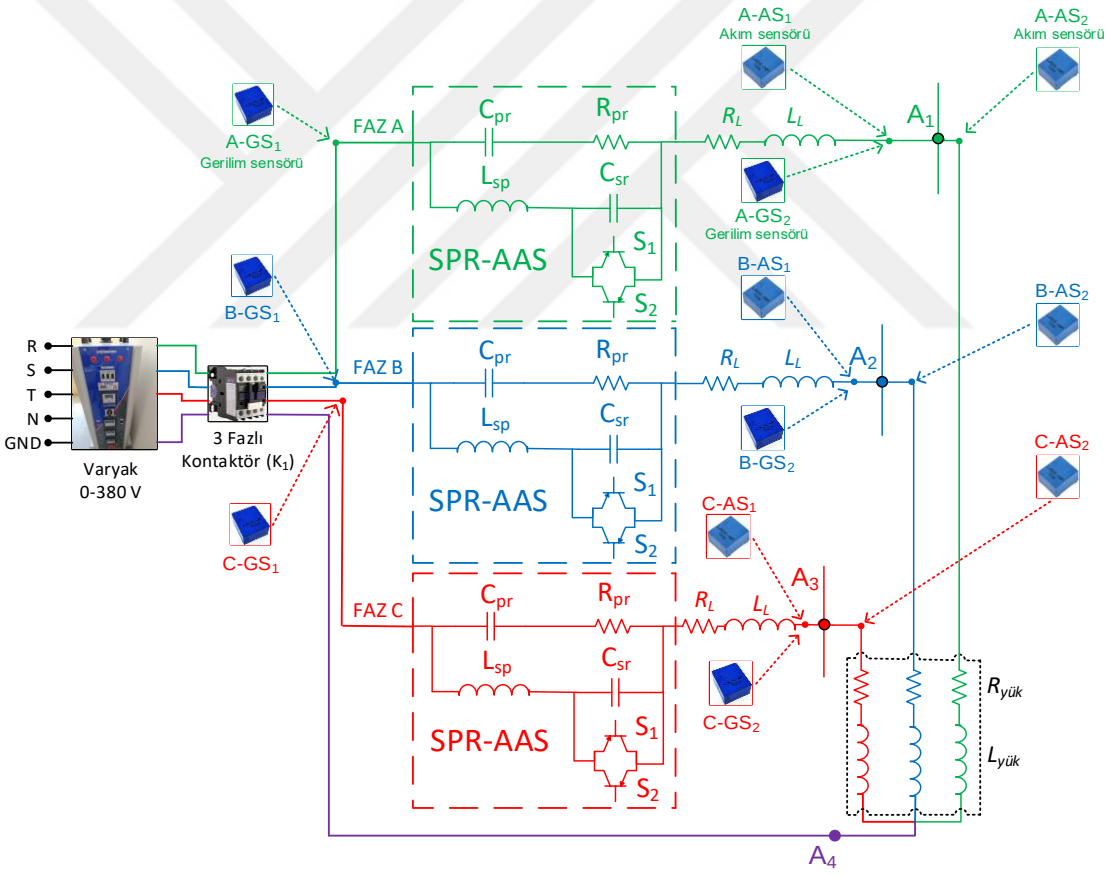


Şekil 5.6 Sınırlayıcı bulunmayan baralarda arıza akımlarının değişimi

IEEE'nin 9 baralı test sisteminin; üç generatörlü ve düşük baralı bir yapıya sahip olması, optimizasyon algoritmasının SPR-AAS için belirlediği optimum yerleşimin, çok sayıda düşük empedanslı sınırlayıcı kullanımı yönünde olmasına neden olmuştur.

6
ARIZA AKIMI SINIRLAYICI PROTOTİP UYGULAMASI

Önerilen seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devrenin fazlar arası 380 V gerilim seviyesi için prototip uygulaması gerçekleştirilmiştir. Farklı arıza tiplerindeki performansının incelenebilmesi amacıyla, Şekil 6.1'de gösterilen test devresi üç fazlı olarak oluşturulmuş ve her bir fazda SPR-AAS uygulaması yapılmıştır. Geliştirilen üç fazlı SPR-AAS prototipi; 50 Hz'lik şebeke frekansı, 0-380 V aralığındaki kaynak gerilimi ve 0-15 A aralığındaki hat akımlarında çalışmaya uygun olarak tasarlanmıştır.



Şekil 6.1 SPR-AAS'nin üç fazlı test devresi

Test devresi fazlar arası 0-380 V aralığında çıkış verebilen üç fazlı bir varyaktan beslenmektedir. Gerçekleştirilen arıza testlerinde, devre elemanlarını korumak ve devreye kontrollü bir şekilde gerilim uygulayabilmek amacıyla, varyağın test devresi ile olan bağlantısı üç fazlı bir kontaktör (K_1) üzerinden yapılmıştır. Her fazda

belirtilen noktalarda uygulanan iki akım sensörü (AS_1, AS_2) ve iki gerilim sensörü (GS_1, GS_2) vasıtasıyla, SPR-AAS' nin kontrol devresi için gerekli olan akım ve gerilim verileri elde edilmiştir. Kısa devre arıza durumlarının oluşturulabilmesi için fazların birbirleri veya faz ile toprak arasındaki bağlantılar ayrı bir kontaktör (K_2) kullanılarak sağlanmıştır.

Tablo 6.1 Farklı arıza tiplerinde sistemde oluşan akım ve gerilim değerleri

	ARIZA TİPİ				
Parametre	Tek faz-toprak	İki faz-toprak	Faz-faz	Üç faz	Üç faz-toprak
Hat akımı (A)	9,47	12,20	**12,42**	12,24	12,20
Yük akımı (A)	4,83	4,83	5,16	**5,42**	5,42
OKN gerilimi (V)	300,14	304,60	**304,72**	304,60	304,60
Yük gerilimi (V)	301,95	301,95	304,72	**328,63**	328,62
R_{pr} akımı (A)	8,42	8,42	7,93	**8,42**	8,42
C_{sr} gerilimi (V)	204,88	204,88	**438,75**	216,90	216,88
C_{pr} gerilimi (V)	243,58	244,40	**245,73**	244,52	244,40
L_{sp} gerilimi (V)	300,92	304,82	303,78	**304,82**	304,82
L_{sp} akımı (A)	13,00	13,36	12,47	**13,40**	13,36
IGBT akımı(A)	13,00	13,36	12,44	**13,40**	13,36

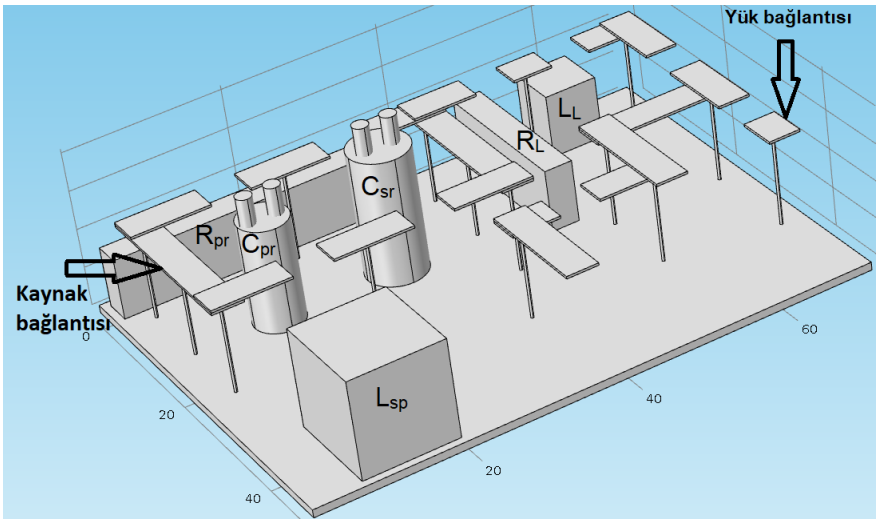
SPR-AAS prototipi ve uygulandığı test devresinde yer alan devre elemanlarının büyüklükleri, Bölüm 4'te sunulan simülasyon çalışmalarındaki eleman büyüklükleri ile aynı değerli olarak kullanılmıştır. Kaynak gerilimi uygulama çalışmasının gerilim düzeyi olan fazlar arası 380 V alınarak, test devresi PSCAD/EMTDC programında simüle edilmiş ve devre elemanlarının maruz kalacağı maksimum gerilim ve akım değerleri belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, farklı arıza tiplerinde sistemin çeşitli noktalarında ve elemanların üzerinde oluşacak maksimum akım ve gerilim değerleri Tablo 6.1'de verilmektedir.

Devre elemanlarının maksimum gerilim ve akım düzeyinin saptanmasının ardından, prototip uygulamasında kullanılacak devre elemanlarının özellikleri simülasyon sonuçlarına uygun olarak belirlenmiş ve Tablo 6.2'de sunulmuştur.

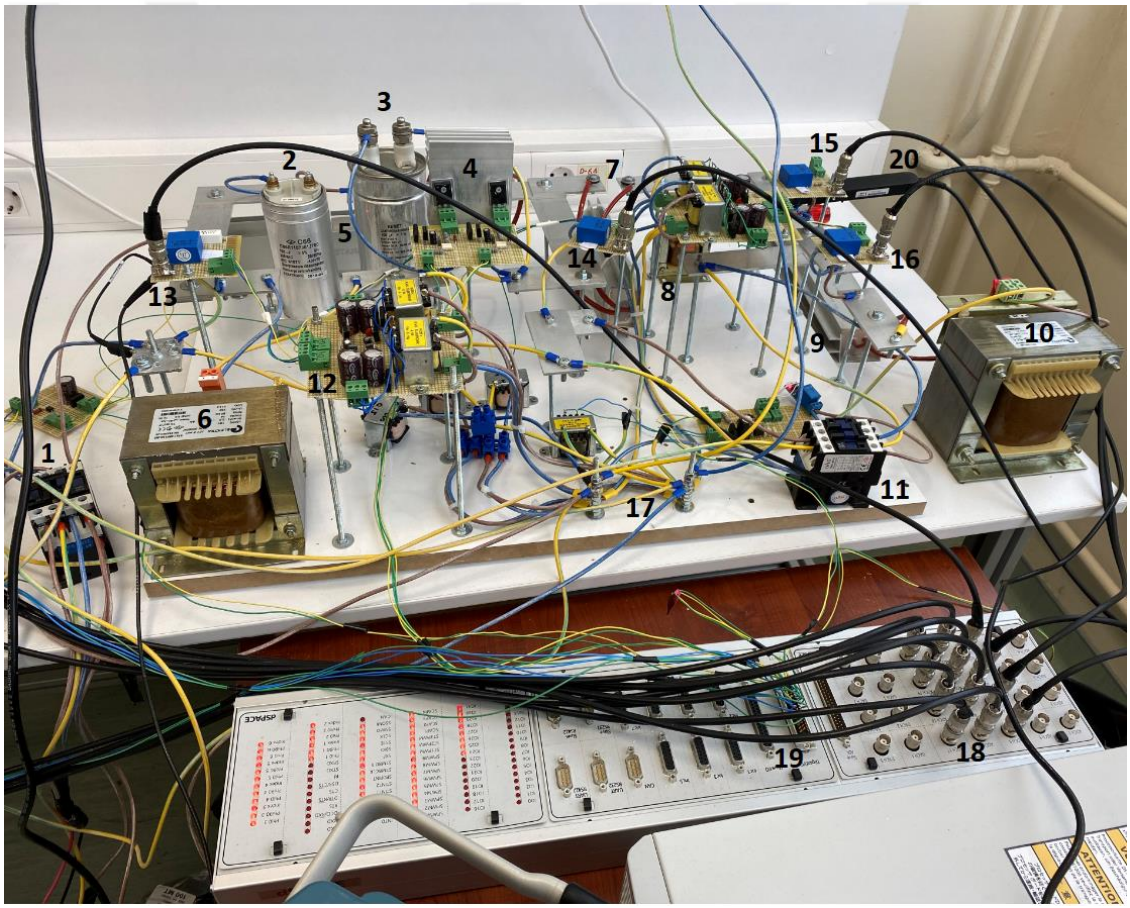
Tablo 6.2 Prototip uygulamasında kullanılan elemanların özellikleri

Eleman	Özellikleri	Eleman	Özellikleri
L_{sp}	101 mH (±%5) 3,5 A (Nominal) 16,8 A (Pik akım) 3005,3 mΩ (±%10@22C°)	C_{pr}	100 µF 330 VAC
L_L	10 mH (±%5) 3,5 A (Nominal) 16,8 A (Pik akım) 1105,5 mΩ (±%10@22C°)	C_{sr}	100 µF 480 VAC
$L_{yük}$	100 mH (±%5) 5 A (Nominal) 10,7 A (Pik akım) 882,4 mΩ (±%10@22C°)	S_1, S_2 (IGBT)	IXGH48N60C3 600 V 48 A 40-100 kHz
R_{pr}	21 Ω 1500 W	Akım sensörü	LA 25-NP 25 A (Nominal) 36 A (Maksimum)
R_L	2 Ω 500 W	Gerilim sensörü	LV 25-P 10 mA 1500 V
$R_{yük}$	50 Ω 2500 W		

Elemanların gerçek fiziksel boyutları ölçülerek, Comsol Multiphysics programında devrenin üç boyutlu tasarımı gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.2'de test devresinin tek fazı için verilmiştir. Buna göre, elemanlar her fazda 50 x 70 cm'lik bir alanda konumlandırılmış ve elemanlar arasındaki bağlantılarda alüminyum lamalardan faydalanılmıştır. Oluşturulan üç fazlı seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı prototipi ve uygulandığı test devresinin tek fazı Şekil 6.3'te ve üç fazının genel görünümü Şekil 6.4'te gösterilmektedir.

