
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DC REAKTÖR YAPISINDAKİ MANYETİK ALANLARIN FARKLI AĞ KOŞULLARI ALTINDA İNCELENMESİ VE YAPININ GELİŞTİRİLMESİ

Kamran GHORBANYAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2020

Kamran GHORBANYAN tarafından hazırlanan "DC REAKTÖR YAPISINDAKİ MANYETİK ALANLARIN FARKLI AĞ KOŞULLARI ALTINDA İNCELENMESİ VE YAPININ GELİŞTİRİLMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Selim ACAR

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Başkan: Prof. Dr. Gökay UĞUR

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Üye: Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

Yenilenebilir Enerji Ana Bilim Dalı, Giresun Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Tez Savunma Tarihi: 24/06/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kamran GHORBANYAN

24/06/2020

DC REAKTÖR YAPISINDAKİ MANYETİK ALANLARIN FARKLI AĞ KOŞULLARI ALTINDA İNCELENMESİ VE YAPININ GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kamran GHORBANYAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2020

ÖZET

Günümüzde, insanların güç sistemlerini kullanılmasına karşı artan talep nedeniyle, iletim hatları ve elektrik şebekeleri yüksek kapasitede çalışmaktadır. Oluşan bu durumdan dolayı, güç sistemleri yüksek hata akımı riskine girmektedir. Sistemlerin güvenilirliği ve kararlılığı, hata akımlarının şiddetinin kontrolü ve azaltılması ile direkt bağlantılıdır. Hata akımların kontrölü için çeşitli arıza akımı sınırlayıcılar (FCLs) modellenerek güç sistemlerine uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında, hata akım sınırlayıcısı olarak yeni bir DC-Reaktör yapısı (DCR) tasarlandı ve üretildi. Ardından kalıcı mıknatıslar kullanarak çekirdek (PDCR) yapısı geliştirildi. Her iki prototipte de çekirdeğin manyetik alanları çeşitli laboratuvar hata koşulları altında incelendi. Bu çekirdeklerin çalışma prensibi bir hata akımı üretim sistemi kullanılarak, çeşitli hata akımlarında analizleri ve bir elektrik alan algılama sistemi tarafından manyetik analizleri yapıldı. Prototiplerin devreleri kurulup test edildi. Aynı zamanda prototipler 3D-MAXWELL ve Matlab ile simule edildi, daha sonra deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldı. Sonuçların karşılaştırılması, arıza akım sınırlayıcısına dayanan önerilen DCR'nin, koruma sorunlarını ele almak için umut verici bir çözüm olduğunu gösterdi.

Bilim Kodu : 20205

Anahtar Kelimeler : Arıza akım sınırlayıcı, Manyetik alan, Kalıcı mıknatıs, DCR, PDCR

Sayfa Adedi : 71

Danışman : Prof. Dr. Selim ACAR

INVESTIGTION OF MAGNETIC FIELDS IN DC REACTOR STRUCTURE UNDER DIFFERENT NETWORK CONDITIONS AND IMPROVEMENT OF STRUCTURE

(M. Sc. Thesis)

Kamran GHORBANYAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2020

ABSTRACT

In the present world, due to the dramatic increase in the need for the use of power systems in humans, transmission lines increase the capacity of demand and therefore the electricity grid. For such reasons, the power systems were put at risk of high fault current. The reliability and stability of the systems are directly related to control and decrease the severity of the fault currents. Therefore, many fault current limiters (FCLs) have been made and applied to power systems. This master work presents a new structure of a DC reactor (DCR) based on the fault current limiter and improvement of its core structure by using permanent magnets (PDCR) and investigates the magnetic fields of both prototypes cores under various laboratory fault conditions. The principle of these cores was analyzed in various network fault currents using a fault current generation system and magnetic analyses were carried out by an electric field detection system. The setups of prototypes were built and tested. At the same time prototypes were simulated with MAXWELL-3D and MATLAB, then experimental and simulation results were compared. The comparison of the results indicates that the proposed DCR based on FCL is a promising solution to address protection issues.

Science Code : 20205

Key Words : Fault current limiter, Magnetic field, Permanent magnet, DCR, PDCR

Page Number : 71

Supervisor : Prof. Dr. Selim ACAR

TEŞEKKÜR

Danışmanım Prof. Dr. Selim ACAR'a teşekkürü ve özel düşüncemi ifade etmek istiyorum, siz benim için muazzam bir akıl hocası oldunuz. Bir araştırma yardımcısı olarak büyümeme izin verdiğin ve araştırmamı teşvik ettiğin için teşekkür ederim. Hem araştırmayla hem de kariyerimle ilgili tavsiyeleriniz paha biçilmezdi. Sevgili dostum ve iş arkadaşım Sayın Amir HEIDARY'ya özel minnettarlığımı ifade etmek istiyorum. Değerli bilgilerinizi, değerli yorumlarınızı, ipuçlarınızı ve rehberliğinizi aldığınız için içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, bu ömür boyu süren akademik başarı hayalini sürdürmemin bir sonucu olarak büyük fedakarlıklara katlanan anneme ve babama mutlak minnettarlığımı ifade etmek istiyorum. Ayrıca bu çalışmamı tüm aileme adadım. Koşulsuz sevgileri ve destekleri olmadan bu yolculuktaki birçok zorlukla karşılayamazdım. Uzun yıllar boyunca iyi ve kötü zamanlarını paylaştığımız sevgili yakın arkadaşım Pourya MOMEN DOOST'a ve özellikle sevgili arkadaşım Elnaz MOHEBBI NEZHAD'a teşekkür etmek istiyorum. Yüksek lisans eğitimimin her aşamasında manevi destekleri ile hep yanımda olan değerli arkadaşım Jamal Jalal MUSTAFA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Son olarak, 05/2019-13 nolu projede maddi desteklerini sunan Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeler Birimi'ne sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER 3

2.1. GİRİŞ 3

2.2. Literatür Özeti Yöntem ve Çözümler 4

2.2.1. Geleneksel ve eski koruma cihazları 4

2.2.2. Yeni ve kullanışlı koruma cihazları 6

2.3. Sonuç 13

2.4. FCL olarak Önerilen Süper İletken Olmayan Katı Hal DC-Reaktör 13

2.4.1. Analitik çalışmalar 14

3. MATERYAL VE YÖNTEM 25

3.1. DC-Reaktörü (DCR) 25

3.2. Geliştirilmiş DC-Reaktörü (IDCR) 26

3.3. Kalıcı Mıknatıslı DC-Reaktörü (PDCR) 26

3.4. Elektrik devresi 27

3.4.1. Koruma sistemi olarak FCL'siz elektrik devresi 27

Sayfa

3.4.2. Koruma sistemi olarak FCL'li elektrik devresi 28

3.5. Arıza Akımı Üretim Sistemi..... 30

3.6. Manyetik Alan Ölçüm Sistemi..... 33

4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....37

4.1. DCR'siz Arıza Akımının Deneysel Elektrik Analizi..... 37

4.2. DCR'li Arıza Akımının Deneysel Analizi 39

4.2.1. Deneysel elektrik analizi 39

4.2.2. Deneysel manyetik analizi 40

4.2.3. Simülasyon manyetik analizi 42

4.2.4. Cevap ve geridönüş süresi hesaplaması 44

4.3. IDCR'li Arıza Akımının Deneysel Analizi..... 45

4.3.1. Deneysel elektrik analizi 45

4.3.2. Deneysel manyetik analizi 47

4.3.3. Simülasyon manyetik analizi 49

4.3.4. Cevap ve geridönüş süresi hesaplaması 49

4.4. PDCR'li Arıza Akımının Deneysel Analizi 50

4.4.1. Deneysel elektrik analizi 50

4.4.2. Deneysel manyetik analizi 52

4.4.3. Simülasyon manyetik analizi 54

4.4.4. Cevap ve geridönüş süresi hesaplaması 55

5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 57

KAYNAKLAR 61

ÖZGEÇMİŞ 69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Herhangi bir koruma cihazı olmadan elektrik devresinin parametre değerleri 25

Çizelge 3.2. DCR'li elektrik devresinin parametre değerleri 29

Çizelge 4.1. DCR'nin cevap ve geridönüş süresi 45

Çizelge 4.2. IDCR'nin cevap ve geridönüş süresi 50

Çizelge 4.3. PDCR'nin cevap ve geridönüş süresi 56

ŞEKİLLERİNLİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Şehir şebeke Geriliminin akım-zaman çizelgesi.....5