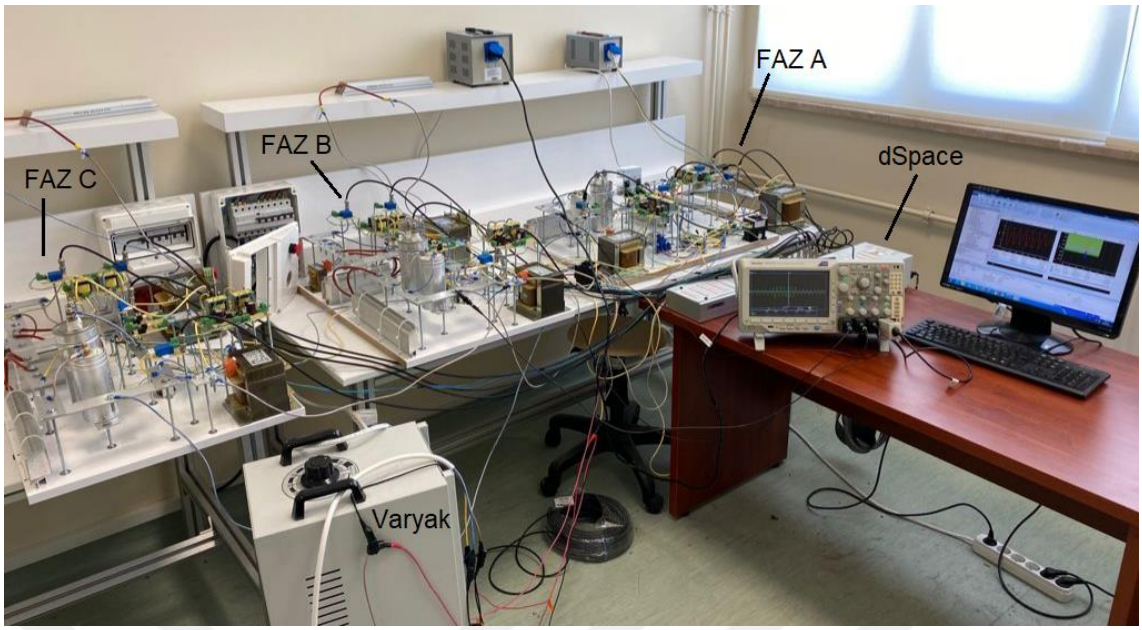


Şekil 6.2 Test devresinin tek fazının üç boyutlu modeli



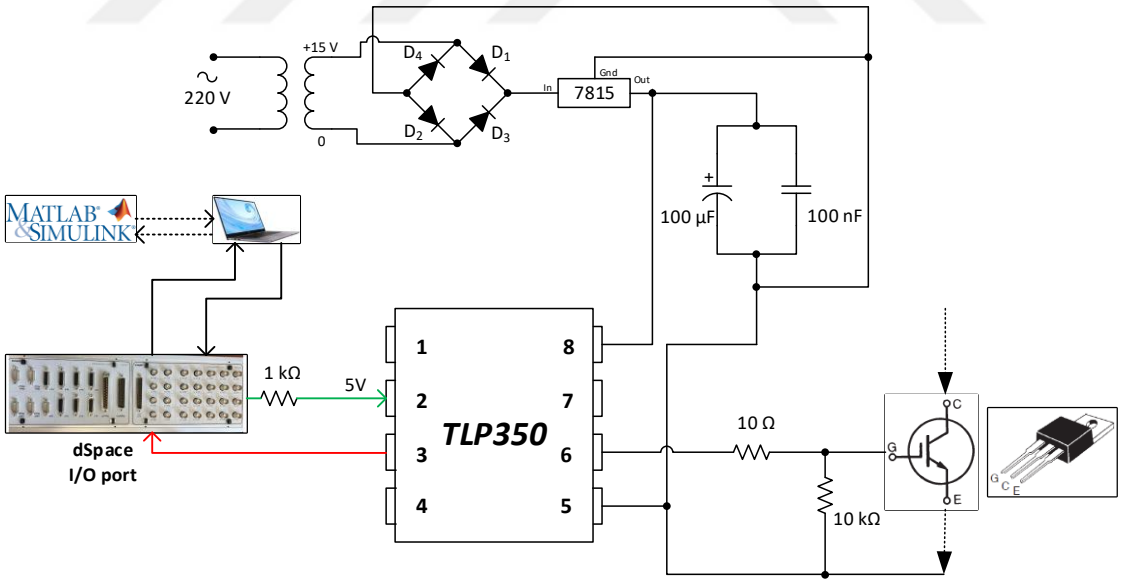
1: Kaynak tarafındaki kontaktör
2: C_{pr} kondansatörü
3: C_{sr} kondansatörü
4: IGBT sürme kartı
5: R_{pr} direnci
6: L_{sp} bobini
7: R_L direnci
8: L_L bobini
9: $R_{yük}$ direnci
10: $L_{yük}$ bobini
11: Kısa devre kontaktörü
12: Besleme kartı
13: GS_1 sensörü
14: GS_2 sensörü
15: AS_1 sensörü
16: AS_2 sensörü
17: 220 V bağlantı noktası
18: dSpace ADC-BNC bağlantısı
19: dSpace I/O portu
20: Akım probu

Şekil 6.3 SPR-AAS prototipi ve uygulandığı test devresinin tek faz görüntüsü



Şekil 6.4 Üç fazlı SPR-AAS prototipi ve test devresinin genel görünümü

Uygulama devresinde sürme devresi kartı, sensör kartı ve besleme kartı olmak üzere üç farklı tipte kart kullanılmıştır. Şekil 6.5'te, SPR-AAS'de yer alan ve C_{sr} kondansatörüne ters-paralel olarak bağlanmış IGBT anahtarların kontrolü için oluşturulmuş sürme devresi verilmiştir.

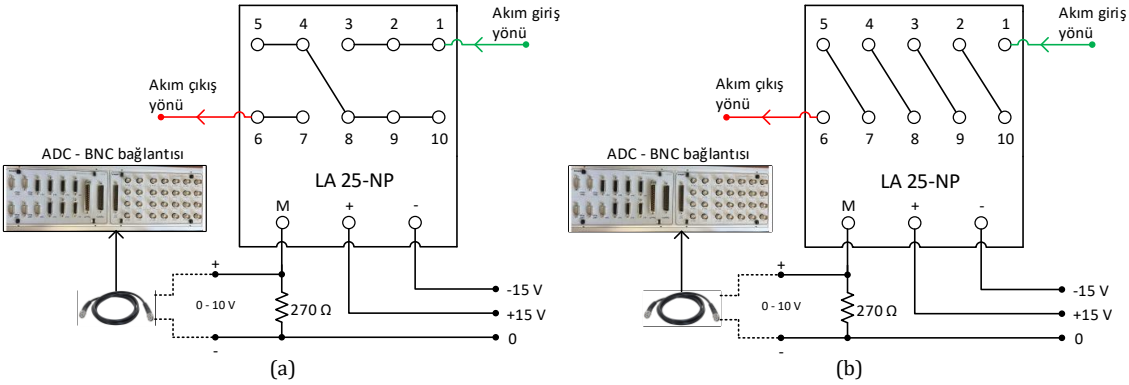


Şekil 6.5 Sürme devresi

Yarıiletken anahtarların kontrolü için gerekli kontrol sinyalleri, kontrol algoritmasının dSpace yazılımında gerçek zamanlı olarak koşulması ile sağlanmaktadır. Bu nedenle, PSCAD/EMTDC programında geliştirilen SPR-AAS

kontrol devresi, dSpace yazılımı Matlab/Simulink programı tabanlı çalıştığından dolayı bu programa aktarılmıştır. Matlab/Simulink'te kontrol algoritması oluşturularak dSpace'e yüklendiğinde, bu programın sağladığı arayüz sayesinde SPR-AAS devresindeki yarıiletken anahtarlar gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmektedir. Kontrol algoritmasının dSpace'te gerçek zamanlı olarak çalıştırılmasıyla elde edilen anahtarlama sinyalleri, dSpace'in kontrol donanımındaki I/O portu üzerinden TLP350 optokuplör sürme entegresine gönderilmektedir. Kontrol algoritması iletim sinyali verdiğinde, dSpace entegredeki 2 nolu pine 5 V'luk bir sinyal göndererek, V_{GE}=15 V olmasını sağlamakta ve böylece IGBT anahtarı iletime geçirmektedir. Entegrenin ihtiyaç duyduğu 15 V'luk gerilim beslemesi, 220/15 V'luk transformatörün çıkışındaki alternatif gerilimin köprü diyot ile doğrultulması ve sonrasında 7815 regülatörü ile regüle edilmesiyle sağlanmaktadır. Prototip uygulamasında kullanılan tüm IGBT'ler için ayrı sürme devresi oluşturulmuş olup, entegrelerin gerilim beslemeleri de birbirlerinden bağımsızdır.

SPR-AAS uygulama devresinde, her fazda belirlenen noktalardan iki gerilim ve iki de akım ölçümü alındığından dolayı ayrı sensör kartları hazırlanmıştır. Akım sensörlerinin yer aldığı kartlarda kullanılan devreler Şekil 6.6'da gösterilmektedir.

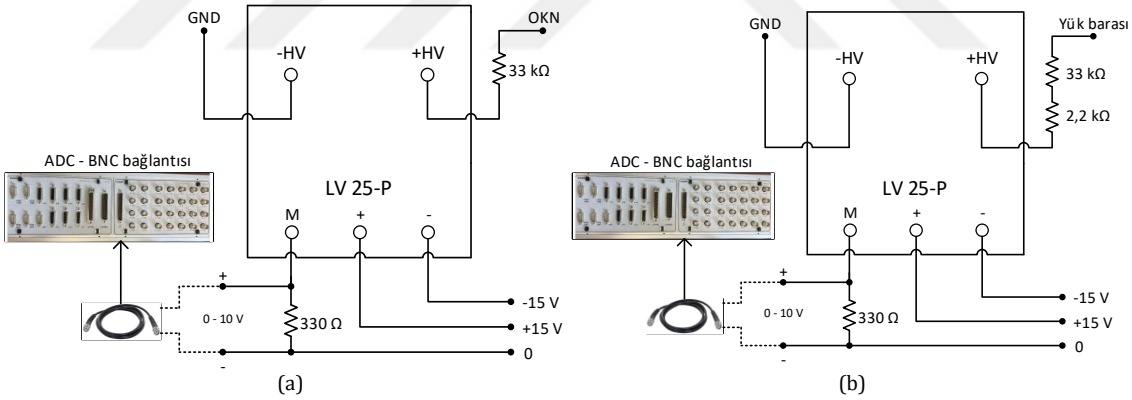


Şekil 6.6 Akım sensörü bağlantıları; a) Hat akımı sensörü (AS_1), b) Yük akımı sensörü (AS_2)

Akım sensörü bağlantıları, sensörün uygulandığı noktada akımın ulaşacağı maksimum düzeye göre belirlenmektedir. Uygulama devresi için yapılan simülasyon çalışmalarında, hat akımının en yüksek 12,42 A'e ve yük akımının ise maksimum 5,42 A'e ulaşabileceği görülmüştür. Bu nedenle, sensör bağlantıları hat akımı sensöründe maksimum 18 A ve yük akımı sensöründe ise en yüksek 7 A'in

ölçülebileceği bağlantı şekline göre yapılmıştır. Böylece, AS_1'de 2/1000 ve AS_2'de ise 5/1000'lik dönüştürme oranı sağlanmıştır. Primer akımının dönüştürme oranıyla çarpılması sekonderde ölçüm direncinin üzerinden geçen akımın büyüklüğünü vermektedir. Akım sensörlerinde 270 Ω'luk ölçüm direnci kullanılmıştır. Bu direnç üzerinde oluşan gerilim düşümünün anlık değerleri, analog sinyal olarak dSpace kontrol donanımındaki ADC (analog to digital converter) sinyal girişi üzerinden kontrol algoritmasının gerçek zamanlı olarak çalıştırıldığı dSpace'e aktarılmaktadır. Akım sensörlerinden sağlanan analog sinyalin kontrol algoritmasına bir akım değeri olarak dahil edilebilmesi için bir katsayı ile çoklanması gerekmektedir. Bundan dolayı, her bir sensör için ölçüm yapacakları maksimum akım seviyesine kadar farklı akım düzeyleri için ölçüm testleri yapılarak uygun katsayılar belirlenmiştir. Akım sensörlerinin besleme gerilimi olan ±15 V, sensörler için oluşturulan besleme kartlarından sağlanmıştır. Katalog verilerinde akım sensörlerinin doğruluk oranının ±%0.5 ve tepki süresinin ise 1 µs'den daha kısa olduğu belirtilmektedir.

Gerilim sensörleri için hazırlanan kartlarda kullanılan devreler Şekil 6.7'de verilmektedir.

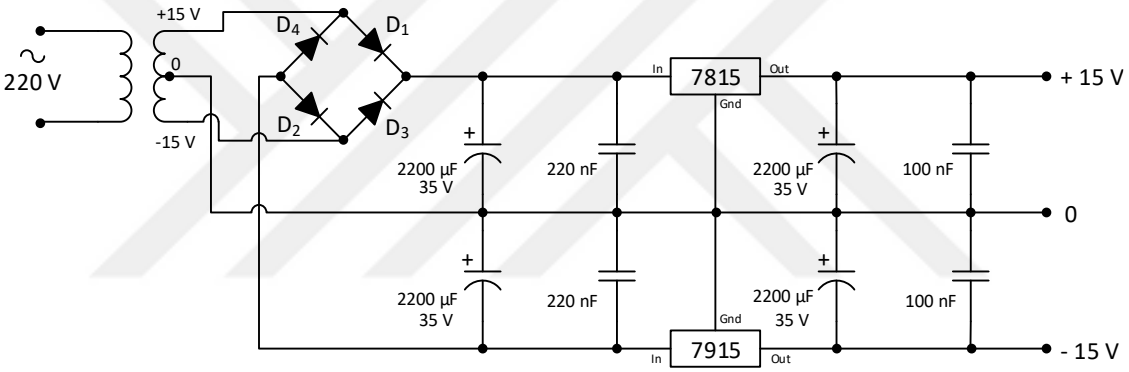


Şekil 6.7 Gerilim sensörü bağlantıları; a) OKN gerilim sensörü (GS_1), b) Yük barası gerilim sensörü (GS_2)

Kullanılan LV 25-P gerilim sensörlerinin primer akımlarının 10 mA'in altında tutulması gerekmektedir. Bu nedenle, gerilim sensörlerinin devrede uygulandığı noktadaki gerilimin ulaşabileceği maksimum seviye dikkate alınarak, primer akımını sınırlandıracak büyüklükte primer direnci seçilmelidir. SPR-AAS prototipinin uygulandığı test devresi için gerçekleştirilen simülasyonlarda, maksimum gerilim seviyesinin GS_1 için 304,72 V ve GS_2 için 328,63 V olduğu belirlenmiştir. Bu gerilim düzeyine uygun olarak GS_1'de 33 kΩ ve GS_2'de ise

toplamda 35,2 kΩ'luk primer direnci kullanılmıştır. Gerilim sensörlerinin sekonderinde ölçüm direnci olarak 330 Ω büyüklüğünde direnç yer almaktadır. Sensörlerin dSpace kontrol donanımı ile olan bağlantısı akım sensörleri ile aynıdır. Gerilim sensörlerinden dSpace'e iletilen analog sinyalin, kontrol devresinde kullanılacak gerilim değerine dönüştürülmesi için bir katsayı ile çoklanması gerekmektedir. Bu katsayının değeri, her sensör için farklı gerilim düzeylerinde ölçüm testleri yapılarak belirlenmiştir. Gerilim sensörlerinin ±15 V'luk gerilim beslemesi hazırlanan besleme kartlarından sağlanmaktadır. Katalog verilerinde, gerilim sensörlerinin doğruluk oranı ±%0.8 ve tepki süresi ise 25 µs olarak verilmiştir.

Akım ve gerilim sensörlerine gerilim beslemesi sağlayan devre Şekil 6.8'de gösterilmektedir.