Şekil 2.2. Şehir şebeke Geriliminin arıza oluşumu akım-zaman çizelgesi 5

Şekil 2.3. (a) manyetik hata akımı sınırlayıcısı ve (b) paralel tabanlı manyetik hata akımı sınırlayıcısı 12

Şekil 2.4. PMFCL modellerinin geleneksel topoloji prensipleri. (a) seri bağlantısı ve (b) paralel bağlantısı 12

Şekil 2.5. Elektrik devreler. (a) koruma sistemi olmayan elektrik devresi ve (b) koruma sistemi olan elektrik devresi.....13

Şekil 2.6. DCR'nin normal durumu arıza akımı olmadan.....15

Şekil 2.7. DCR'de voltaj düşüşü, yük değişiminden önce ve sonra.....16

Şekil 3.1. DCR'nin elektrik devresi.....26

Şekil 3.2. Koruma sistemi olmayan elektrik devresi 27

Şekil 3.3. DCR koruma sistemli elektrik devresi.....28

Şekil 3.4. Arıza akımı üretim sisteminin elektrik devresi.....30

Şekil 3.5. Manyetik alan ölçüm sisteminin elektrik devresi 33

Şekil 4.1. Normal şartlarda kaynak gerilimi, zaman bölünmesi 20 ms, volt bölünmesi 20mV.....37

Şekil 4.2. Arıza akım sırasında DCR'siz hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.....38

Şekil 4.3. Arıza akımı sırasında DCR'siz ve DCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında 39

Şekil 4.4. DCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.....41

Şekil 4.5. DCR çekirdeği, (a) 3D tasarım ve (b) MESH Analizi.....42

Şekil 4.6. DCR'nin dışında manyetik alan vektörleri.....43

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.7. DCR çekirdeğinin manyetik alan yoğunluğu dağılımı, (a) çekirdeğin içinde ve (b) çekirdeğin yüzeyinde.....44

Şekil 4.8. Arıza akımı sırasında DCR'li ve IDCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında 46

Şekil 4.9. Arıza akımı sırasında DCR'siz, DCR'li ve IDCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında 47

Şekil 4.10. DCR ve IDCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında 48

Şekil 4.11. Arıza akım sırasında IDCR ve PDCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında 51

Şekil 4.12. DCR, IDCR ve PDCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.....53

Şekil 4.13. PDCR çekirdeği dışındaki manyetik alan vektörleri 54

Şekil 4.14. PDCR çekirdeğinin manyetik alan yoğunluğu dağılımı, (a) çekirdeğin içinde ve (b) çekirdeğin yüzeyinde.....55

RESİMLERİNLİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Tam köprülü seri DC-Reaktörü 10

Resim 3.1. Arıza akımı sınırlayıcısı olarak yeni DC-Reaktör (DCR) prototipi 25

Resim 3.2. Kalıcı mıknatıslı DC-Reaktörü (PDCR) 26

Resim 3.3. Deney düzeneği 29

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
a	Yüzey alanı
$\mathbf{a_{DCR}}$	DCR çekirdek bölümünün alanı
$\mathbf{a_{PDCR}}$	PDCR çekirdek bölümünün alanı
$\mathbf{a_{PM}}$	Kalıcı mıknatısın alanı
B	Manyetik alan
$\mathbf{B_{R-DCR}}$	DCR çekirdeğinin artık akı yoğunluğu
$\mathbf{B_{R-PM}}$	Kalıcı mıknatısın artık akı yoğunluğu
$\mathbf{B_{R-PDCR}}$	PDCR çekirdeğinin artık akı yoğunluğu
C	kondansatör
D	Diyot
F	Bir devreye uygulanan manyetolojik kuvvet
f	frekans
gr	Gram
H	Manyetik alan şiddeti
$\mathbf{H_{DCR}}$	DCR çekirdeğinin manyetik alan şiddeti
$\mathbf{H_{C-PM}}$	Kalıcı mıknatısın zorlayıcı kuvveti
$\mathbf{H_{PDCR}}$	PDCR çekirdeğinin manyetik alan şiddeti
$\mathbf{H_{PM}}$	Kalıcı mıknatısın manyetik alan şiddeti
Hz	Hertz
İ	Akım
$\mathbf{i_D}$	DC-Reaktörün akımı
$\mathbf{i_{fw}}$	Diyotların serbest tekerlek akımı

Simgeler	Açıklamalar
i_P	PDCR'nin akımı
K	Kelvin
kg	Kilogram
kV	Kilovolt
L	İndüktans
l	Uzunluk
L_D	DC-Reaktör bobinin endüktansı
l_{DCR}	DCR'nin uzunluğu
L_{eq}	Toplam endüktans
L_{F-DCR}	Arıza durumunda DC-Reaktör bobinin endüktansı
L_{F-PDCR}	Arıza durumunda PDCR bobinin endüktansı
L_{Line}	Hat endüktansı
L_{N-DCR}	Normal durumda DC-Reaktör bobinin endüktansı
L_{N-PDCR}	Normal durumda PDCR bobinin endüktansı
l_{PDCR}	PDCR'nin uzunluğu
l_{PM}	Kalıcı mıknatıs uzunluğu
L_S	Kaynak endüktansı
mm	Milimetre
M	Malzeme mıknatıslanması
m	Metre
mA	Miliamper
mH	Milihenry
ms	Milisaniye
mT	Militesla
mV	Milivolt
N	Bobin içindeki sargı sayısı
P_{core}	Çekirdek toplam elektrik güç kaybı

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{R}$	Değişken direnç
$\mathbf{r_D}$	DC-Reaktör bobinin direnci
$\mathbf{r_{eq}}$	Toplam direnç
$\mathbf{r}_f$	Arıza direnci
$\mathbf{r_{Line}}$	Hat direnci
$\mathbf{r_S}$	Kaynak direnci
$\mathfrak{R}$	Manyetik isteksizlik
$\mathfrak{R}_{\mathbf{PM}}$	Kalıcı mıknatısın manyetik isteksizliği
$\mathfrak{R}_{\mathbf{S-DCR}}$	DCR çekirdeğinin doymuş manyetik isteksizliği
$\mathfrak{R}_{\mathbf{S-PDCR}}$	PDCR çekirdeğinin doymuş manyetik isteksizliği
$\mathfrak{R}_{\mathbf{U-DCR}}$	DCR çekirdeğinin doymamış manyetik isteksizliği
$\mathfrak{R}_{\mathbf{U-PDCR}}$	PDCR çekirdeğinin doymamış manyetik isteksizliği
s	Saniye
T	Tesla
t	zaman
$\mathbf{T_{Rec}}$	**G**eridönüş süresi
$\mathbf{T_{Res}}$	Cevap Süresi
V	Gerilimi
$\mathbf{V_D}$	DCR'nin gerilimi
$\mathbf{V_{rms}}$	Etkin voltaj
$\mathbf{V_S}$	Gerilim kaynağı
W	**V**at
Wb	Weber
$\boldsymbol{\omega}$	Açısal frekans
Ω	Om, elektrik direnç birimi
$\boldsymbol{\mu}$	Malzemenin geçirgenliği
$\boldsymbol{\mu_0}$	Boş alan geçirgenliği

Simgeler	Açıklamalar
μ_r	Göreceli geçirgenlik
μ_{S-DCR}	DCR çekirdeğinin doymuş geçirgenliği
μ_{S-PDCR}	PDCR çekirdeğinin doymuş geçirgenliği
μ_{U-DCR}	DCR çekirdeğinin doymamış geçirgenliği
μ_{U-PDCR}	PDCR çekirdeğinin doymamış geçirgenliği
θ	Dönüş açısı
$^{\circ}_{C}$	Santigrat derece

Kısaltmalar	Açıklamalar
AC	Alternatif akım
CB	Şalter
CBFCL	Kapasitör bazlı FCL
DCR	DC-Reaktörü
DC	Doğru akım
FCL	Arıza akımı sınırlayıcı
HVDC	Yüksek voltaj doğru akım
IDCR	Geliştirilmiş DCR (artırılmış olan bobin sargılarının sayısı)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IGBT	Yalıtımlı geçitli bipolar transistör
MFCL	Manyetik FCL
NSFCL	Süper iletken olmayan FCL
PDCR	Daimi mıknatıslı DC reaktör
PFC	Güç faktörü düzeltici
PFCL, PMFCL	Kalıcı mıknatıs tabanlı FCL
SFCL	Süperiletken FCL
SSFCL	Katı hal FCL
THD	Toplam harmonik bozulma

1. GİRİŞ

Günümüzde artan elektrik kullanımı talebi ile, elektrik üretim santrallerinin türü ve dağıtım ağları da artmaktadır. Dağıtım aşaması, tüketicilere elektrik dağıtımının son aşamalarından biridir. Bu bölüm genellikle orta gerilim hatlarını (1kV'den az), trafo merkezlerini ve alçak gerilim hatlarını (2V'den az) içerir [1,2]. Elektrik dağıtım şebekeleri, elektrik endüstrisinin kavşak noktasıdır, tüketicilerin bakış açısından, sektördeki dağıtım sisteminin sorunları elektrik endüstrisinin genel sorunu olacaktır. Artan gelişme, bu sürecin yanlış tahmini ve teknolojinin geri kalmışlığı elektrik dağıtım sisteminde her zaman sorunlara neden olmuştur [1,3].

Hem elektrik cihazlarında kısa devre (aşırı akım), hem de iletim hatlarıyla yıldırım çarpması (aşırı voltaj) gibi nedenlerle tüketicilerden veya iletim hatlarından kaynaklı olarak şebeke voltajında zaman zaman çeşitli arızalar meydana gelir. Bu arızalar evlerde, işyerlerinde ve şirketlerde kullanılan tüm ev ve endüstriyel elektronik cihazların hasarlanmasına neden olur.

Bu hataların arıza akımlardan dolayı meydana gelebilecek hasarları önlemek ve en aza indirmek, güç kaynağının sürekliliğini sağlamak için tüm sistemi korumak, hasar ve onarım maliyetlerini en aza indirmek, elektrik kullanıcılarının güvenliğini sağlamak için koruyucu cihazlar gereklidir. Elektrik sistemlerinin ve elektrik şebekelerinin tüm kısa devrelerinde, çok kısa bir sürede çok miktarda akım geçer. Bu arızaları en aza indirgemek için, dağıtım sistemlerinde arıza akımını yönetmek ve sınırlamak için sigortalar gibi çok düşük performans hızına sahip, devre kesici ve benzeri gibi sınırlı ömürleri olan birkaç geleneksel yaklaşım vardır. Son yıllarda oldukça ilgi çekici bir şekilde tartışılan, araştırılan ve kullanılan bir diğer yöntemi, koruma cihazı olarak Arıza Akımı Sınırlayıcısıdır (FCL). Süperiletken Olmayan FCL (NSFCL), Süperiletken FCL (SFCL), Kalıcı Mıknatıs Bazlı FCL (PFCL), DC-Reaktör (DCR) ve benzeri gibi çeşitli FCL tabanlı koruma sistemlerinin araştırılması, inşa edilmesi ve geliştirilmesi araştırmacıların oldukça dikkatini çekmiştir.

Bu tez çalışmasında yeni bir Süperiletken olmayan katı hal DC-Reaktör tabanlı FCL önerildi. Arıza durumlarında sınırlama kabiliyetini ve güvenilirliğini artırmak için performans iyileştirmesi üzerine araştırmalar yapıldı. Bu çalışmada ferromanyetik

çekirdeğin bobin sargılarının sayısı arttırılarak ve yapısında kalıcı mıknatıslar kullanarak DC-Reaktör tabanlı FCL önerildi. Üretilen cihaza Kalıcı Mıknatıslı DC Reaktör (PDCR) adı verildi. DCR ve PDCR tasarlandı ve analitik yöntemi doğrulamak için deney prototipleri üretildi.

Bu çalışma dört ana aşamadan oluşmaktadır. İlk adım olarak, voltaj kaynağı ile sabit ve değişken dirençlere sahip basit bir elektrik devresi inşa edildi ve arıza akımı üretim sistemine bağlandı. Devreye 0,2, 0,4 ve 1 saniye farklı sürelerle üç tip arıza akımı uygulandı ve sonuçlar osiloskopla kaydedildi. İkinci aşamada, DCR'nin aynı devreye bağlanmasıyla aynı arıza akımları uygulanmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Bununla birlikte, çekirdeğin manyetik alanındaki değişiklikler araştırmak için bir manyetik alan ölçüm sistemi kullanılarak kaydedildi. Çekirdeğin 3D manyetik analizi de ANSYS MAXWELL yazılım programı ile gerçekleştirildi. Üçüncü aşamada, Geliştirilmiş DC-Reaktörü (IDCR) adı verilen bobin sargılarının sayısı arttırılarak DCR'nin çekirdeği iyileştirildi. IDCR'nin aynı devreye bağlanmasıyla, elektriksel sonuçlar ve manyetik alan değişiklikleri aynı prensip ile kaydedildi. Dördüncü aşamada IDCR, Kalıcı Mıknatıslı DC Reaktör (PDCR) adı verilen ferromanyetik çekirdek yapısındaki kalıcı mıknatıslar kullanılarak geliştirildi. PDCR'nin aynı devreye bağlanmasıyla, elektriksel sonuçlar ve manyetik alan değişiklikleri aynı prensip ile kaydedildi ve çekirdeğin 3D manyetik analizi de ANSYS MAXWELL yazılım programı ile gerçekleştirildi. Sonunda simülasyon ve deneysel sonuçlar birlikte karşılaştırıldı ve sunuldu.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile beraber, elektrik talepleri arttıkça elektrik sistemleri ve bağlantıları gelişmekte ve daha karmaşık elektrik şebekelerine yol açmaktadır. Ayrıca, farklı ve ayrı elektrik üretim santrallerinin sayılarının artmasıda üretilen elektrik miktarının artmasına neden olmaktadır [4-7]. Güç kaynaklarından iletim hatlarına ve tüketici sayısına kadar güç şebekesinin kapasitesinin arttırılması daha fazla arıza akımına neden olmaktadır [8-9]. Anormal koşullar altında, güç şebekelerindeki arıza aşırı akım ve aşırı voltaj kategorilerine ayrılır. Aşırı voltajı daha iyi anlamak için, yıldırım çarpması ve elektromanyetik alanlarının güç şebekesi ile çarpışmasına dikkat çekilebilir. Bu çarpışma, birkaç milisaniyeden daha kısa bir sürede ağa çok büyük bir voltaj girmesine neden olarak, mekanik kuvvetler, bozulma, ekstra ısıtma ve ağ üzerindeki elektrik gerilimleri gibi çok ciddi ve onarılamaz zararlara neden olur.

Enerji kalitesi araştırması, tüketicilerin% 80-90'ının, çoğunlukla güç sistemlerindeki kısa devre arızasından kaynaklanan voltaj düşüşünden memnun olmadığını göstermektedir. Bu nedenle kısa devre arızası, güç dağıtım sistemlerindeki çeşitli arızalar arasında en yaygın zararlı arızalardan biridir. Kısa devre arızalarındaki arıza akımı maksimum nominal akımın 20 katından daha fazla olabilir [8-11]. Arıza akımlarını tespit etmek, sınırlamak ve kesmek için koruyucu ekipman eksikliği, elektrik şebekesinde ve elektrik sistemlerinde kapsamlı, maliyetli ve onarılamaz hasara neden olur. Bu eksiklik, arıza akımının yüksek darbe yoğunluğu nedeniyle elektrik sistemlerinin ve ağ ekipmanlarının ömrünü ve kaybını da azaltır. Bu koşullar altında, ağın farklı bölümlerinde koruma sistemlerinin ve elektrik sistemlerinin kullanılması aşağıdaki gibi avantajlara sahiptir:

- Korunan sistem akımının anormal akım artışlarının önlenmesi,
- Korumalı elektrik sisteminin kısa devresi nedeniyle şebeke voltaj düşüşünün önlenmesi,
- Elektrik sistemlerinin kısa devreleri nedeniyle gürültü azaltma,
- anlık şarj akımlarına ve geçici voltaja karşı kondansatörlerin korunması,
- enerji dağıtım tesislerinden kaynaklanan (rüzgar, güneş, dizel vb.) aşırı akımlara karşı sistemin korunması,
- Kısa devre nedeniyle kablolama ve güç iletişim kabloları dahil olmak üzere elektrik

tesisatlarının yanmasını ve kaybını önleme,

- Mevcut çarpma şiddetinin azalması nedeniyle elektromekanik bileşenlerin ömrünün uzatılması vb.