Şekil 6.8 Sensör besleme devresi

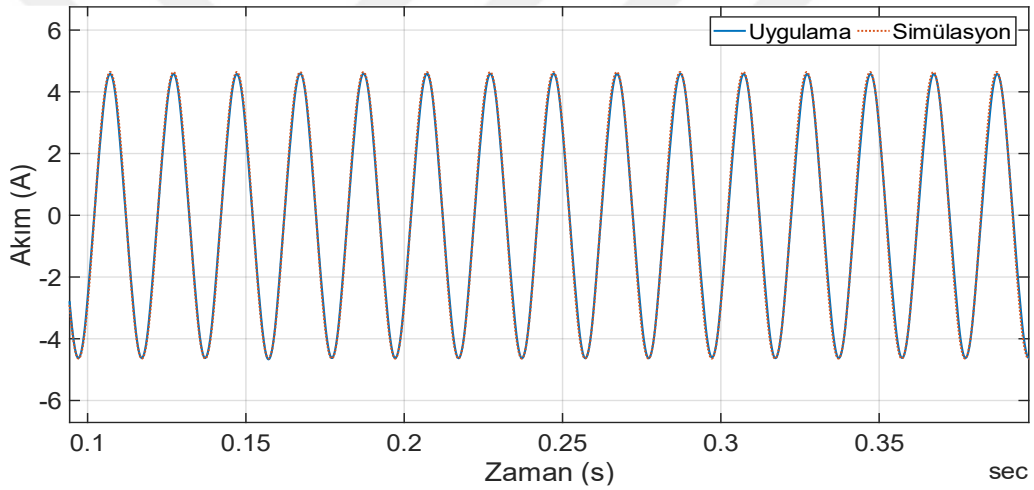
Besleme devresinde, 220 V'luk alternatif gerilim orta uçlu bir transformatör ile 15 V değerine düşürülmektedir. Daha sonra köprü diyot vasıtasıyla doğrultulan gerilim, 7815 ve 7915 regülatörleri ile regüle edilerek devrenin çıkışında ±15 V'luk doğru gerilim elde edilmektedir. Tüm sensörler için ayrı besleme devreleri kullanılmıştır.

Fazlar arası 380 V gerilim seviyesine uygun olarak tasarlanan üç fazlı SPR-AAS prototipinin performansı, uygulandığı test devresinde farklı tiplerde kısa devre arızaları gerçekleştirilerek incelenmiştir. Uygulama çalışmalarında, SPR-AAS kontrol algoritması Matlab/Simulink programında derlenerek dSpace yazılımında gerçek zamanlı olarak işletilmiştir. Bu nedenle, uygulamadaki test devresinin simülasyonu da Matlab/Simulink'te oluşturulmuştur. Uygulamadan elde edilen sonuçlar ile simülasyon verileri, SPR-AAS'nin kullanıldığı test devresi için normal

çalışma ve çeşitli arıza durumları bakımından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Simülasyon ve uygulama verilerinin karşılaştırılabilir olabilmesi için uygulama devresinde kullanılan devre elemanlarının ölçülen gerçek büyüklükleri ile bağlantı elemanı olan alüminyum lamaların ölçülen direnç değerleri de simülasyonda kullanılmıştır.

6.1 Normal Çalışma

Normal çalışma koşullarında, SPR-AAS test devresinde bir empedans göstermeden pasif olarak yer almaktadır. Herhangi bir arızanın olmadığı normal çalışma durumu için simülasyon ve uygulama devrelerinin nominal akımlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüş olup, örnek olarak A fazına ait akım değişimi Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9 Simülasyon ve uygulama devrelerinin nominal akımları

Simülasyonda oluşturulan test devresinin normal çalışma akımının maksimum değeri 4,64 A iken, bu değer uygulama devresinde 4,66 A olarak tespit edilmiştir.

6.2 Kısa Devre Arıza Testleri

Test devresinde SPR-AAS uygulanmadığı durumda gerçekleşecek kısa devre arızalarında, arıza akımlarının laboratuvar ortamındaki mevcut imkanlarla ölçülemeyecek bir seviyeye yükselmesi beklenmektedir. Aynı zamanda uygulama devresinde yer alan elemanların akım dayanımının çok üzerine çıkılacağından dolayı zarar görme ihtimallerinin bulunması, laboratuvar ortamında test devresinin sınırlayıcısız durumu için kısa devre testlerinin uygulanamamasına neden olmuştur.

Bu nedenle, Matlab/Simulink programında oluşturulan test devresi simülasyonu, SPR-AAS'nin yer almadığı durum için ele alınan arıza tipleri bakımından analiz edilmiştir.

Üç fazlı SPR-AAS prototipinin; üç faz, üç faz-toprak, iki faz-toprak ve faz-toprak kısa devre arıza testleri, belirlenen yöntemle aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Buna göre, test süresi 4 saniye olarak belirlenmiştir. Matlab/Simulink programında hazırlanarak dSpace yazılımına aktarılan kontrol algoritması t = 0 anında gerçek zamanlı olarak çalıştırılmaya başlanmıştır. Bu andan itibaren, K_1 kontaktörünün kontakları kapalı duruma geçirilerek devreye gerilim uygulanmıştır. Test devresi 3 saniye boyunca nominal seviyede akım çekerek, normal çalışmasını sürdürmektedir. t = 3 s'de, test edilen arıza tipine göre bağlantıları yapılmış olan K_2 kontaktörü ile kısa devre arızası oluşturulmuştur. Kontrol devresinde kısa devrenin başlangıç ve bitiş zamanı belirlenmiştir. Kısa devre arızaları 130 ms boyunca uygulanmıştır. t = 3,13 s anında kısa devre durumu ortadan kalkmakta ve devre normal çalışmasına geri dönmektedir. t = 4 s olduğunda ise ilgili arıza tipi için kısa devre testi tamamlanmıştır.

Test devresinde SPR-AAS kullanılmadığı durumdaki kısa devre arızalarında arıza akımlarının ulaşacağı seviye gerçekleştirilen simülasyonlar ile belirlenmiştir. SPR-AAS'nin uygulandığı test devresinde oluşturulan kısa devre arızaları için uygulama devresinden alınan ölçümler ve simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

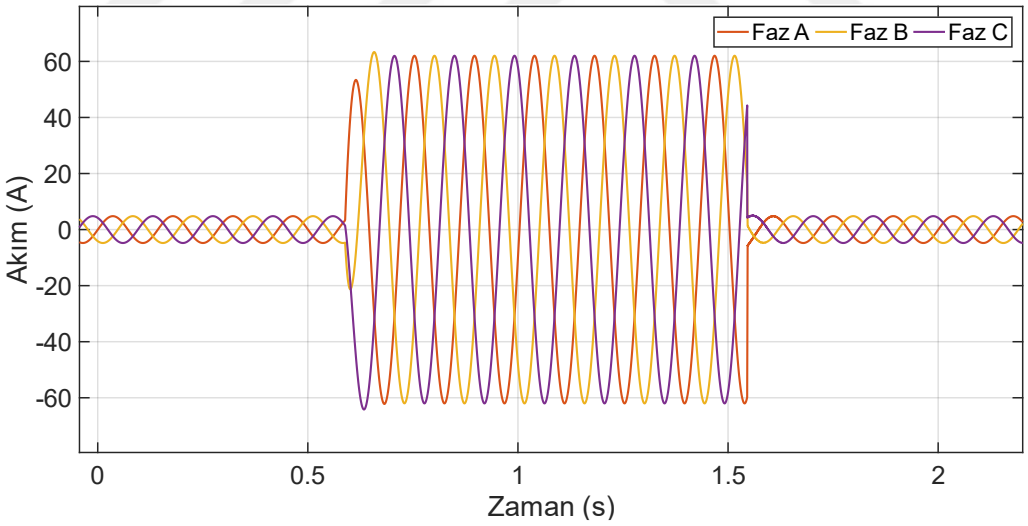
6.2.1 Sınırlayıcısız Durumda Kısa Devre Arızaları

Test devresinde sınırlayıcı uygulanmadığı durum için yapılan simülasyon çalışmalarında, kısa devre arıza akımlarının ulaştığı maksimum değerler Tablo 6.3'te verilmektedir.

Tablo 6.3 Sınırlayıcısız durumda arıza akımlarının maksimum değerleri

	Arıza Akımları (A)			
Arıza Tipi	Faz A	Faz B	Faz C	Maksimum
Üç faz	62,21	63,34	**64,18**	64,18
Üç faz-toprak	62,38	**63,74**	63,40	63,74
İki faz-toprak	63,59	**64,02**	-	64,02
Faz-toprak	**64,23**	-	-	64,23

Test devresinde SPR-AAS uygulanmadığı durum için gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, tüm arıza tiplerinde arıza akımının nominal akımın yaklaşık 13,8 katına kadar çıktığı görülmüştür. SPR-AAS'nin yer almadığı test devresi simülasyonunda üç faz arızası gerçekleşmesi durumunda, üç fazın arıza akımlarının değişiminin Şekil 6.10'daki gibi olduğu görülmüştür.



Şekil 6.10 Sınırlayıcısız durumdaki üç faz arızasında arıza akımlarının değişimi

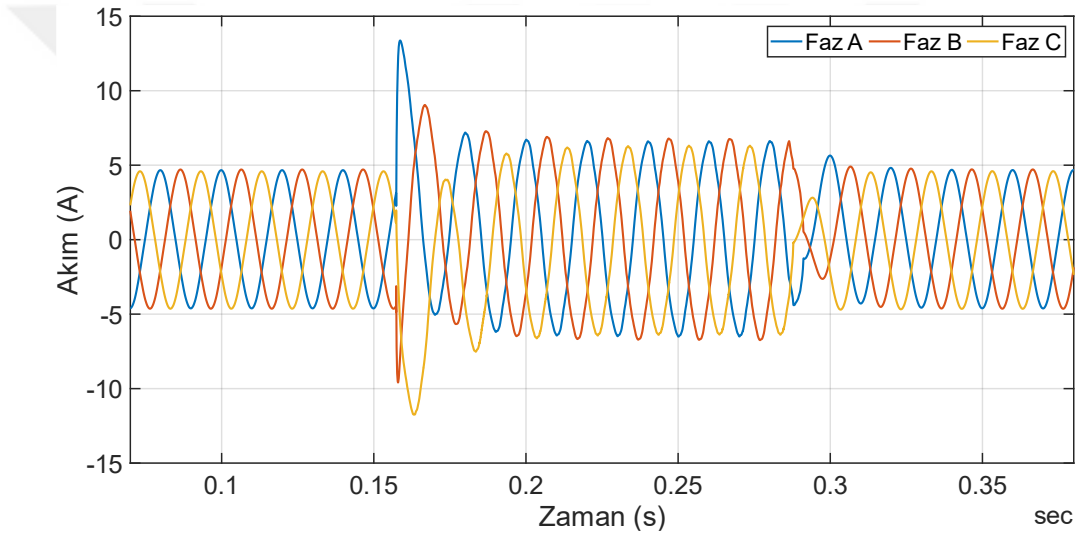
6.2.2 SPR-AAS Prototipi Kısa Devre Arıza Testleri

Önerilen SPR-AAS'nin arıza akımı sınırlama performansı oluşturulan prototip sistem üzerinde incelenmiştir. Kullanıldığı test devresinde farklı kısa devre arıza durumları oluşturularak etkinliği test edilmiştir. Üç faz, üç faz-toprak, iki faz-toprak

ve faz-toprak kısa devre testlerinde, uygulama devresinden alınan akım ölçümleri ve bunların simülasyon verileri ile karşılaştırmaları aşağıda sunulmaktadır.

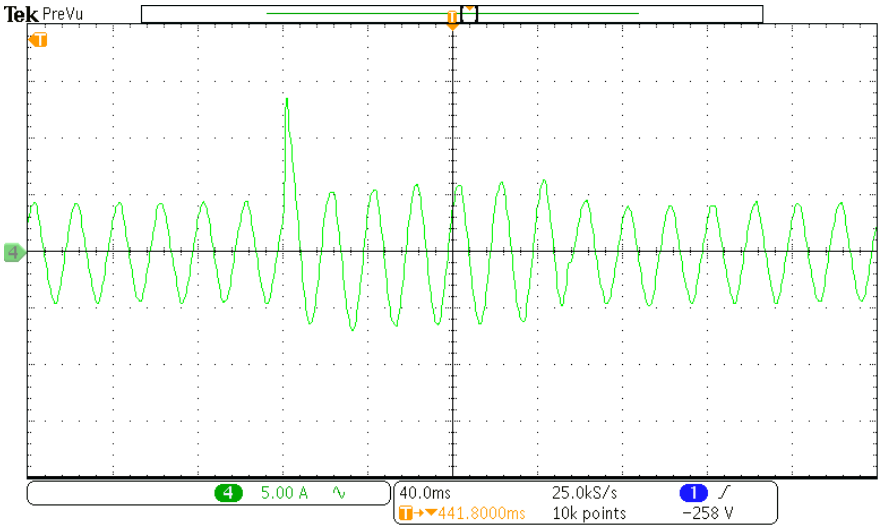
6.2.2.1 Üç Faz Kısa Devre Arızası Testi

Üç faz arızaları güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızaları arasında sistem güvenilirliği açısından en tehlikeli arıza tipidir. SPR-AAS prototipi bu arıza tipi için test edilerek, uygulama devresindeki arıza akımını sınırlama kapasitesi incelenmiştir. Test devresinde üç faz arızasının oluşturulabilmesi için K_2 kontaktörü ile A_1, A_2 ve A_3 noktaları arasında bir bağlantı sağlanmıştır. Üç faz kısa devre arızasındaki arıza akımının değişimi, test devresinde uygulanan akım sensörlerinden elde edilmiş olup Şekil 6.11'de gösterilmektedir.



Şekil 6.11 Üç faz kısa devresinde arıza akımının değişimi

Üç faz arızasında uygulama devresinin A fazında akım probu kullanılarak elde edilen A fazındaki arıza akımının osiloskop görüntüsü Şekil 6.12'de verilmektedir. Test devresinde üç faz arızasının meydana gelmesinin ardından, SPR-AAS devreye girerek arıza akımını A fazında 13,37 A, B fazında 9,59 A ve C fazında ise 11,74 A seviyesinde sınırlandırabilmiştir. Sınırlayıcısız durumdaki arıza akımı seviyesine göre SPR-AAS'nin sağladığı arıza akımı sınırlanma oranları üç faz arızası için Tablo 6.4'te verilmektedir. Buna göre, arıza akımı A, B ve C fazlarında sırasıyla %78,51, %84,86 ve %81,71 olmak üzere değişen oranlarla bastırılmıştır. Simülasyon ile uygulamadaki arıza akımı sınırlama oranları arasındaki en yüksek fark %1,38 ile C fazında oluşmaktadır.

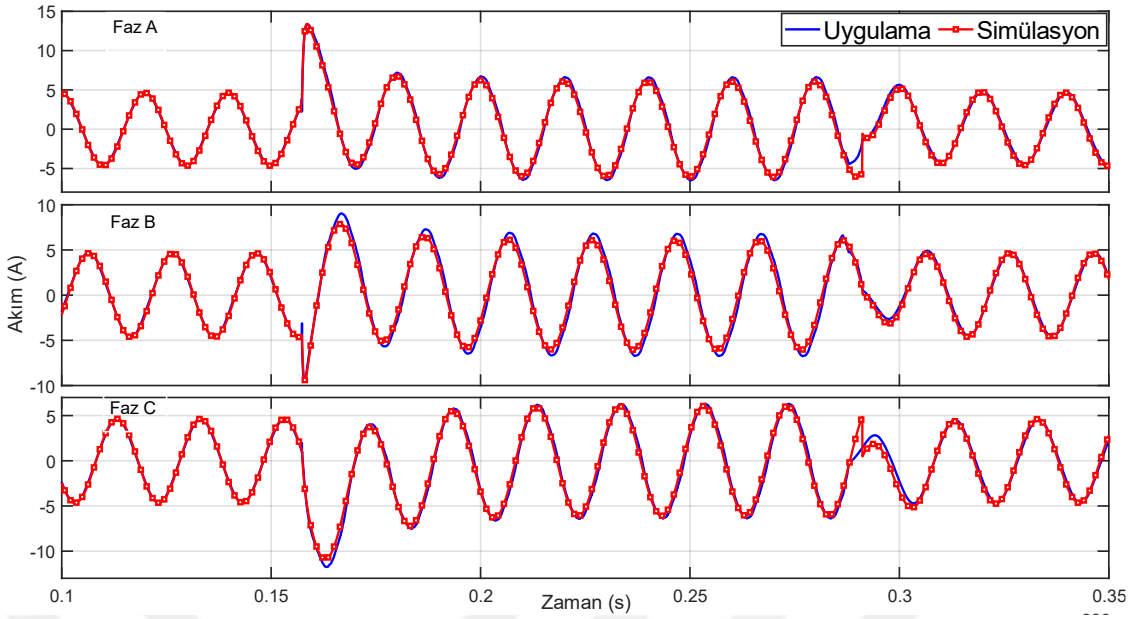


Şekil 6.12 Üç faz arızasında A fazındaki arıza akımınının değişimi

Tablo 6.4 Üç faz arızasındaki arıza akımı sınırlama oranları

	Sınırlayıcısız Durum	**Sınırlayıcılı Durum**			
		Simülasyon		**Uygulama**	
	Akım Değeri (A)	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı
Faz A	62,21	13,39	**%78,48**	13,37	**%78,51**
Faz B	63,34	9,39	**%85,17**	9,59	**%84,86**
Faz C	64,18	10,85	**%83,09**	11,74	**%81,71**

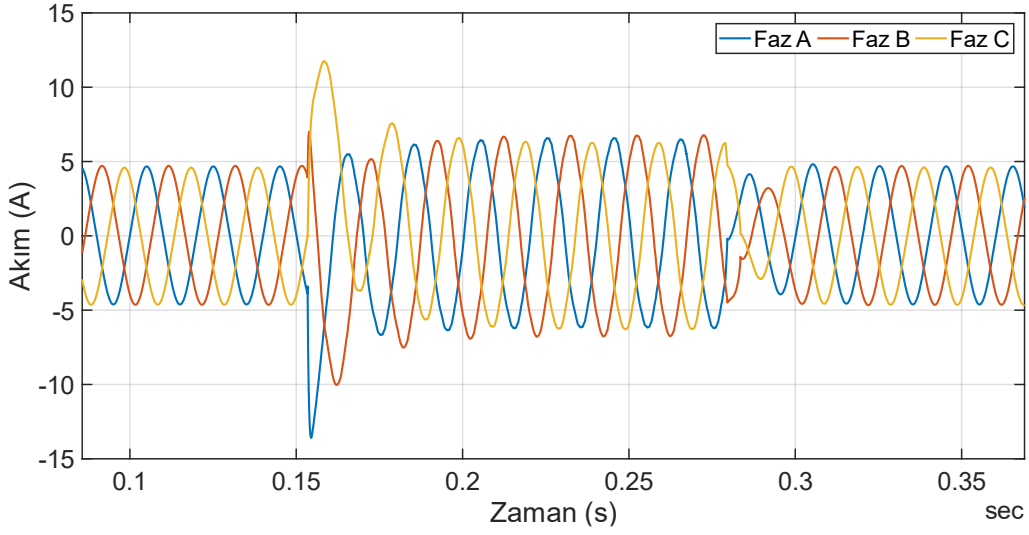
Üç faz arızası için uygulamada oluşan arıza akımı ile simülasyon modelinde ulaşılan sonuçlar her faz için ayrı olarak karşılaştırılarak Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Buradan, arıza akımının ilk pikinin sınırlandığı düzey ve ardından oluşan salınımlar bakımından uygulama ve simülasyondaki arıza akımı değişiminin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.13 Üç faz arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması

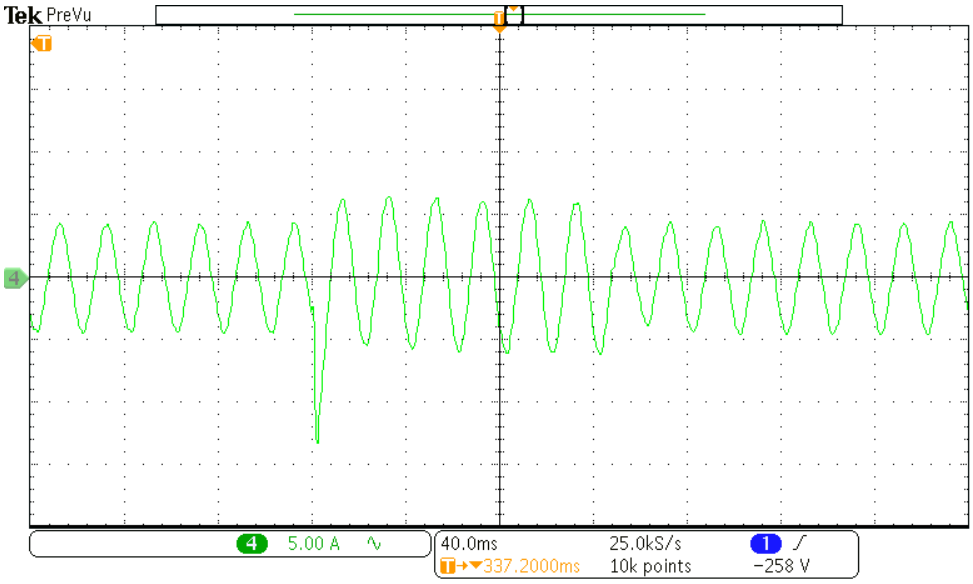
6.2.2.2 Üç Faz-Toprak Kısa Devre Arızası Testi

SPR-AAS prototipinin test edildiği bir başka arıza tipi de üç faz-toprak kısa devre arızasıdır. K_2 kontaktörü ile test devresindeki A_1, A_2, A_3 ve A_4 noktaları arasında bir akım yolu oluşturularak bu kısa devre arızası gerçekleştirilmiştir. Üç faz-toprak kısa devresinde arıza akımının değişimi Şekil 6.14'te verilmektedir.



Şekil 6.14 Üç faz-toprak kısa devre arızasında arıza akımının değişimi

Üç faz-toprak arızasında A fazındaki arıza akımının osiloskop görüntüsü Şekil 6.15' te gösterilmiştir.

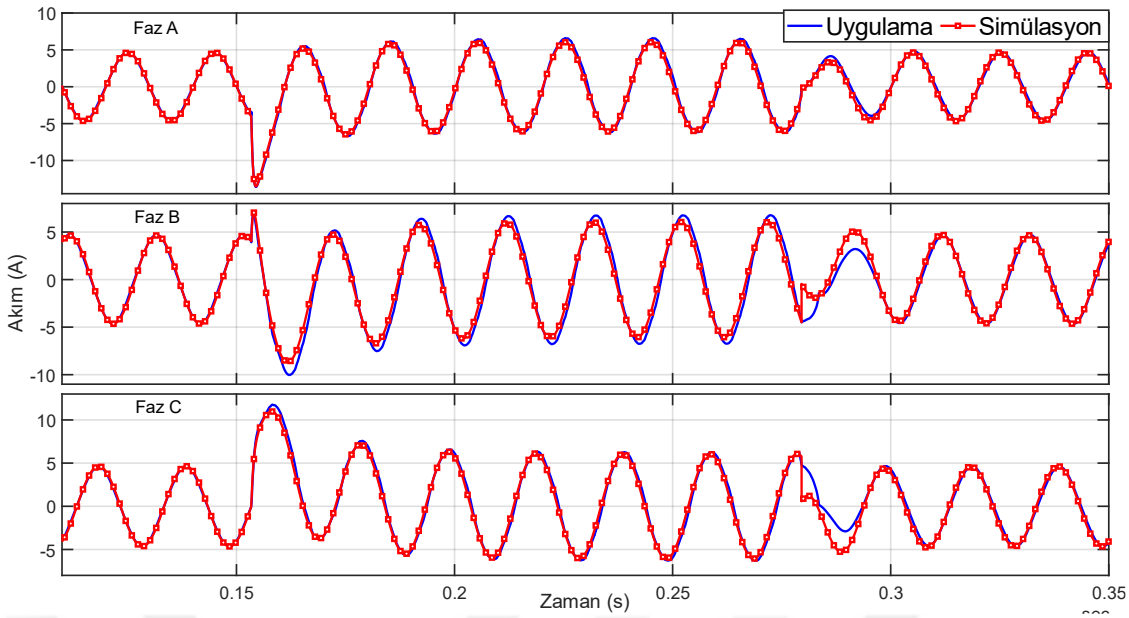


Şekil 6.15 Üç faz-toprak arızasında A fazındaki arıza akımının değişimi

Tablo 6.5 Üç faz-toprak arızasındaki arıza akımı sınırlama oranları

	Sınırlayıcısız Durum	**Sınırlayıcılı Durum**			
		Simülasyon		**Uygulama**	
	Akım Değeri (A)	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı
Faz A	62,38	13,51	**%78,34**	13,59	**%78,21**
Faz B	63,74	8,68	**%86,38**	10,04	**%84,25**
Faz C	63,40	10,98	**%82,68**	11,77	**%81,43**

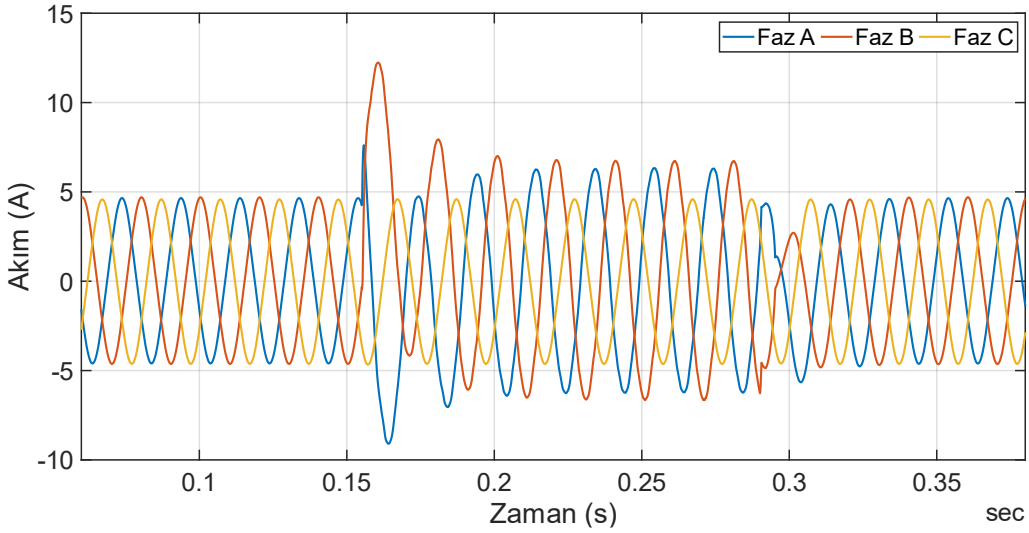
Üç faz-toprak arızasında, SPR-AAS prototipi ile her faz için arıza akımının sınırlandığı değer ve akım sınırlama oranları Tablo 6.5'te verilmektedir. Bu arıza tipinde de arıza akımının yükselişi SPR-AAS ile başarılı bir şekilde bastırılarak, test devresinin A, B ve C fazlarında %78,21, %84,25 ve %81,43 gibi yüksek arıza akımı sınırlama oranları yakalanabilmiştir. Sınırlama oranları simülasyon verileri ile karşılaştırıldığında en yüksek farkın %2,13 ile B fazında oluştuğu görülmüştür.Üç faz-toprak arızası için simülasyon ve uygulamadan elde edilen arıza akımı değişimleri karşılaştırılarak Şekil 6.16'da sunulmaktadır.



Şekil 6.16 Üç faz-toprak arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması

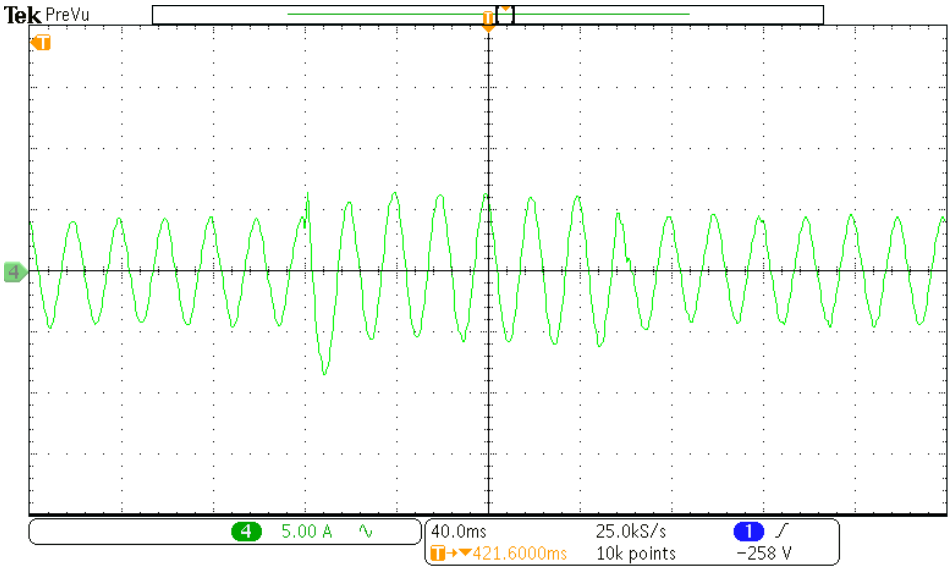
6.2.2.3 İki Faz-Toprak Kısa Devre Arızası Testi

Üç fazlı SPR-AAS prototipinin simetrik olmayan arızalar için de kısa devre testleri gerçekleştirilmiştir. A ve B fazlarının A_1 ve A_2 noktaları ile A fazı ve toprağın da A_1 ve A_4 noktalarından K_2 kontaktörü ile bağlantısının sağlanmasıyla iki faz-toprak kısa devre arızası uygulanmış ve arıza akımının değişimi Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17 İki faz-toprak arızasında arıza akımının değişimi

İki faz-toprak kısa devresinde oluşan arıza akımının A fazındaki değişimi, akım probu kullanılarak elde edilmiş ve osiloskop görüntüsü Şekil 6.18'de sunulmuştur.