2.2. Literatür Özeti Yöntem ve Çözümler

2.2.1. Geleneksel ve eski koruma cihazları

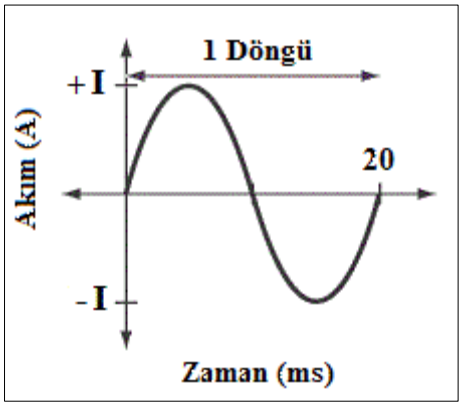
Bu tür arızaların şebeke ve elektrik sistemleri üzerindeki hasarını ve olumsuz etkilerini en aza indirmek ve azaltmak için, hata akımı yönetimi için birkaç farklı yöntem vardır [12]. Hızlı büyüyen alanlar için veri yolu bölünmesi ve sistemin yeniden yapılandırılması seçilebilir. Bu yöntem, ağın karmaşıklığını artırma ve ağa anahtarlama ekleme şeklindedir. Şebekeye yüksek empedanslı bir transformatörün monte edilmesi daha yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak bu, verimliliği ve voltaj kalitesini azaltır. Sorunlu yük için bir hava çekirdekli indüktör kullanılabilir. Aynı zamanda normal çalışma sırasındaki voltajı ve gücü azaltır [8].

Bir Devre Kesici (CB) de güvenilir bir koruma sistemidir. Otomatik veya uzaktan sıfırlama CB özelliklerinden biridir. CB'lerin bir başka özelliği yüksek akım kesme yeteneğidir, ancak bunlar gerçekten pahalı ve devasa elektromekanik sistemlerdir. Sadece düşük bir kullanım ömrüne sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda kalibrasyon ve tamiratlara da ihtiyaç duyarlar [13]. Sistemlerde artan arıza seviyeleri ve devrenin bağlantısının kesilememesi, gelecekte CB'ler için ortaya çıkabilecek endişelerdir. Bu nedenle, elektrik sistemlerini CB'ler ile koruması tadilat ve yenileme masraflarından dolayı yüksek maliyetlidir [8].

Birçok ülkede, sigortalar aşırı akıma ve aşırı yüklenmelere karşı en popüler koruma sistemi olarak kullanılır. Daha basit bir ifadeyle, sigortanın kendini imha etme işlevi vardır ve koruma sisteminin elektriğini aşırı akıma karşı kesmek için kendini feda eden bir tür küçük omik dirençtir. Sigortanın önemli bir kısmı, aşırı akım üzerinde eriyen ve devreyi bozan, aşırı ısı veya yangın nedeniyle daha fazla hasarı önleyen bir metal tel veya metal şerittir. Testlere ve çalışmalara göre, sigortalar, CB'ler vb koruma cihazlarının bir arıza akımını kesmek ve devreden çıkarmak için 150 milisaniyeye ihtiyacı vardır. Daha fazla bilgi için, 220 V güç kaynağı için periyodik akım süresi aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

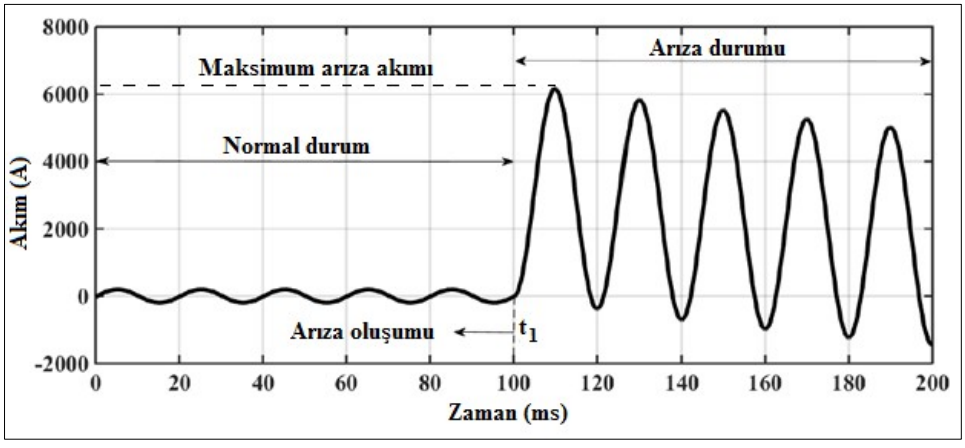
$$f = \frac{1}{t} \Rightarrow t = \frac{1}{f} \Rightarrow t = \frac{1}{50_{Hz}} \Rightarrow t = 20_{ms} \quad (2.1)$$

Cihazın normal durumunda, 50Hz frekanslı geçerli zaman çizelgesi Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Şehir şebeke Geriliminin akım-zaman çizelgesi.

Şekil 2.2'ye göre sistemdeki arıza oluşumu sırasında, 'de birinci tepe noktasının (arıza akımının ilk tepe noktası olarak bilinir) en yüksek değere sahip olduğu görülür; arıza akımı çözüldükten sonra grafik normal durum değerine döner. Hata akımının ilk zirvesi her durumda çok önemlidir, çünkü sınırlanmazsa veya fişi çekilmezse sistemde ciddi hasara neden olur.



Şekil 2.2. Şehir şebeke Geriliminin arıza oluşumu akım-zaman çizelgesi.

Kentsel elektriğin periyodik zaman değerini ve koruma cihazının sistemdeki fonksiyon süresini hesaplayarak; fonksiyonun gecikme süresini hesaplamak mümkündür. Bu nedenle, zaman fonksiyonu olarak 150 ms'yi 2.1 denkleminden 20 ms'ye bölerek sonuç, sigortalar ve şalt cihazları gibi koruma cihazlarının yaklaşık 7 periyot gecikme olduğunu kanıtlar. Bu süre, arıza akımının meydana gelme süresinden çok fazladır ve sistemde ve hatta koruma cihazlarında ciddi hasara neden olur. Bu nedenle, fonksiyondaki bu gecikme, sigortaların, CB'lerin vb seri dezavantajlarından biridir. Bu nedenle sistemleri korumak ve arıza akım değerini sınırlamak için elektrik sistemlerinin daha hızlı ve dakik arıza akımı sınırlayıcı koruma cihazlarına ihtiyacı vardır.

2.2.2. Yeni ve kullanışlı koruma cihazları

Arıza Akımı Sınırlayıcısı (FCL) bu soruna son yıllarda araştırmacılar tarafından büyük ilgi gören yeni bir çözümdür [14-18]. Çözüm, dünyanın birçok büyük ülkesindeki kamu ve özel şirketler tarafından desteklenmiştir ve araştırma kurumları tarafından yıllardır çeşitli FCL türleri kullanılmaktadır [19,20]. Son zamanlarda, elektrik şebekesinin yeniden yapılandırılması ve güvenliğinin artırılması eğilimi, FCL teknolojisinin güvenilir ve uygun maliyetli iş cihazları olarak kullanılmasına yönelik talebin artmasına neden olmuştur [8]. FCL teknolojisi kavramları birkaç mükemmel araştırma ve yürütme çalışmasında bulunabilir [21-23]. FCL'ler, çalışma prensiplerinin türüne ve bunları yapmak için kullanılan malzemelere göre sınıflandırılır.

FCL'ler genellikle süperiletken ve yarı iletken teknolojisi, indüksiyon cihazları, inaktif doğrusal olmayan elemanlar, vakum anahtarları kullanılarak üretilir. Kombine yöntemler de rapor edilmiştir. Bu tip FCL'lerin gerçek boyutlu örneklerinin kullanımı teknik olarak elektrik şebekelerinde ve sistemlerde kullanılabilirliği gösterir [8].

FCL, güç sistemleri ve şebekelerindeki aşırı akımları sınırlamak için bir çözümdür. FCL'lerin sınırlayıcı performansı nedeniyle, ideal yapıları normal durumda sıfır dirence ve güç şebekesinin arıza durumlarında yüksek dirence sahip olmalıdır. Ek olarak, devrenin ağın kararlı durumunda kayıpları olmamalıdır. FCL son derece güvenilir ve uygun maliyetli olmalıdır. Arıza durumunda, derhal cevap vermeli ve hatayı çözdükten sonra mümkün olan en kısa sürede normal duruma dönmelidirler [24-26].

Yukarıdakiler göz önüne alındığında, çok çeşitli araştırmalardaki araştırmacılar dört ana FCL türünü tanıtmışlardır;

- Süperiletken arıza akımı sınırlayıcısı (SFCL),
- Süper iletken olmayan arıza akım sınırlayıcısı (NSFCL),
- Katı hal arıza akımı sınırlayıcısı (SSFCL),
- Manyetik arıza akım sınırlayıcısı (MFCL).

Bunların her birinin farklı avantajları ve dezavantajları olan çeşitli alt kategorileri vardır.

Süperiletkenarızaakımısınırlayıcısı(SFCL)

Arıza akımlarını sınırlamak ve azaltmak ve güç sisteminin kararlılığını ve güvenilirliğini artırmak için süper iletken arıza akımı sınırlayıcıları (SFCL'ler) tasarlanmış ve yapılmıştır. SFCL'nin basit bir prensibi vardır. Normal durumda, SFCL empedansı sıfıra yakındır, bu nedenle herhangi bir sınırlama olmaksızın çalışır. Ancak arıza durumu altında Arıza akımının aşılmış hasar limiti değerine yükselmesi nedeniyle, süperiletken eleman hızlı bir şekilde normal durumuna döner, bu da aşırı akımı uygun oranla sınırlayan empedans artışına neden olur [27-31].

Süperiletken arıza akımı sınırlayıcıları rezistif ve endüktif tip olarak sınıflandırılmıştır [28,32];

- Direnç sınırlayıcı SFCL
- Endüktif SFCL'ler
  - Hava boşluğu FCL
  - Kısa ikincil sargılı transformatör
  - Doymuş demir çekirdekli reaktör

SCFCL direnç tipi, 4,2 K sıcaklıkta sıvı helyum ile kullanılır. Bu tip SCFCL uygulaması, düşük hacmi ve ağırlığı nedeniyle bazı alanlarda caziptir [30]. Şebekenin arıza durumundaki artan direnç nedeniyle, cihaz elemanlarına zarar vermeden hemen önce üretilen ısı giderilmelidir. Cihazın bir dezavantajı olarak, cihazın ürettiği ısıyı transfer etmek ve azaltmak için kullanılan teknoloji düşük kaliteye ve düşük performansa sahiptir. Bu nedenle, üretilen ısıyı mümkün olan en kısa sürede sınırlamak ve azaltmak önemlidir, bu nedenle koruyucu cihaza zarar gelmesini önlemek için devreden tamamen çıkarılabilir.

Ayrıca enerjiyi boşa harcamak için dirençli ve endüktif şöntler kullanır, bu da cihazın karmaşıklığını ve maliyetini artırır [31,33].

Hava boşluğu endüktif SFCL tipinde, demir çekirdeğin içindeki hava boşluğunda bir süper iletken şerit ikincil bobinin yerini alır. Normal durumda, yüksek bir isteksizlik ve düşük başlangıç indüksiyonu nedeniyle, süperiletken alanı boşluktan çeker. Arıza modunda, süperiletken akım eksikliği nedeniyle alanı boşluktan çekemez, manyetik direnç düşer ve ilk indüksiyonu arttırır. Bu cihazın iletim uygulamaları için düşük normal / anormal empedans katsayısı nedeniyle uygun olup olmadığı açık değildir [31].

Kısa ikincil sargılı transformatör, süper iletken bir ikincil bobin ile birincil bobin arasındaki endüktif kuplaj nedeniyle "endüktif SFCL" adı verilen bir başlangıç bobinine sahip bir transformatördür. Başlangıç bobini süper iletken bobinden çok daha büyük olabilir. Bu nedenle, cihazın soğutma kısmında daha az voltaj düşüşü olacaktır. Normal durumda, süper iletken ikincil bobin, akının demire nüfuz etmesini önlemek için başlangıç bobininden gerekli amperi alır. Bununla birlikte, arıza durumunda, süperiletken akımın artması ve amper denge seviyesine gerekli akımı aşması nedeniyle, akının demire nüfuz etmesini önleyememiştir. Böylece, hata akımı sınırlama eylemini gerçekleştirmek için birincil bobinde manyetik indüksiyon artmıştır. Bununla birlikte, sistemin azaltılmış ısı dağılımına rağmen, yüksek üretim maliyetleri, çekirdeklerde ve bobinlerde büyük miktarlarda bakır ve demir kullanma maliyeti ve pahalı süper iletken yapının bu cihazın dezavantajları olduğu düşünülmektedir [31,33].

Demir çekirdek doygunluğu yönteminde, devre akımı, bir DC süper iletken bobin tarafından doyurulmuş iki demir çekirdekli iki seri bobin içinden akar. Arıza durumunda çekirdek doygunluğu kaybolur ve çekirdek direnci artar. Süperiletken bobin sadece bir DC akımı tespit ettiği için her zaman süper iletken modda kalır ve hata oluştuktan sonra geridönüş süresi gerektirmez. Dezavantajları, yüksek bir kütleye sahip olması ve aynı verime sahip transformatör cihazlarına kıyasla çok pahalı olması ve süper iletken parçaların AC bobinin elektromanyetik alanından korunması gerektiğidir [31].

Süperiletkenolmayanarızaakımsınırlayıcısı(NSFCL)

Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılarının (NSFCL) yapısı, süper iletken olmayan bobibin

süper iletken bobin ile değiştirilmesi için son yıllarda üretilmiştir. Bu tip FCL, ileri süperiletken FCL (SFCL) teknolojisinin yüksek maliyetinden kaçınmak için birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir [24].

NSFCL cihazlarının cihaz ömrünü uzatma, güç kaybını azaltma, düşük maliyet ve SFCL tipinden daha küçük boyut gibi avantajları Anahtarlamalı Empedans Transformatöründe görülebilir. Diğer NSFCL avantajları arasında, hata akımını önceden belirlenmiş bir oranda kesme, güç şebekesinde güvenilirliği artırma, güç kalitesini artırma ve geçici ağ kararlılığını artırma becerisi bulunmaktadır [34-38].

Başka bir çalışmada, maliyet tasarrufu ve belirli bir değerdeki arıza akımı kesme kabiliyetine sahip basit bir kapasitör tabanlı FCL (CBFCL) yapısı oluşturulmuştur. Bu yapıdaki kapasitör bir hata oluştuğunda şarj edilir ve hata giderildikten sonra depolanan enerji, kapasitördeki akımda ani bir artışı önlemek için kullanılabilir. Arıza ve normal durumlarda dc ve ac veriyolları arasında enerji yönetimi yeteneğine sahip hibrid AC-DC sistemlerde kullanılabilecek yapı, düşük endüktans çekirdeği ve düşük maliyetle inşa edilmiştir [4].

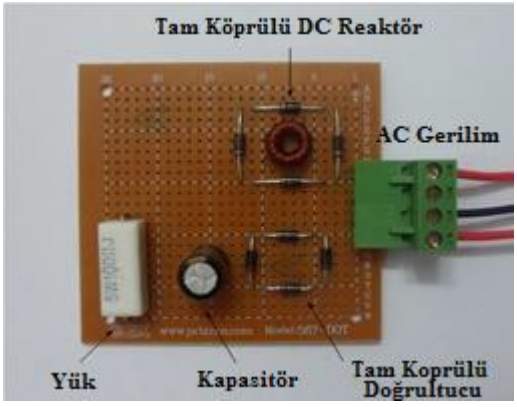
Daha basit teknolojiye sahip, düşük frekanslı bir transformatör ve kompakt DC çekirdekli düşük maliyetli bir başka NSFCL tipi araştırılmıştır [39]. Diğer araştırmalarda, anahtarlama elemanları sırasında daha düşük voltaj düşüşü, azaltılmış anahtarlama sayısı ve hata akımına daha hızlı yanıt ile sonuçlanan çok seviyeli bir performansla bir tür NSFCL tasarlanmış ve üretilmiştir [40].