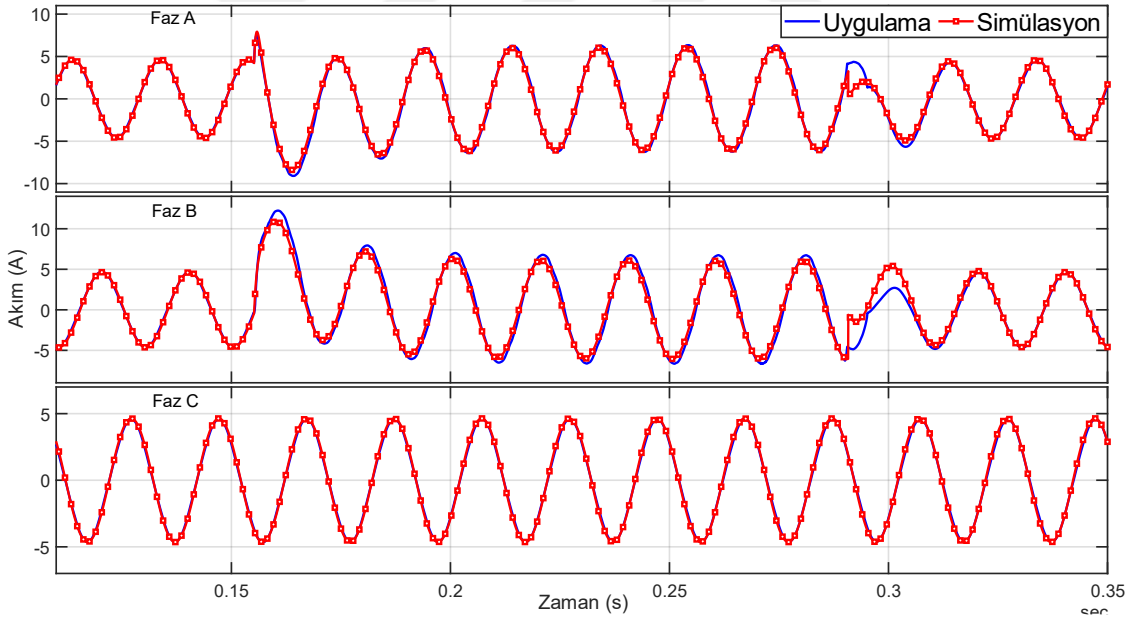
Şekil 6.18 İki faz-toprak arızasında A fazındaki arıza akımının değişimi

SPR-AAS prototipi sayesinde bu arıza tipinde de arıza akımlarının yüksek değerlere ulaşmadan sınırlanabilmesi sağlanmıştır. Tablo 6.6'da iki faz-toprak arızasında arızalı fazlarda akımın sınırlandığı değerler ve sınırlayıcısız duruma göre yüzdesel sınırlama oranları verilmiştir. Buna göre, SPR-AAS ile arıza akımı A fazında %85,69 ve B fazında ise %80,88 oranlarında sınırlanabilmektedir. Arıza akımını sınırlama oranı bakımından simülasyon ve uygulamadaki oranlar karşılaştırıldığında ise farkın %2 civarında olduğu görülmektedir.

Tablo 6.6 İki faz-toprak arızasındaki arıza akımı sınırlama oranları

	Sınırlayıcısız Durum	Sınırlayıcılı Durum			
		Simülasyon		Uygulama	
	Akım Değeri (A)	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı
Faz A	63,59	8,38	**%86,82**	9,10	**%85,69**
Faz B	64,02	10,94	**%82,91**	12,24	**%80,88**

Test devresinin simülasyonunda ve uygulama devresinde gerçekleştirilen iki faz-toprak arızalarında oluşan arıza akımları Şekil 6.19'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

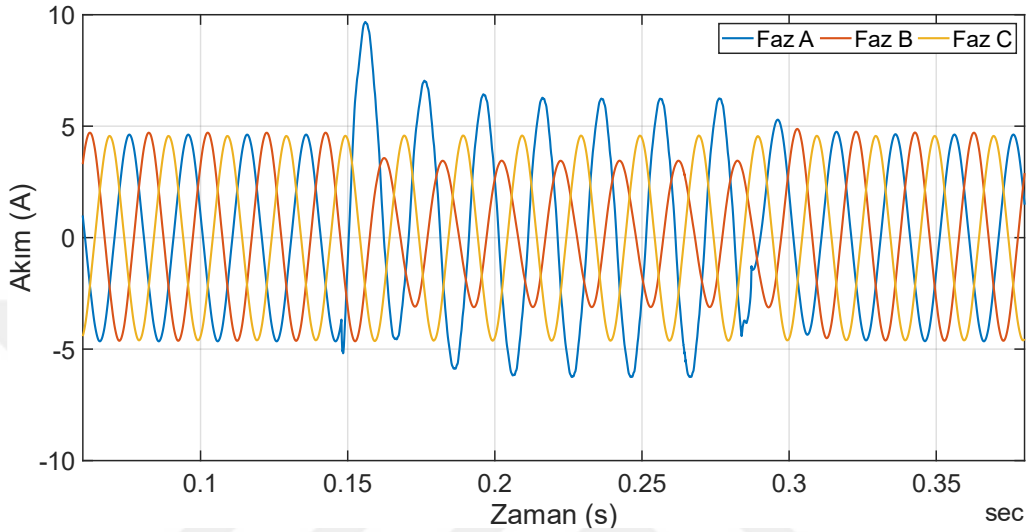


Şekil 6.19 İki faz-toprak arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması

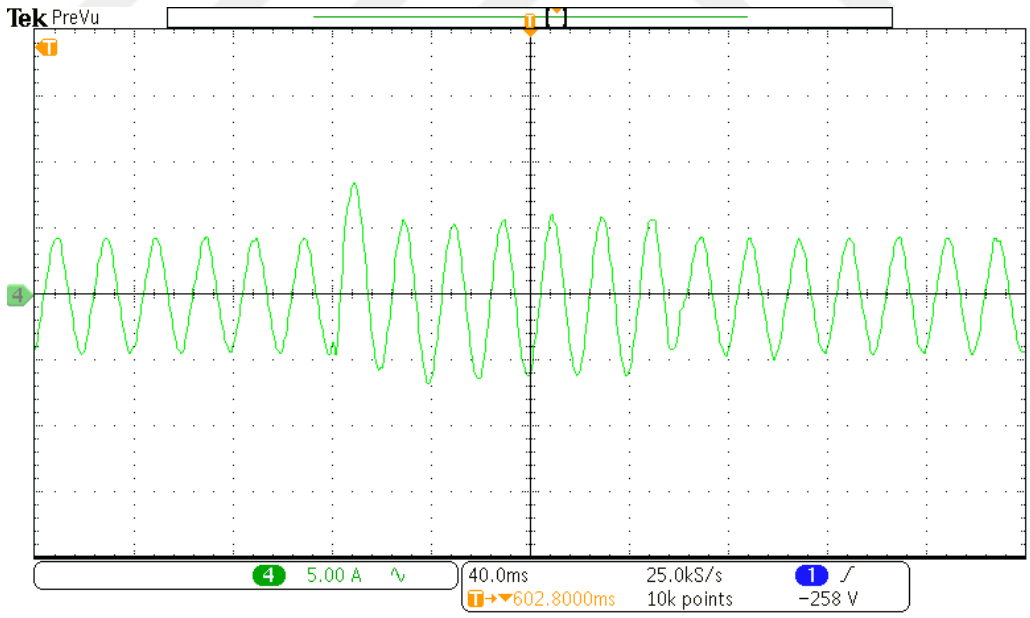
SPR-AAS arızanın başlaması ile birlikte kısa devre edilen A ve B fazlarında devreye girerek, sağladığı empedans ile bu fazların arıza akımını sınırlamaktadır. C fazı ise kısa devre arızasında yer almadığı için nominal akım seviyesi değişmeden devam etmiş ve bundan dolayı da SPR-AAS'nin bu fazda aktif olarak çalışmasına gerek kalmamıştır.

6.2.2.4 Faz-Toprak Kısa Devre Arızası Testi

Güç sistemlerinde en sık karşılaşılan arıza olan faz-toprak kısa devre arızası, SPR-AAS' nin uygulandığı test devresinde A fazı için gerçekleştirilmiştir. K_2 kontaktörü ile A_1 ve A_4 noktaları arasında uygulanan kısa devre ile devrede oluşan arıza akımının değişimi Şekil 6.20'de gösterilmektedir.



Şekil 6.20 Faz-toprak arızasında arıza akımının değişimi



Şekil 6.21 Faz-toprak arızasında A fazındaki arıza akımının değişimi

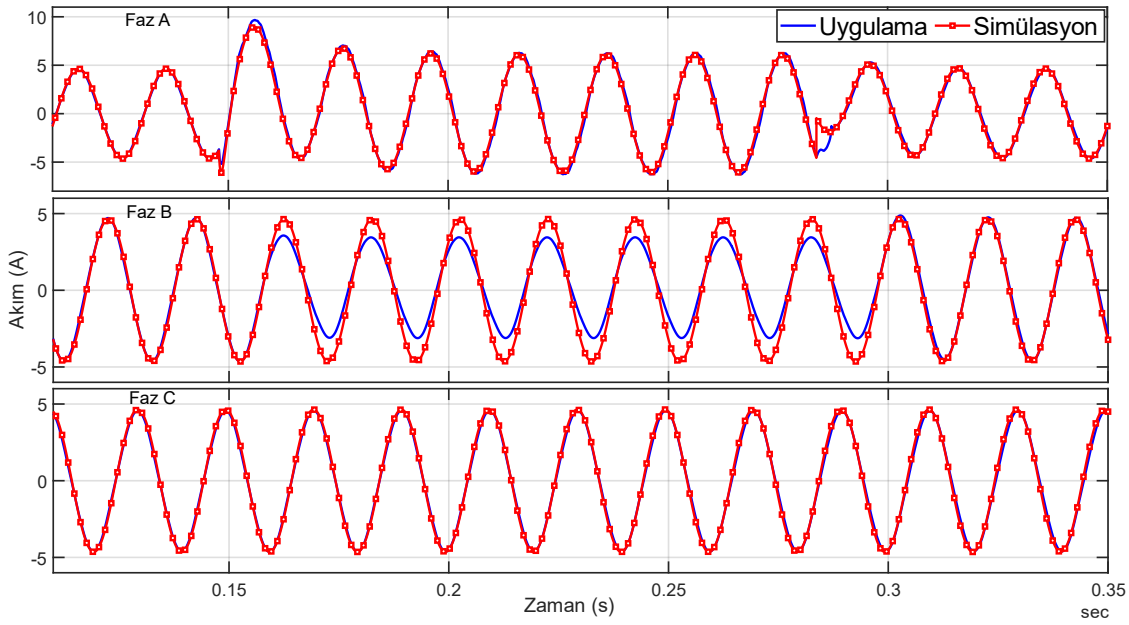
SPRAAS' li uygulama devresinde A fazı için gerçekleştirilen faz-toprak arızasında, bu fazdaki arıza akımı değişiminin osiloskop görüntüsü Şekil 6.21'de verilmektedir. Faz-toprak arızasının uygulama devresinde ve test devresi simülasyonunda

gerçekleştirilmesi ile SPR-AAS'nin arıza akımını sınırladığı seviye ve sınırlama oranları belirlenmiş olup, Tablo 6.7'de sunulmaktadır. Buna göre, sınırlayıcısız durumdaki tek-faz arızasında 64,23 A değerine ulaşması beklenen arıza akımının 10 A'in altına düşürülebildiği görülmektedir. Simülasyon ve uygulamadaki arıza akımı sınırlama oranları arasındaki yüzdelik fark %1,09'dur.

Tablo 6.7 Faz-toprak arızasında arıza akımı sınırlama oranları

		Sınırlayıcılı Durum			
	Sınırlayıcısız Durum	**Simülasyon**		**Uygulama**	
	Akım Değeri (A)	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı	Akım Değeri (A)	Sınırlama Oranı
Faz A	64,23	8,98	**%86,02**	9,68	**%84,93**

A fazında oluşturulan faz-toprak arızasında, uygulama ve simülasyondaki faz akımlarının arıza anındaki değişimi karşılaştırmalı olarak Şekil 6.22'de gösterilmektedir.



Şekil 6.22 Faz-toprak arızası için simülasyon ve uygulamadaki arıza akımlarının karşılaştırılması

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Enterkonnekte sistemin genişlemesi, güç üretimi ile güç talebindeki artış ve dağıtık üretim tesislerinin sayılarının artması, arıza akımı seviyelerinin sürekli olarak yükselmesine neden olmaktadır. Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızaları, nominal akım seviyesinin çok üzerinde arıza akımlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Yüksek arıza akımları, çeşitli sistem ekipmanlarında arızalanmalara neden olabilmekte ve maliyetli cihaz değişimlerine yol açabilmektedir. Uzun süreli enerji kesintileri, sistem güvenilirliğinin zayıflaması, sistem bileşenlerinin kullanım ömürlerinin kısalması ve bunların neden olduğu ekonomik sonuçlar, arıza akımlarının giderilmesine ve etkilerinin en aza indirgenmesine yönelik tedbirleri zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, güç sistemlerinde meydana gelen arıza akımı seviyelerinin güvenli bir düzeyde sınırlanmasına yönelik geçmişten günümüze birçok yöntem geliştirilerek uygulanmıştır. Gelişen teknolojinin sağladığı imkanlar doğrultusunda, farklı yapılara ve çalışma prensiplerine sahip yeni arıza akımı sınırlayıcı cihazlar önerilmekte ve uygulanabilir olmalarına yönelik çalışmalar sürmektedir.

Arıza akımlarının sınırlanmasına yönelik kullanılan, bara ayırma ve devre kesicilerinin sıralı çalıştırılması gibi klasik yöntemler ile akım sınırlayıcı sigortalar, akım sınırlama reaktörleri, yüksek empedanslı transformatörler, I_s sınırlayıcılar ve nötr reaktörleri gibi cihazların, çok verimli ve etkin bir akım sınırlama performanslarının olmadığı bilinmektedir. Aynı zamanda, arıza olmayan durumlarda da gerilim düşümü, güç kaybı ve kararsızlık gibi dezavantajlı etkilere sahip olmaları, yükselen arıza akımlarına kalıcı bir çözüm sağlamalarını ve kullanımlarının yaygınlaşmasını güçleştirmektedir. Geliştirilen modern arıza akımı sınırlayıcılar ile yüksek arıza akımlarının sınırlamasına yönelik efektif ve uygulanabilir çözümlerin sağlanması amaçlanmaktadır.