Katıhalarızaakımısınırlayıcısı(SSFCL)

Bu konuda çok fazla çalışma bulunmaktadır. Kısaca bahsedilecek olursa, katı hal arıza akım sınırlayıcısı (SSFCL) olarak bir seri DC reaktör, güç sistemleri arıza akımlarını sınırlamak için yaygın olarak kullanılan elektrikli ekipmanlardır. Elektrik yük akımının değişmesi durumunda, yük değişimleri DC reaktör akımını arttırır. Böylece reaktör akımında bir miktar değişiklik olması reaktör voltajını ve yük terminalindeki voltaj düşüşünü arttırır. Bu referans, akım geçişi sırasında DC reaktör üzerindeki voltaj düşüşünün bu tür bir akım sınırlayıcısının dezavantajı olduğu gösterilmiştir [41-44].

Endüktansın bazı değerleri için deneysel testler yapılmıştır. Sonuçlar, yüksek endüktans için değişen yük akımının düşük değerlerden çok daha yavaş olduğunu göstermektedir [43]. Diğer çalışmalarda, bir arıza akımı sınırlayıcısı olarak DC reaktörü geliştirilmiş ve güç şebekesi arıza akımı sınırlaması ve ferrorezonans aşırı voltajı için çift fonksiyonlu bir DC reaktör tabanlı arıza akımı sınırlayıcısı getirilmiştir [44,45].

Güç sisteminde bir akım sınırlayıcı olarak yeni AC/DC reaktör esaslı FCL, akım yükseltme değerini ve akım harmoniklerini sınırlamak ve kontrol etmek için basit elektronik yüklerdeki yumuşatma kapasitör değerine büyük ölçüde bağlı olarak Resim 2.1'de gösterildiği gibi sunulmuştur [46,47]. Tam köprü doğrultucudaki toplam harmonik bozulmanın (THD) azaltılması için bir pasif filtre veya güç faktörü düzeltici (PFC) kullanılır. İndüksiyon ve kapasitif pasif elemanlar temelli DC filtresi, yeterince azaltılmış dalgalanma çıkış voltajı elde etmek için daima kullanılır [48]. Doğrultucu köprü terminallerinin DC tarafına uygun bir kapasitif ve dirençli elemanlar ekleyerek güç faktörü düzeltmesi elde edilir [49].



Resim 2.1. Tam köprülü seri DC-Reaktörü [50].

Seri hat endüktansının doğrultucu köprü üzerindeki etkisi incelenmiş ve tam köprü doğrultucu toplam harmonik bozulma (THD) deneysel olarak ölçülmüştür [51]. Ayrıca, modern yüksek gerilim doğru akım (HVDC) şebekesinde, pasif güç faktörü düzelticileri ve filtreleri, [52-58] 'de geniş çapta tartışılan kesinlikle gerekli ekipmanlardır. Güç faktörü düzeltme önemini göstermek için pasif filtre yapısının kapsamlı bir incelemesi verilmiştir [52]. IEEE 1547 standardı, tüketici ağında güç kalitesi analizi için kullanabilen düşük ve orta gerilim şebekeleri için harmonik standardı getirmektedir [53]. AC reaktörü serisi, güç faktörlerini artırmak için yaygın bir çözümdür [59,60].

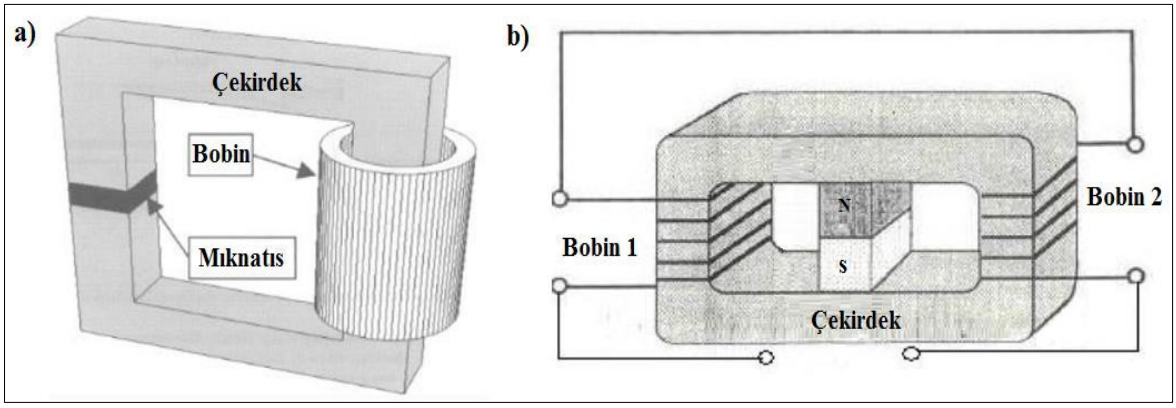
Manyetikarızaakımsınırlayıcısı(MFCL)

Bu tipteki arıza akım sınırlayıcıları, son yıllarda sürekli mıknatıs teknolojisi kullanılarak araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir [61-63]. Daimi mıknatıs tabanlı arıza akımı sınırlayıcıları (PMFCL'ler), ters dönme doygunluğu ve deformasyon riski ve kalıcı bir mıknatıs akısının sonlu yoğunluğu gibi önemli nedenlerden dolayı düşük voltajlı prototiplerle sınırlıdır [64]. PMFCL direnci, şebekenin normal koşulları altında çok düşüktür ve arızalara karşı oldukça dirençlidir. Normal moddan hata moduna geçmek veya tersi yönde geçiş yapmak için, bu işlemler mümkün olan en kısa sürede otomatik olarak gerçekleştirilir. PMFCL, küçük boyut, güvenilir performans ve sıfır sıfırlama süresi gibi benzersiz özelliklere sahip en çekici akım sınırlama teknolojilerinden biridir. Çekirdeğin demir yapısındaki bu tip arıza akımı sınırlayıcılarında, manyetik akının çekirdek mantoya nüfuz etmesini ve normal çalışma modunda sistem enerjisini boşa harcamasını önlemek için doygunluk kaynağı olarak kalıcı mıknatıslar kullanılır [65-81]. Aslında bu, yumuşak manyetik malzeme olarak demir çekirdeğin manyetik alanlarının yönlerinin, sert manyetik malzeme olarak kalıcı bir mıknatıs kullanılarak manyetik alanın yönüyle hizalandığı anlamına gelir [82].

PMFCL, düşük maliyetli ve iyi performansla diğer koruma sistemlerinden daha caziptir. Bu teknolojinin iki önemli özelliği vardır. Bunlardan biri, herhangi bir DC bobini veya süper iletken sistem tarafından üretilmeyen sabit bir manyetik alana sahip olmasıdır. Diğeri, pahalı olmayan bir yöntem olarak doğrusal olmayan demir çekirdek geçirgenliğinin dinamik transferi ile hata akımlarının azaltılmasındaki hareket hızıdır. Sonuç olarak, teknolojik ve ekonomik avantajlarda üstün yetkinliğe sahip [80].

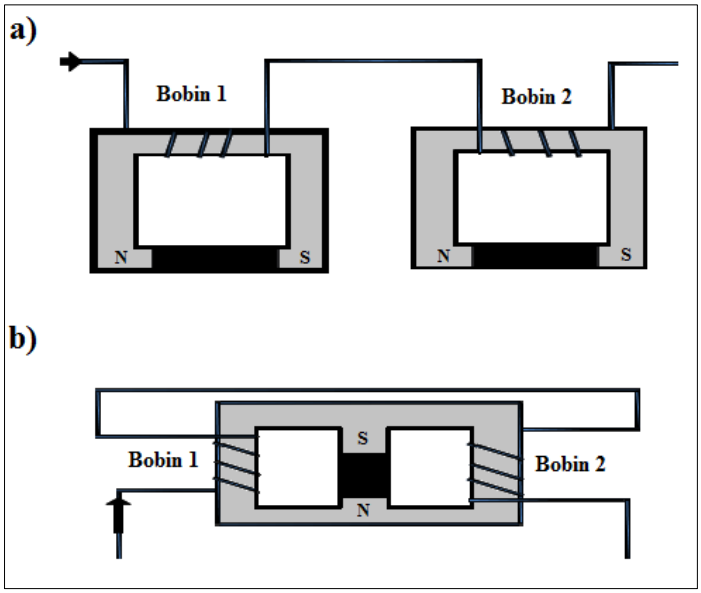
Dünyadaki birkaç üniversite ile kamu ve özel kurumlar bu konuyu araştırmaktadır. Bunların hepsi son derece değerli sonuçlarla alçak gerilim prototiplerinin tasarlanması ve üretilmesine yol açmıştır. Bu sonuçlar araştırmacıları daha fazla araştırmaya yöneltmiştir ve şu anda yüksek kapasiteli ve yüksek voltajlı prototiplerin manyetik modellemesini ve optimizasyonunu araştırılmaktadır.[66,68].

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, kalıcı mıknatıslı bir demir çekirdek bobinden oluşan bir yapıya sahip bu tür bir arıza akımı sınırlayıcısının farklı tiplerinde iki yapısı sunulmaktadır. Hepsi aynı ana prensibe sahiptir.



Şekil 2.3. (a) manyetik hata akımı sınırlayıcısı ve (b) paralel tabanlı manyetik hata akımı sınırlayıcısı.

Diğer araştırmada, biri seri diğeri paralel olmak üzere iki tip topoloji Şekil 2.4'te sunulmaktadır. Seri bağlantıda birbirine zıt iki özdeş sabit mıknatıs vardır. Amaç pozitif ve negatif yarım dalga akımlarını sınırlamaktır. Paralel bağlantı topolojisinde, demir çekirdeğin güçlü doygunluğu kaynağı olarak kalıcı bir mıknatıs kullanılır. Kararlı durumda, AC bobininin ürettiği manyetik alan demir çekirdeğin doygunluğunu arttırmak için yeterli değildir. Hata durumunda, demir çekirdeğin her biri, yarı dalga alternatif akım kısa dalgası üzerinde çok kısa bir sürede doygunluktan çıkar ve PMFCL indüksiyonu büyük ölçüde artar. Arıza akımı ağa uzun süre akarsa, ters çekirdek doygunluğuna neden olabilir ve koruma sistemi arıza akımlarını sınırlama yeteneğini kaybedebilir.



Şekil 2.4. PMFCL modellerinin geleneksel topoloji prensipleri. (a) seri bağlantısı ve (b) paralel bağlantısı [32].

2.3. Sonuç

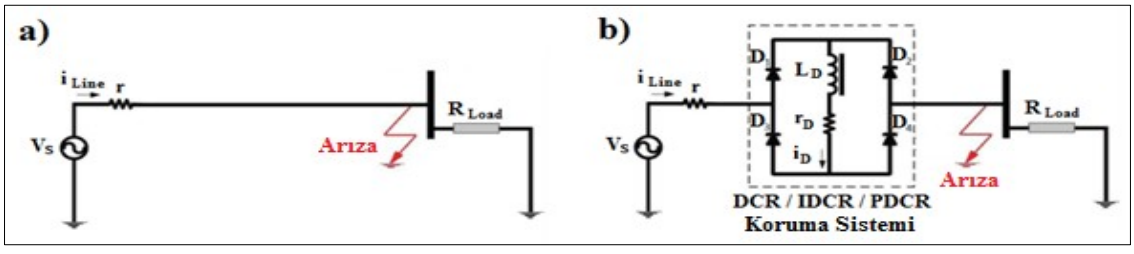
Farklı tipte sigortalar, süperiletken FCL'ler, süperiletken olmayan FCL'ler, katı hal FCL'ler ve manyetik FCL'ler incelenmiştir. Birinci tip koruma sistemi, çok düşük tepki verme hızı ve düşük ömürleri nedeniyle parçaların değiştirilmesi gibi önemli dezavantajlara sahiptir. İkincisi, genel sistem verimliliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkileyen süper iletken malzemelerin üretiminin ekonomik ve teknoloji kısıtlamalarıdır. Üçüncü durumda, bu tip arıza akım sınırlayıcılarının kapasite sınırlamalarından ve düşük verimliliğinden bahsedilebilir. Dördüncü durumda, yüksek voltajlar için kullanılamayan düşük voltajlar için kullanılabilirler.

Bu tezde, voltaj kalitesini düşürmeden sistemin güvenilirliğini ve verimliliğini artıran, düşük maliyetli, süper iletken olmayan bir arıza akımı sınırlama cihazını önerilmiştir. Manyetik davranış ve verimlilik, bobin arttırılarak ve çeşitli laboratuvar arıza koşulları altında demir silikon hibrid çekirdek yapısına kalıcı mıknatıslar eklenerek araştırılmıştır.

2.4. FCL olarak Önerilen Süper İletken Olmayan Katı Hal DC-Reaktör

Yeni DC-Reaktörün önerilen yapısı hakkındaki bu yüksek lisans tezinin giriş bölümünde belirtildiği gibi, Bölüm 3'te tartışılan yapının ferromanyetik çekirdeğine özellikler ekleyerek performansını arttırmaya ve iyileştirmeye çalışmaktadır. bu nedenle Bölüm 3.6'da tartışılan manyetik alan algılama sistemi, çekirdeğin manyetik alanındaki değişiklikleri araştırmak için kullanıldı ve sonuçlar Bölüm 4'te sunuldu.

Bölüm 3.4'te detaylandırılan bu tezde, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi iki tür elektrik devresi vardır.



Şekil 2.5. Elektrik devreler. (a) koruma sistemi olmayan elektrik devresi ve (b) koruma sistemi olan elektrik devresi.

Sistemin arıza durumunda ve normal durumda elektrik devrelerinin analitik çalışmaları bölüm 2.4.1'de ele alınmıştır.

Ayrıca, çekirdeğin iç ve dış manyetik alanının simülasyon analizi Ansys Maxwell programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir, çekirdek simülasyonunun 3D manyetik analizi, içteki değişikliklerin Bölüm 2.4.2'deki şekillerde gösterilmiştir. ve ferromanyetik çekirdeğin dış manyetik alanı sistemin arıza durumunda analiz edilmiştir.

Bu tezde tüm parametreler SI ölçüm sisteminde ölçüldü ve verildi.

2.4.1. Analitik çalışmalar

Bu bölümde, koruma sisteminin ve koruma sistemi olan ve olmayan elektrik devresinin elektriksel ve manyetik analitik çalışmalarından bahsedildi.

DCR'sizelektrikdevresininkararlı(normal)durumu

Elektrik devresinde herhangi bir arıza olmadığında, akım değeri aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir. Tüm denklemler parametre değerleri ve açıklamaları Tablo 3.1'de listelenmiştir.

$$V_S - r_S i_{Line} - r_L i_{Line} - R i_{Line} = 0 \tag{2.2}$$

Sonra,

$$i_{Line} = V_S / (r_S + r_L + R) \tag{2.3}$$

DCR'sizelektrikdevresininarızadurumu

Elektrik devresinin arıza akımı modunda, akım değeri aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir. Tüm denklemler parametre değerleri ve açıklamaları Tablo 3.2'de listelenmiştir.

$$V_S - r_S i_{Line} - r_L i_{Line} - r_f i_{Line} = 0 \quad (2.4)$$

Sonra,

$$i_{Line} = V_S / (r_S + r_L + r_f) \quad (2.5)$$

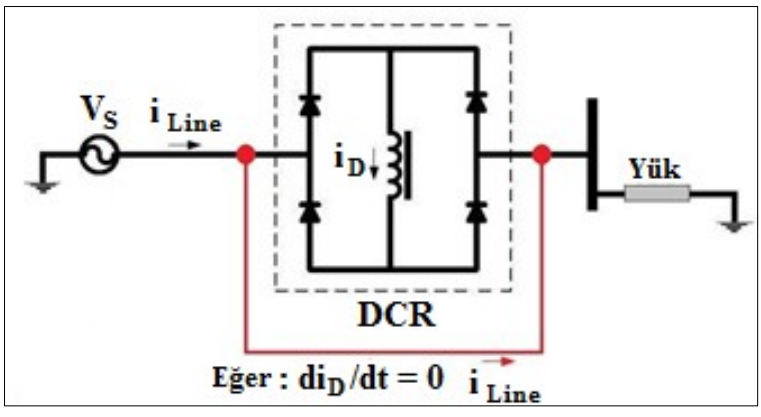
DCR'lielektrikdevresininkararlı(normal) durumu

DCR, AC şebekesindeki doğrultucu köprünün çıkış terminaline bağlanır ve doğrultucunun DC gerilimi normal çalışma modu sırasında DCR'yi atlar. DCR akımının ihmal edilebilir dalgalanması DCR direncine bağlıdır ve değeri sinüzoidal AC akımının tepe değeri ile aynıdır.