Modern arıza akımı sınırlayıcıların; katı hal, süperiletken ve manyetik olmak üzere farklı tipleri bulunmaktadır. Klasik arıza akımı sınırlayıcıların aksine, normal çalışma koşullarında sistem üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde

olması sistem kararlılığı bakımından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Çalışma prensiplerine göre farklı yöntemlerle arıza anında sınırlama empedanslarını sisteme dahil ederek arıza akımlarını etkin bir şekilde sınırlamaktadırlar. Yüksek arıza akımı sınırlama kapasitelerinin yanı sıra, arıza anında bara geriliminde oluşan düşüşleri önleyebilme ve sistemin geçici kararlılığını yükseltebilme gibi faydalara sahip modern sınırlayıcılar da geliştirilmektedir.

Günümüzde katı hal arıza akımı sınırlayıcılar, yüksek akım ve gerilim dayanımına sahip yarıiletken elemanların üretilmesiyle, güç sistemlerinde uygulanabilir çeşitli topolojilerinin önerildiği sınırlayıcılar olmuşlardır. Devre yapıları bakımından rezonans, köprü ve empedans anahtarlamalı tipleri bulunan katı hal sınırlayıcılar, arıza akımlarını sınırlama ve arıza süresince diğer sistem parametrelerinin iyileştirmesine verdikleri katkı bakımından yüksek bir etkinlik sağlamaktadırlar.

Bu tez çalışması kapsamında, özgün bir seri-paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre geliştirilmiştir. Devrenin kontrolü, ters paralel bağlı IGBT anahtarların SPR-AAS için geliştirilmiş kontrol devresinden alınan sinyaller ile anahtarlanması prensibiyle gerçekleştirilmektedir. SPR-AAS normal çalışma şartlarında seri rezonansta kalarak, sistem üzerinde herhangi bir gerilim düşümü ve güç kaybına neden olmamaktadır. Kısa devre arızasının gerçekleşmesi ile birlikte yüksek değerli paralel rezonans empedansını devreye alarak arıza akımlarını sınırlamaktadır. SPR-AAS'nin ikinci görevi, arıza anında ortak kuplaj noktası geriliminde oluşan düşüşleri önleyerek, gerilimin nominal seviyesine yakın bir düzeyde kalmasını sağlamaktır. Aynı zamanda, arıza boyunca sınırlayıcının sağladığı enerji tüketimi sistemin geçici kararlılık düzeyinin yükseltilmesine de katkı sunmaktadır.

SPR-AAS'nin arıza akımları, arıza anındaki OKN gerilim kararlılığı ve sistemin geçici kararlılığı üzerindeki etkinliği farklı arıza tipleri için simülasyon çalışmaları ile analiz edilmiştir. SPR-AAS ve literatürde önerilmiş diğer paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcılar, uygulandıkları güç sisteminde aynı algoritma ile kontrol edilerek mukayese edilmiştir. Güç sistem uygulamalarında arıza akımlarını sınırlamak için gerekli olan SPR-AAS sayısı, boyutları ve konumlarının belirlenebilmesi için bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. SPR-AAS'nin üç

fazlı prototipi oluşturularak, uygulandığı test devresinde farklı arıza tipleri için kısa devre testleri gerçekleştirilmiş ve arıza akımı sınırlama performansı incelenmiştir.

Önerilen SPR-AAS topolojisi, PSCAD/EMTDC programında oluşturulan simülasyon modeli ile 20 kV kaynak gerilimine sahip iki baralı bir güç sisteminde analiz edilmiştir. SPR-AAS ve literatürde önerilmiş diğer beş farklı paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcı devre, simetrik ve asimetrik kısa devre arızalarında belirlenen performans ve tasarım parametreleri bakımından karşılaştırılmıştır. Arıza akımı sınırlama, OKN gerilimi kararlılığına katkı, anlık güç kayıpları, enerji tüketimi ile yarıiletken anahtarların maruz kaldığı maksimum gerilim ve akım seviyesi ele alınan parametreler olmuştur. SPR-AAS ve diğer paralel rezonans tipi devrelerin eleman büyüklükleri aynı değerlerde alınmış olup, arıza sırasında OKN gerilim kararlılığını sağlayacak büyüklüklerde belirlenmişlerdir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Tüm kısa devre arıza tiplerinde SPR-AAS ile arıza akımları yüksek oranlarda sınırlanmıştır. Üç faz arızasındaki arıza akımı sınırlayıcısız duruma göre %70 oranında düşürülebilmiştir.
- SPR-AAS farklı arıza tiplerinde arıza akımlarını oldukça yakın oranlarla sınırlamaktadır. Arıza akımı sınırlama oranları %56-70 aralığında değişen oranlarda gerçekleşmektedir.
- SPR-AAS arıza anında ortak kuplaj noktası geriliminin nominal değerine oldukça yakın bir seviyede kalmasını sağlayarak, gerilim kararlılığına ciddi bir katkı sunmaktadır. Diğer paralel rezonans tipi sınırlayıcılar arasında farklı arıza tiplerinde bunu başarabilen tek devre SPR-AAS olmuştur.
- Bir tasarım parametresi olarak incelenen sınırlayıcılar üzerinde oluşan anlık güç kayıpları bakımından da en avantajlı devre SPR-AAS'dir. İncelenen parametreler bakımından en yakın performansı gösteren sınırlayıcıya göre SPR-AAS üzerinde %32 oranında daha düşük bir güç kaybı meydana gelmektedir. Önerilen sınırlayıcı devre arıza anında daha düşük bir ısıya maruz kalarak, daha uzun ömürlü bir kullanım sağlayacaktır.

- SPR-AAS farklı arıza tiplerinde arıza anındaki enerji tüketimi bakımından daha elverişli bir yapıya sahiptir. Böylelikle, arıza esnasında sistemin geçici kararlılığının yükseltilmesine daha efektif bir katkı sunacaktır.
- Sınırlayıcıların yarıiletken anahtarlarının maruz kaldığı gerilim seviyesi, devrelerin maliyetleri ve güvenilirlikleri açısından belirleyici bir faktördür. IGBT anahtarları en düşük gerilime maruz kalan sınırlayıcı SPR-AAS olmuştur. Maksimum gerilim seviyesi en yakın sınırlayıcıya göre %16 oranında daha düşüktür.
- SPR-AAS ve topoloji e'nin yarıiletken anahtarlarının maksimum akım değerleri diğer devrelere göre daha düşük bir seviyededir. Ancak, topoloji e'nin akım sınırlama ve diğer parametreler bakımından performansının oldukça zayıf olduğu görülmüştür.

Güç sistemlerinde arıza akımı sınırlayıcıların arıza akımının izin verilen sınır değerin üzerine çıktığı her barada uygulanması, sınırlayıcı maliyetlerinden dolayı ekonomik bir çözüm sunmamaktadır. Bu nedenle, geliştirilen çeşitli optimizasyon algoritmaları ile sınırlayıcılardan arıza akımlarını sınırlamak için en üst düzeyde faydalanılacak optimum yerleşim yerleri belirlenmektedir. Böylelikle, az sayıda ve düşük boyutlarda kullanılan sınırlayıcılar ile ekonomik açıdan da avantajlı sınırlayıcı uygulamalarının yapılabilmesi planlanmaktadır.

Önerilen SPR-AAS'nin güç sistem uygulamalarında arıza akımlarını kritik değerin altına düşürebilmek için kullanılması gereken sınırlayıcı sayısı, boyutları ve konumlarının belirlenebilmesi amacıyla bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Optimizasyon algoritması SPR-AAS'nin IEEE'nin 9 baralı test sisteminde uygulanması durumu için analiz edilmiştir. Baralarda üç faz kısa devre arızası gerçekleşmesi durumunda oluşan arıza akımları dikkate alınmıştır. Optimizasyon algoritmasında arıza akımları sistemin bara empedans matrisi oluşturularak hesaplanmıştır. Sınırlayıcısız durum için bara empedans matrisi ile hesaplanan arıza akımlarının, PSCAD/EMTDC programından elde edilen simülasyon sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Optimizasyon algoritmasının amaç fonksiyonunda, sınırlayıcının uygulanacağı gerilim düzeylerine bağlı olarak empedansının birim maliyet katsayısı belirlenerek, sınırlayıcı maliyeti de göz

önünde bulundurulmuştur. Elemanlarının minimum ve maksimum değerleri, SPR-AAS'nin kararlı çalışabileceği büyüklüklerde belirlenmiştir. Optimizasyon algoritması ile SPR-AAS'nin kullanıldığı 9 baralı sistemde, belirlenen eleman büyükleri kısıtlarına göre minimum boyutta eleman büyüklüklerine sahip üç adet sınırlayıcı ile tüm baralardaki arıza akımlarının kritik değerin altına düşürülebileceği sonucuna ulaşılmıştır. İncelenen sistemin bara sayısının düşük olması ve üç generatörlü bir yapıya sahip olması nedeniyle, düşük empedanslı ve çok sayıda sınırlayıcı kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Simülasyon çalışmaları ile diğer paralel rezonans tipi katı hal arıza akımı sınırlayıcılara göre üstünlüğü ortaya konan SPR-AAS'nin, fazlar arası 380 V gerilim seviyesi için laboratuvar ortamında üç fazlı prototipi ve test devresi oluşturulmuştur. Literatürde geliştirilen katı hal sınırlayıcılar genellikle tek fazlı prototip çalışmaları ile incelenmektedir. Üç fazlı prototip ve uygulandığı test devresi sayesinde, simetrik ve asimetrik arıza durumlarındaki SPR-AAS'nin arıza akımı sınırlama kapasitesi de analiz edilebilmiştir.

Uygulama çalışmalarında, prototip ve test devresinde yer alan elemanların büyüklükleri simülasyon çalışmalarındaki eleman büyüklükleri ile aynı değerlerde kullanılmıştır. Test devresinde bulunan elemanların gerçek büyüklükleri yapılan ölçümler ile belirlenerek, Matlab/Simulink'te oluşturulan test devresi simülasyonunda kullanılmıştır. Bu sayede, uygulama devresinde gerçekleştirilen kısa devre testlerinden elde edilen sonuçlar ile simülasyon verileri karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

Üç fazlı SPR-AAS prototipinin uygulandığı test devresinde, üç faz, üç faz-toprak, iki faz-toprak ve faz-toprak kısa devre arızaları test edilmiştir. Elde edilen uygulama sonuçları simülasyon verileri ile karşılaştırmalı olarak aşağıda sunulmaktadır:

- Nominal akımlarının maksimum değerleri, uygulama ve simülasyon devreleri için 4,66 A ve 4,64 A olarak belirlenmiştir.
- Test devresinde bulunan elemanların akım dayanımlarının aşılacak olması sebebiyle, SPR-AAS prototipinin kullanılmadığı durum için kısa devre testleri uygulamada gerçekleştirilememiştir. Sınırlayıcısız durumda arıza akımlarının ulaşacağı seviye simülasyon çalışmaları ile belirlenmiştir. Buna göre,

sınırlayıcısız durumdaki farklı arıza tipleri için arıza akımlarının 63 A - 65 A aralığındaki değerlere yükseleceği tespit edilmiştir.

- SPR-AAS prototipi farklı arıza durumlarında oluşan arıza akımlarını etkin bir şekilde sınırlamaktadır. Üç faz, üç faz-toprak, iki faz-toprak ve faz-toprak kısa devre testlerinde arıza akımları sırasıyla 13,37 A, 13,59 A, 12,24 A ve 9,68 A değerlerine sınırlanmıştır.
- Test devresinde uygulanan farklı kısa devre arıza tiplerinde, SPR-AAS arıza akımlarını %78,21 - %85,69 aralığında değişen oranlarda sınırlamıştır. Buna göre, SPR-AAS tüm kısa devre arızalarında yüksek bir akım sınırlama kapasitesine sahiptir.
- Uygulamadaki test sonuçları ile simülasyon verileri karşılaştırıldığında, üç faz ve üç faz-toprak arızalarında oluşan arıza akımlarının maksimum değerlerinin oldukça yakın olduğu görülmüştür. İki faz-toprak arızasında %2,03 ve faz-toprak arızasında ise %1,09'luk bir fark oluşmaktadır. Bunun sebebinin, devre elemanlarının büyüklüklerinin enerji altında gösterdikleri değişim ve kaynak geriliminde oluşan dengesizliklerin olabileceği belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyon ve uygulama çalışmaları neticesinde, önerilen SPR-AAS devresinin tüm kısa devre arıza tiplerinde yüksek ve kararlı bir arıza akımı sınırlama performansına sahip olduğu açıkça ortaya konulmuştur. SPR-AAS'nin arıza akımlarını etkin bir şekilde sınırlamasının yanı sıra arıza anındaki OKN gerilim kararlılığını da koruyabilmesi, özellikle dağıtık üretim tesislerinin şebekeye bağlandığı baralar ile hassas yüklerin bulunduğu baralarda oluşması istenmeyen gerilim düşüşlerinin önüne geçilebilmesi için bir çözüm sağlayacaktır. Ele alınan tasarım ve performans parametreleri için elde edilen sonuçlar dikkate alındığında; basit yapısı, kolay kontrol edilebilmesi, ekonomik ve uzun ömürlü olması gibi avantajları olan SPR-AAS, güç sistemlerinde uygulanabilir niteliklere sahip bir katı hal arıza akımı sınırlayıcıdır.

KAYNAKÇA

[1] I. Kasikci, *Short Circuits in Power Systems*, 2nd ed. Weinheim: WILEY-VCH, 2018.

[2] L. Kovalsky, X. Yuan, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock, and F. Breuer, "Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems," *IEEE Transactions on Appiled Superconductivity*, vol. 15, no. 2, Jun. 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849471.

[3] H. Bahramian Habil, E. Azad-Farsani, and H. Askarian abyaneh, "A novel method for optimum fault current limiter placement using particle swarm optimization algorithm," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 10, Oct. 2015, doi: 10.1002/etep.1952.

[4] H. Samet, T. Ghanbari, H. Jafarabadi Ashtiani, and M. A. Jarrahi, "Evaluation of directional relay algorithms in presence of wind turbines and fault current limiters," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, no. 3, Mar. 2019, doi: 10.1002/etep.2772.

[5] M. Abdel-Salam, A. Abdallah, R. Kamel, and M. Hashem, "Improvement of Protection Coordination for a Distribution System Connected to a Microgrid using Unidirectional Fault Current Limiter," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 8, no. 3, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.asej.2015.08.008.

[6] R. M. Chabanloo, H. A. Abyaneh, A. Agheli, and H. Rastegar, "Overcurrent relays coordination considering transient behaviour of fault current limiter and distributed generation in distribution power network," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 9, 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0754.

[7] S.-H. Lee, "Application of high voltage current limiting fuse model using ATP-draw," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 6, Dec. 2010, doi: 10.1109/TDEI.2010.5658232.

[8] E. D. Johnson, "A Silicon Carbide Based Solid-State Fault Current Limiter for Modern Power Distribution Systems," PhD Thesis, Electrical Engineering, University of Arkansas, Fayetteville, 2012.

[9] J. Amon, P. C. Fernandez, E. Rose, A. D´Ajuz, and A. Castanheira, "Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation," in *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, 2005, pp. 1–6.

[10] V. S. Lukovtsev and S. A. Tierielnyk, "Short Circuit Protection Efficiency Increase in Ship Electric Power Systems," *Electronics and Control Systems*, vol. 3, no. 65, Nov. 2020, doi: 10.18372/1990-5548.65.14985.

[11] Y. Li, B. Liu, Y. Zhu, J. Hou, R. Liu, and L. Guo, “High-Impedance Transformer Parameter Determination Method for Limiting Short-Circuit Current of Power System,” in *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Aug. 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8921810.

[12] ABB Calor Emag Medium Voltage Products, “Is-limiter The world fastest limiting and switching device.” 2014.

[13] IEEE Industry Applications Society, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*. 2001.

[14] P. Kanlaya and N. Hoonchareon, “Combined bus splitting and line bypassing for short-circuit currents limitation,” in *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, May 2013, pp. 1–6, doi: 10.1109/ECTICon.2013.6559599.

[15] J. B. Ibrahim, N. Z. Zainol Abidin, and R. Othman, “A case study on sequential tripping scheme,” in *IEEE 2013 Tencon - Spring*, Apr. 2013, pp. 138–145, doi: 10.1109/TENCONSpring.2013.6584430.

[16] A. Heidary, K. Rouzbehi, M. Hesami, M. Bigdeli, and C. Bordons, “Bridge-type fault current limiter and hybrid breaker for HVDC grids applications,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 18, Sep. 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0013.

[17] H. Radmanesh, H. Fathi, and G. B. Gharehpetian, “Series Transformer-Based Solid State Fault Current Limiter,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, Jul. 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2398365.

[18] M. C. Ahn *et al.*, “The Short-Circuit Characteristics of a DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter With Fault Detection and Signal Control of the Power Converter,” *IEEE Transactions on Appiled Superconductivity*, vol. 15, no. 2, Jun. 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849462.

[19] V. Naphade, V. Ghate, A. Koshti, and G. Dhole, “Performance Investigation and Reactance Statistics with Monte Carlo Simulation of Saturated Core Fault Current Limiter,” in *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, Sep. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297662.

[20] J. R. Prigmore, J. A. Mendoza, and G. G. Karady, “A neodymium hybrid fault current limiter,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 7, Jul. 2015, doi: 10.1002/etep.1915.

[21] M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and I. Rahmati, “Reliability Study of HV Substations Equipped With the Fault Current Limiter,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, Apr. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2179122.

[22] F. Jiang *et al.*, "Design Consideration of a Dual-Functional Bridge-Type Fault Current Limiter," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, Dec. 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2944743.

[23] H. Javadi, S. M. Ali Mousavi, and M. Khederzadeh, "A novel approach to increase FCL application in preservation of over-current relays coordination in presence of asynchronous DGs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.030.

[24] R. Hu, L. Chen, H. Chen, Y. Xu, L. Ren, and Y. Tang, "Transient Stability Enhancement of a Multi-Machine Power System Using Modified Flux-Coupling-Type Superconducting Fault Current Limiters," in *2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Oct. 2020, pp. 1–2, doi: 10.1109/ASEMD49065.2020.9276374.

[25] A. Colmenar-Santos, J. M. Pecharromán-Lázaro, C. de Palacio Rodríguez, and E. Collado-Fernández, "Performance analysis of a Superconducting Fault Current Limiter in a power distribution substation," *Electric Power Systems Research*, vol. 136, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.02.005.

[26] M. Naresh, N. K. Singh, and A. K. Singh, "Superconducting fault current limiter for grid connected power system protection," in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Mar. 2016, pp. 576–581, doi: 10.1109/ICIT.2016.7474813.

[27] J.-X. Jin and X.-Y. Chen, "Cooperative Operation of Superconducting Fault-Current-Limiting Cable and SMES System for Grounding Fault Protection in a LVDC Network," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, Nov. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2438252.

[28] A. Berger, M. Noe, and A. Kudymow, "Recovery Characteristic of Coated Conductors for Superconducting Fault Current Limiters," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, Jun. 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2088090.

[29] Q. Qiu *et al.*, "Design and Test of 40-kV/2-kA DC Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 6, Sep. 2020, doi: 10.1109/TASC.2020.2988068.

[30] M. Moyzykh *et al.*, "First Russian 220 kV Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) For Application in City Grid," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 5, Aug. 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3066324.

[31] J. S. Reddy and S. Chatterjee, "Superconducting fault current limiter for smart grid application," in *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Feb. 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118025.

[32] L. S. Fleishman, E. P. Volkov, V. A. Malginov, A. v. Malginov, A. Yu. Kuntsevich, and A. S. Sheynshteyn, "Fault Current Limitation by a Transformer Type FCL Based on the Second Generation HTS Wires," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, Jun. 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2099632.

[33] D. Lee, H.-C. Jo, and S.-K. Joo, "Economic Evaluation Method for Fault Current Limiting Superconducting Cables Considering Network Congestion in a Power System," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, Jun. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2539941.

[34] V. Naphade, V. Ghate, and G. Dhole, "Experimental Study of Single Core Configurations of Saturated Iron Core Fault Current Limiter," in *2021 International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Jan. 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/SeFet48154.2021.9375726.

[35] B. Shen, J. Yang, T. Coombs, X. Y. Chen, M. S. Zhang, and S. Jiang, "Loss Analysis on the Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter for VSC-HVDC System," in *2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Oct. 2020, pp. 1–2, doi: 10.1109/ASEMD49065.2020.9276297.

[36] Haizhen Wang, Xiaoye Niu, Hui Hong, Weizhi Gong, and Ying Xin, "Saturated iron core superconducting fault current limiter," in *2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*, Oct. 2011, pp. 340–343, doi: 10.1109/ICEPE-ST.2011.6123003.

[37] Y. Zhong *et al.*, "A Novel Multi-Function Saturated-Core Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.1109/TMAG.2019.2905356.

[38] M. Eladawy and I. A. Metwally, "Design and Performance Analysis of Single-Phase Pre-Saturated Core Fault Current Limiters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2808318.

[39] L. Wei *et al.*, "Performance and Optimization Study of a Novel Compact Permanent-Magnet-Biased Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2715063.

[40] J. Yuan *et al.*, "Development and Analysis of Bridge-Type Saturated-Core Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2717849.

[41] J. Yuan *et al.*, "A Novel Three-Phase Compact Saturated-Core Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2704662.

[42] B. Wang *et al.*, "Development of a Hybrid Fault Current Limiter Using Liquid Metal for Large Capacity MVDC Power Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, doi: 10.1109/TIE.2021.3078401.

[43] J. R. Prigmore, J. A. Mendoza, and G. G. Karady, "A neodymium hybrid fault current limiter," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 7, Jul. 2015, doi: 10.1002/etep.1915.

[44] Ok-Bae Hyun, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Kwon-Bae Park, Seong-Woo Yim, and Il-Sung Oh, "Reliability Enhancement of the Fast Switch in a Hybrid Superconducting Fault Current Limiter by Using Power Electronic Switches," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, Jun. 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2018369.

[45] T. Ghanbari, E. Farjah, and N. Tashakor, "Thyristor based bridge-type fault current limiter for fault current limiting capability enhancement," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 9, Jun. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.1364.

[46] M. Abdolkarimzadeh, M. Nazari-Heris, M. Abapour, and M. Sabahi, "A Bridge-Type Fault Current Limiter for Energy Management of AC/DC Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2655106.

[47] H. Nourmohamadi, M. Nazari-Heris, M. Sabahi, and M. Abapour, "A Novel Structure for Bridge-Type Fault Current Limiter: Capacitor-Based Nonsuperconducting FCL," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2710018.

[48] M. Firouzi, G. B. Gharehpetian, and M. Pishvaie, "THD reduction of PCC voltage by using bridge-type fault current limiter," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 23, no. 5, Jul. 2013, doi: 10.1002/etep.1621.

[49] M. A. H. Sadi and Mohd. H. Ali, "A Fuzzy Logic Controlled Bridge Type Fault Current Limiter for Transient Stability Augmentation of Multi-Machine Power System," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2403258.

[50] A. Sahebi, H. Samet, and T. Ghanbari, "Method to secure the performance of the differential protection in presence of fault current limiter applied into the neutral line," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 10, no. 8, Nov. 2016, doi: 10.1049/iet-smt.2016.0119.

[51] C. Meyer and R. W. de Doncker, "LCC Analysis of Different Resonant Circuits and Solid-State Circuit Breakers for Medium-Voltage Grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, Jul. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.861334.

[52] H. Radmanesh, "Distribution Network Protection Using Smart Dual Functional Series Resonance-Based Fault Current and Ferroresonance Overvoltage Limiter," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, Jul. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2626152.

[53] T. Ghanbari and E. Farjah, “Development of an Efficient Solid-State Fault Current Limiter for Microgrid,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, Oct. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2208230.

[54] H. G. Sarmiento, “A fault current limiter based on an LC resonant circuit: Design, scale model and prototype field tests,” in *2007 iREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability*, Aug. 2007, pp. 1–5, doi: 10.1109/IREP.2007.4410570.

[55] G. Rashid and M. H. Ali, “Asymmetrical fault ride through capacity augmentation of DFIG based wind farms by parallel resonance fault current limiter,” in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Jul. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741506.

[56] Md. R. Islam, J. Hasan, Md. R. R. Shipon, M. A. H. Sadi, A. Abuhussein, and T. K. Roy, “Neuro Fuzzy Logic Controlled Parallel Resonance Type Fault Current Limiter to Improve the Fault Ride Through Capability of DFIG Based Wind Farm,” *IEEE Access*, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000462.

[57] Z. Xiaoqing and M. Li, “Using the Fault Current Limiter With Spark Gap to Reduce Short-Circuit Currents,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, Jan. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2007.911118.

[58] Z. Xiaoqing and M. Li, “A transformer type fault current limiter with spark gap,” *Electrical Engineering*, vol. 92, no. 1, Jun. 2010, doi: 10.1007/s00202-010-0153-7.

[59] X. Zhang and Y. Zhang, “A viable approach for limiting fault currents in electric networks,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 4, Apr. 2019, doi: 10.1002/tee.22838.

[60] Feng Chen, Daozhuo Jiang, Yu Fan, Ke Chen, Yimu Guo, and Wentao Lv, “Design of a novel bridge-type FCL and its application in UPFC,” in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Jul. 2015, pp. 1–5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286165.

[61] H. Radmanesh, S. H. Fathi, G. B. Gharehpetian, and A. Heidary, “Bridge-Type Solid-State Fault Current Limiter Based on AC/DC Reactor,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 1, Feb. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2477106.

[62] M. Nazari-Heris, H. Nourmohamadi, M. Abapour, and M. Sabahi, “Multilevel Nonsuperconducting Fault Current Limiter: Analysis and Practical Feasibility,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, Aug. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2618915.

[63] M. T. Hagh and M. Abapour, “Nonsuperconducting Fault Current Limiter With Controlling the Magnitudes of Fault Currents,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 3, Mar. 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2004496.

[64] A. Jalilian, S. B. Naderi, M. Negnevitsky, M. Tarafdar Hagh, and K. M. Muttaqi, "Controllable DC-link fault current limiter augmentation with DC chopper to improve fault ride-through of DFIG," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 2, Feb. 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0146.

[65] M. Farsadi, T. S. Dizaji, and B. Kakesoury, "Modified parallel resonance type Fault Current Limiter," in *2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Nov. 2013, pp. 248–252, doi: 10.1109/ELECO.2013.6713841.

[66] W. Piasecki, A. Ruszczyk, and M. Stosur, "Resonant Fault Current Limiter for MV applications," in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Sep. 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642190.

[67] T. Ghanbari, E. Farjah, and A. Zandnia, "Development of a high-performance bridge-type fault current limiter," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 3, Mar. 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0276.

[68] T. Ghanbari and E. Farjah, "Unidirectional Fault Current Limiter: An Efficient Interface Between the Microgrid and Main Network," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2212728.

[69] T. Orłowska-Kowalska, F. Blaabjerg, and J. Rodríguez, *Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives*, vol. 531. Cham: Springer International Publishing, 2014.

[70] M. Firouzi and G. B. Gharehpetian, "Improving Fault Ride-Through Capability of Fixed-Speed Wind Turbine by Using Bridge-Type Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 2, Jun. 2013, doi: 10.1109/TEC.2013.2248366.

[71] H. Radmanesh, S. H. Fathi, and G. B. Gharehpetian, "Novel high performance DC reactor type fault current limiter," *Electric Power Systems Research*, vol. 122, May 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.01.005.

[72] A. Heidary, H. Radmanesh, A. Bakhshi, K. Rouzbehi, and E. Pouresmaeil, "A Compound Current Limiter and Circuit Breaker," *Electronics*, vol. 8, no. 5, May 2019, doi: 10.3390/electronics8050551.

[73] H. Radmanesh, A. Heidary, S. H. Fathi, and G. Gharehpetian, "Series Resonance Based Fault Current Limiter with Controlling The Point of Common Coupling Voltage," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 14, no. 4, 2018.

[74] M. Firouzi, "A modified capacitive bridge-type fault current limiter (CBFCL) for LVRT performance enhancement of wind power plants," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.1002/etep.2505.

[75] M. I. Marei, H. S. K. El-Goharey, and R. M. Toukhy, “Fault ride-through enhancement of fixed speed wind turbine using bridge-type fault current limiter,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 3, no. 1, May 2016, doi: 10.1016/j.jesit.2016.01.002.

[76] M. M. Moghimian, M. Radmehr, and M. Firouzi, “Series Resonance Fault Current Limiter (SRFCL) with MOV for LVRT Enhancement in DFIG-Based Wind Farms,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 19–20, Dec. 2019, doi: 10.1080/15325008.2020.1731873.

[77] M. Firouzi, G. B. Gharehpetian, and B. Mozafari, “Improvement of Power System Stability by Using New Switching Technique in Bridge-type Fault Current Limiter,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 2, Jan. 2015, doi: 10.1080/15325008.2014.977463.

[78] M. A. H. Sadi and Mohd. H. Ali, “Lyapunov Function Controlled Parallel Resonance Fault Current Limiter for Transient Stability Enhancement of Power System,” in *2018 North American Power Symposium (NAPS)*, Sep. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/NAPS.2018.8600554.

[79] Md. K. Hossain and Mohd. H. Ali, “Transient stability augmentation of PV/DFIG/SG-based hybrid power system by parallel-resonance bridge fault current limiter,” *Electric Power Systems Research*, vol. 130, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2015.08.016.

[80] G. Rashid and M. H. Ali, “Application of parallel resonance fault current limiter for fault ride through capability augmentation of DFIG based wind farm,” in *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, May 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/TDC.2016.7519858.

[81] A. Mahmoudian, M. Niasati, and M. A. Khanesar, “Multi objective optimal allocation of fault current limiters in power system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 85, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.06.013.

[82] B. CHEN, L. WEI, Y. ZHU, Y. ZHONG, J. YUAN, and Y. LEI, “Pareto optimal allocation of fault current limiter based on immune algorithm considering cost and mitigation effect,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 5, no. 5, Sep. 2017, doi: 10.1007/s40565-016-0249-9.

[83] S. A. A. Shahriari, A. Y. Varjani, and M. R. Haghifam, “Cost reduction of distribution network protection in presence of distributed generation using optimized fault current limiter allocation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.071.

[84] L. Chen *et al.*, “Pareto optimal allocation of resistive-type fault current limiters in active distribution networks with inverter-interfaced and synchronous

distributed generators," *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 6, Dec. 2019, doi: 10.1002/ese3.443.

[85] P. T. Ngoc and J. G. Singh, "Short circuit current level reduction in power system by optimal placement of fault current limiter," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.1002/etep.2457.

[86] M. E. Hamidi and R. M. Chabanloo, "Optimal Allocation of Distributed Generation With Optimal Sizing of Fault Current Limiter to Reduce the Impact on Distribution Networks Using NSGA-II," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 2, Jun. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2018.2867910.

[87] H. Bahramian-Habil, E. Azad-Farsani, B. Vahidi, H. Askarian-Abyaneh, and G. B. Gharehpetian, "Fault Current Limiter Placement Using Multi-Objective Firework Algorithm," *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 17, Oct. 2017, doi: 10.1080/15325008.2017.1405466.

[88] X. Zhang, H. S. Ruiz, J. Geng, and T. A. Coombs, "Optimal location and minimum number of superconducting fault current limiters for the protection of power grids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 87, May 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.11.014.

[89] P. Yu, B. Venkatesh, A. Yazdani, and B. N. Singh, "Optimal Location and Sizing of Fault Current Limiters in Mesh Networks Using Iterative Mixed Integer Nonlinear Programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, Nov. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2507067.

[90] J. Prigmore, "A Neodymium Based Hybrid Fault Current Limiter," PhD Thesis, Arizona State University, Phoenix, 2013.

[91] A. Thirumalai, "Design of Data Acquisition System and Fault Current Limiter for an Ultra Fast Protection System," M.S. Thesis, Arizona State University, Phoenix, 2011.

[92] L. Kovalsky, X. Yuan, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock, and F. Breuer, "Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems," *IEEE Transactions on Appiled Superconductivity*, vol. 15, no. 2, Jun. 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849471.

[93] M. M. R. Ahmed, "Development of A Solid-State Fault Current Limiting and Interrupting Device Suitable for Power Distribution Networks," PhD Thesis, University of Northumbria, Newcastle, 2002.

[94] S. M. Blair, "The Analysis and Application of Resistive Superconducting Fault Current Limiters in Present and Future Power Systems," PhD Thesis, Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, 2013.

[95] Cigre Working Group A3.23, “Application and Feasibility of Fault Current Limiters in Power Systems,” Jun. 2012.

[96] B. il Kang, “Application of Thyristor-Controlled Series Reactor for Fault Current Limitation and Power System Stability Enhancement,” M.S. Thesis, Electrical Engineering, University of Colorado, Denver, 2013.

[97] G. Tang, “A Fault Current Limiter for Minimizing Impacts of Distributed Generation on Coordinated Relay Protection in Radial Systems,” M.S. Thesis, Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, 2004.

[98] X. Pei, “Superconducting Fault Current Limiter with Integrated Vacuum Interrupter,” PhD Thesis, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester, 2012.

[99] N. Akay, O. Arıkan, and Ö. Karacasu, “Güç Sistemlerinde Arıza Akım Sınırlama Yöntemlerinin İncelenmesi,” in *Elektrik - Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2016)*, Dec. 2016, pp. 38–42.

[100] S. Behzadirafi, “Impact of Fault Current Limiters and Demand Response on Electric Utility Asset Management Programs,” PhD Thesis, School of Graduate Studies, University of North Dakota, Grand Forks, 2015.

[101] K.-H. Hartung and V. Schmidt, “Limitation of short circuit current by an IS-limiter,” Sep. 2009, doi: 10.1109/EPQU.2009.5318861.

[102] N. Akay, “Elektrik Enerjisi İletim Hatlarında Arıza Akımlarının Sınırlandırılması,” M.S. Thesis, Electrical Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, 2016.

[103] L. Chen, H. Chen, J. Yang, Y. Tang, and L. H. Koh, “Optimal allocation of flux-coupling-type SFCLs for a micro-grid with wind-PV hybrid generation and battery energy storage,” in *2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Oct. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ACEPT.2016.7811507.

[104] J.-S. Kim, J.-C. Kim, and S.-H. Lim, “Study on Protection Coordination of a Flux-Lock-Type Superconducting Fault Current Limiter Using Switches,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, Jun. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2549551.

[105] Ho-Ik Du, Byoung-Sung Han, and Sang-Seob Song, “Evaluation on Current Limiting Properties During 3-Phase Connection Between the Wires for SFCL and HTS Cable,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, Jun. 2012, doi: 10.1109/TASC.2011.2180501.

[106] T. Ghanbari and E. Farjah, “A Multiagent-Based Fault-Current Limiting Scheme for the Microgrids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, Apr. 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2282917.

[107] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, T. M. L. Assis, R. de Andrade, and M. Noe, "Simulations of Resistive and Air Coil SFCLs in a Power Grid," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, Jun. 2015, doi: 10.1109/TASC.2014.2387311.

[108] P. J. C. Branco, M. E. Almeida, and J. A. Dente, "Proposal for an RMS thermoelectric model for a resistive-type superconducting fault current limiter (SFCL)," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 10, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2010.04.002.

[109] L. Ye and K.-P. Juengst, "Modeling and Simulation of High Temperature Resistive Superconducting Fault Current Limiters," *IEEE Transactions on Appiled Superconductivity*, vol. 14, no. 2, Jun. 2004, doi: 10.1109/TASC.2004.830293.

[110] B. Li and J. He, "Studies on the Application of R-SFCL in the VSC-Based DC Distribution System," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, Apr. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2537049.

[111] S. M. Alaraifi and M. S. el Moursi, "Hybrid HTS-FCL Configuration With Adaptive Voltage Compensation Capability," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 6, Dec. 2014, doi: 10.1109/TASC.2014.2329392.

[112] G. R. F. Q. Mafra, R. M. Vidaurre, F. Z. Fortes, M. Z. Fortes, and G. G. Sotelo, "Application of a Resistive Superconducting Fault Current Limiter in a Distribution Grid," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, no. 18, Nov. 2016, doi: 10.1080/15325008.2016.1214636.

[113] M. R. Barzegar-Bafrooei, A. Akbari Foroud, J. Dehghani Ashkezari, and M. Niasati, "On the advance of SFCL: a comprehensive review," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 17, Sep. 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6842.

[114] W. Guo *et al.*, "Multicell Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, Apr. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2263773.

[115] JiBin Cui *et al.*, "Study on Field Suppression Unit in DC Excitation System for Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 5, Oct. 2014, doi: 10.1109/TASC.2014.2340440.

[116] Ying Xin *et al.*, "Development of Saturated Iron Core HTS Fault Current Limiters," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, Jun. 2007, doi: 10.1109/TASC.2007.898181.

[117] H. Xiao *et al.*, "Analysis of Transient Overvoltage in 220 kV Saturated Core HTS FCL," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, Oct. 2011, doi: 10.1109/TMAG.2011.2158575.

[118] A. Gyore, S. Semperger, L. Farkas, and I. Vajda, "Improvement of Functionality and Reliability by Inductive HTS Fault Current Limiter Units," *IEEE Transactions on Appiled Superconductivity*, vol. 15, no. 2, Jun. 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849458.

[119] B. Li, F. Jing, J. Jia, and B. Li, "Research on Saturated Iron-Core Superconductive Fault Current Limiters Applied in VSC-HVDC Systems," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, Oct. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2601649.

[120] Z. Wei, Y. Xin, J. Jin, and Q. Li, "Optimized Design of Coils and Iron Cores for a Saturated Iron Core Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, Oct. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2601621.

[121] Li Ren *et al.*, "Techno-Economic Evaluation of a Novel Flux-Coupling Type Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, Jun. 2010, doi: 10.1109/TASC.2009.2039784.

[122] Lei Chen, Yuejin Tang, Zhi Li, Li Ren, Jing Shi, and Shijie Cheng, "Current Limiting Characteristics of a Novel Flux-Coupling Type Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, Jun. 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2044651.

[123] B. Yılmaz, "Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcıların İncelenmesi ve Elektrik İletim Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması," M.S. Thesis, Electrical-Electronic Engineering, Fırat University, Elazıg, 2016.

[124] T. Janowski *et al.*, "Bi-2223 and Bi-2212 Tubes for Small Fault Current Limiters," *IEEE Transactions on Appiled Superconductivity*, vol. 14, no. 2, Jun. 2004, doi: 10.1109/TASC.2004.830298.

[125] J. Yuan *et al.*, "Performance Investigation of a Novel Permanent Magnet-Biased Fault-Current Limiter," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, Nov. 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2452294.

[126] A. R. Fereidouni, B. Vahidi, and T. Hosseini Mehr, "The Impact of Solid State Fault Current Limiter on Power Network With Wind-Turbine Power Generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, Jun. 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2213846.

[127] M. A. H. Sadi and Mohd. H. Ali, "Transient stability enhancement by bridge type fault current limiter considering coordination with optimal reclosing of circuit breakers," *Electric Power Systems Research*, vol. 124, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.03.011.

[128] S. B. Naderi, M. Jafari, and M. Tarafdar Hagh, "Parallel-Resonance-Type Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, Jul. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2196899.

[129] M. Firouzi, "A modified capacitive bridge-type fault current limiter (CBFCL) for LVRT performance enhancement of wind power plants," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.1002/etep.2505.

[130] M. E. Hossain, "Performance analysis of diode-bridge-type non-superconducting fault current limiter in improving transient stability of DFIG based variable speed wind generator," *Electric Power Systems Research*, vol. 143, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2016.09.020.

[131] M. Firouzi, M. Nasiri, M. Benbouzid, and G. B. Gharehpetian, "Application of multi-step bridge-type fault current limiter for fault ride-through capability enhancement of permanent magnet synchronous generator-based wind turbines," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 11, Nov. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12611.

[132] Mohammad Ashraf Hossain Sadi, "Transient Stability Improvement of Power Transmission Grid by Controlled Fault Current Limiters Considering Cyber-Attacks," PhD Thesis, Electrical and Computer Engineering, The University of Memphis, Memphis, 2016.

[133] W. Guo *et al.*, "LVRT Capability Enhancement of DFIG With Switch-Type Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 1, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2326997.

[134] R. Asghar, F. Rehman, Z. Ullah, A. Aman, K. Iqbal, and A. Ali Nawaz, "Modified switch type fault current limiter for low-voltage ride-through enhancement and reactive power support of DFIG-WT under grid faults," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 9, Jul. 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.1058.

[135] S. Sugimoto, J. Kida, H. Arita, C. Fukui, T. Yamagiwa, and Y. Murai, "Fault current limiting system for 500-kV power systems," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, no. 1, Apr. 1999, doi: 10.1002/(SICI)1520-6416(19990415)127:1<11::AID-EEJ2>3.0.CO;2-3.

[136] W. Huaxin, X. Hexun, and T. Guangfu, "Research of Main Circuit on the Series Resonance Fault Current Limiter," in *2006 International Conference on Power System Technology*, Oct. 2006, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPST.2006.321884.

[137] A. N. R. L. Sirisha and A. K. Pradhan, "Parameter Estimation of Resonant Fault Current Limiter for Protection and Stability Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 3, May 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2608904.

[138] J. Hong, Y. Guan, and G. Xu, "Influence on Power Frequency Over-Voltage by Employing Series Resonance Type Fault Current Limiter," in *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Mar. 2009, pp. 1–4, doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918435.

[139] O. Alizadeh, A. Yazdani, B. Venkatesh, and B. N. Singh, "Design and Transient Operation Assessment of Resonant FCLs in Bulk Power Systems," *IEEE*

Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 4, Aug. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2476704.

[140] bin Li, Qingquan Li, Hongshun Liu, Mingming Han, Zhenning Huang, and Jiangtao Wang, "The overvoltage of interrupting off-load transmission line with series-resonant type fault current limiter," in *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, May 2016, pp. 84–87, doi: 10.1109/APEMC.2016.7522875.

[141] G. G. Karady, "Concept of a combined short circuit limiter and series compensator (power lines)," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, Jul. 1991, doi: 10.1109/61.85844.

[142] G. G. Karady, "Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit," *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, vol. 139, no. 1, 1992, doi: 10.1049/ip-c.1992.0001.

[143] M. J. Damghani, D. Faramarzi, H. A. Abyaneh, and B. Vahidi, "Application of a parallel-resonance-type FCL for maintaining the recloser-fuse coordination in a power distribution system with a dispersed generation," in *2015 30th International Power System Conference (PSC)*, Nov. 2015, pp. 190–194, doi: 10.1109/IPSC.2015.7827747.

[144] A. Abramovitz and K. Ma Smedley, "Survey of Solid-State Fault Current Limiters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 6, Jun. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2174804.

[145] M. Rezaee and R. G. Harley, "Resonance-Based Fault Current Limiters: Theory, Applications, and Assessment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 4, Jul. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2817626.

[146] H. Radmanesh and S. H. Fathi, "Parallel resonance type fault current limiting circuit breaker," *High Voltage*, vol. 5, no. 1, Feb. 2020, doi: 10.1049/hve.2019.0146.

[147] R. Patel, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, "MATLAB/Simulink-Based Transient Stability Analysis of a Multimachine Power System," *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, vol. 39, no. 4, Oct. 2002, doi: 10.7227/IJEEE.39.4.3.

[148] B. Kucukaydin and O. Arikan, "Performance Analysis of Fault Current Limiting Methods on IEEE 9-Bus System," in *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Nov. 2019, pp. 131–135, doi: 10.23919/ELECO47770.2019.8990460.

[149] O. Arikan and B. Kucukaydin, "A new approach to limit fault current with series–parallel resonance strategy," *Electrical Engineering*, vol. 102, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00952-5.

[150] G. Rashid and M. H. Ali, “Fault ride through capability improvement of DFIG based wind farm by fuzzy logic controlled parallel resonance fault current limiter,” *Electric Power Systems Research*, vol. 146, May 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.01.018.

[151] C. S. Chang and P. C. Loh, “Designs synthesis of resonant fault current limiter for voltage sag mitigation and current limitation,” in *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings* , 2000, pp. 2482–2487, doi: 10.1109/PESW.2000.847199.

[152] J.-H. Teng and C.-N. Lu, “Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, no. 4, 2010, doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0340.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Uluslararası Makale

1. O. Arikan and B. Kucukaydin, "A new approach to limit fault current with series–parallel resonance strategy," Electrical Engineering, vol. 102, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00952-5.

Konferans Bildirisi

1. B. Kucukaydin and O. Arikan, "Performance Analysis of Fault Current Limiting Methods on IEEE 9-Bus System," in 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Nov. 2019, pp. 131–135, doi: 10.23919/ELECO47770.2019.8990460.

Proje

1. "Katı-Hal Arıza Akımı Sınırlayıcı Tasarımı", 119E665 nolu TÜBİTAK 1002 projesi, Proje Yürütücüsü Doç. Dr. Oktay ARIKAN, Bursiyer, 2020-2021.