Bu nedenle, elektrik devresinde herhangi bir arıza akımı oluşmazsa, DCR akım değeri ( ) Denklem 2.6 olarak zaman (t) değişmez, bu nedenle Doğrultucu Köprüsü atlanır ve DCR hatta ihmal edilebilir empedans gösterir; ve elektrik devresi normal şekilde çalışmaya devam eder. Yani, DCR'nin Şekil 2.6'da gösterildiği gibi ideal koşullarda devre üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı anlamına gelir.

$$di_D / dt = 0 \quad (2.6)$$

Elektrik devresinin normal durumunda, IDCR ve PDCR, DCR ile aynı ihmal edilebilir empedans gösterir.



Şekil 2.6. DCR'nin normal durumu arıza akımı olmadan.

Kararlı durum koşulu sırasında, hat akımı ve voltajı aşağıdaki denklemleri takip eder:

$$V_S - r_S i_{Line} - r_L i_{Line} - r_D i_{Line} - r_f i_{Line} = 0 \tag{2.7}$$

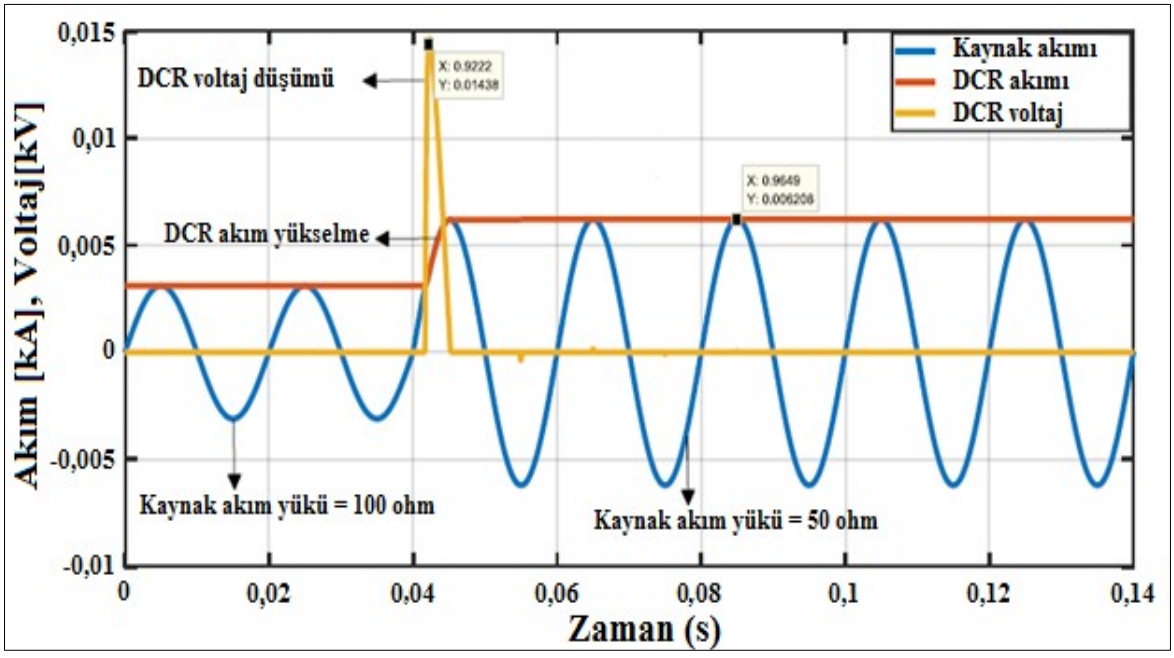
Sonra,

$$i_{Line} = V_S / (r_S + r_L + r_D + r_f) \tag{2.8}$$

Tüm denklemler parametre değerleri ve açıklamaları Tablo 3.2'de listelenmiştir. Kararlı durumda DCR çekirdek indüksiyonu Bölüm 2.4.1.4'te hesaplanmıştır.

DCR'lielektrikdevresininarızadurumu

Yük değerindeki ani bir değişiklik DCR'nin akımını arttırır. Bu koşullarda, DCR'nin akım değişimi reaktörde bir voltaj düşüşüne neden olur. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, yük değişiminden önce, DCR baypas edilir ve yük değişiminin anında, hat akımını geçici olarak sınırlamak için voltajı artar [50].



Şekil 2.7. DCR'de voltaj düşüşü, yük değişiminden önce ve sonra.

Geçici moddaki hat akımı ve voltajı aşağıdaki denklemleri takip eder:

$$r_S i_{Line} + L_S (di_{Line} / dt) + r_{Line} i_{Line} + L_{Line} (di_{Line} / dt) + r_D i_{Line} + r_f i_{Line} + V_D = V_S(t) \quad (2.9)$$

(V_D) DCR voltajıdır ve şuna eşittir:

$$V_D = L_D (di_D / dt) \quad (2.10)$$

Ve burada,

$$i_D = i_{fw} + i_{Line} \quad (2.11)$$

(i_{fw}) diyotların serbest akım akımıdır ve voltaj kaynağı bu denklemi takip eder:

$$V_S(t) = \sqrt{2} V_{rms} \, \mathrm{Sin}(\omega t) \quad (2.12)$$

(V_{rms}) etkili voltaj ve (ω) eşittir:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.13)$$

(f) AC kaynağının frekansıdır ve eğer,

$$\mathrm{Sin}(\omega t) = 1 \quad (2.14)$$

Elektrik devresinin maksimum voltajı:

$$V_{Max} = \sqrt{2} V_{rms} \quad (2.15)$$

Sonra,

$$V_S(t) - r_{eq} i_{Line} - L_{eq} (di_{Line} / dt) = 0 \quad (2.16)$$

Burada,

$$i_{Line}(t) = Ae^{-(r_{eq}/L_{eq})t} + BV_{Max}\,\mathrm{Sin}(\omega t + \theta) \tag{2.17}$$

A ve B başlangıç durumuna göre belirlendiğinde; toplam indüksiyon (L_{eq}) ve direnç (r_{eq}) eşittir:

$$L_{eq} = L_S + L_{Line} + L_D \tag{2.18}$$

$$r_{eq} = r_S + r_{Line} + r_D + r_f \tag{2.19}$$

Hata modunda, söz konusu denklemler IDCR ve PDCR için de geçerlidir. Diğer denklemler, parametre değerleri ve açıklamaları Tablo 3.2'de listelenmiştir.

(A/m) cinsinden ölçülen ve bu denklemi takip eden (M) sembolü ile temsil edilen malzeme manyetizasyonu:

$$M = \chi H \tag{2.20}$$

Burada (H), (A/m) cinsinden ölçülen manyetik alan şiddeti ve (χ) manyetik duyarlılıktır.

DCR, Silikon ve Demir malzeme karışımı yapılmış ferromanyetik bir çekirdeğe sahiptir. Bu nedenle, ferromanyetik malzeme için manyetik duyarlılık değeri 1'den büyüktür, tipik olarak demir içeren malzemeler 50 ila 10000 arasında değerlere sahip olabilir.

(Wb/A.m), (T.m/A) veya (H/m) olarak ölçülen (μ) sembolü ile temsil edilen ve bu denklemi takip eden malzeme geçirgenliği:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \tag{2.21}$$

Burada,

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \tag{2.22}$$

(μ_0), (Wb/Am) veya (H/m) ve (μ_r) olarak ölçülen boş alanın geçirgenliği, bir malzemedeki geçirgenliğin bir vakumdaki geçirgenliğe oranı ve dolayısıyla birimi yok. Boş bir alanda $\mu_r = 1$.

Ferromanyetik çekirdeğin manyetik alan şiddeti bu denklemi takip ediyor:

$$\oint Hdl = Ni_D \tag{2.23}$$

(N) bobindeki dönüş sayısı, (i_D) bobinin DC akımı ve (l) bobinin uzunluğu. Böylece, (T) 'de ölçülen ve bu denklemi takip eden (B) sembolü ile temsil edilen manyetik alan:

$$B = (\mu_0 Ni_D)/l + \mu_0 M \tag{2.24}$$

Devredeki manyetik akı bu denklemi takip eder:

$$\phi = \int Bda \tag{2.25}$$

(ϕ) devredeki (Wb) olarak ölçülen manyetik akıdır ve (a) 'da ( ) olarak ölçülen yüzey alanıdır. Devreye uygulanan manyetomotor kuvvet (A.N) cinsinden ölçülür ve bu denklemle hesaplanabilir:

$$F = \int Hdl \tag{2.26}$$

Denklem 2.23 ve 2.26 birleştirildiğinde manyetolojik kuvvet şöyle olacaktır:

$$F = Ni_D \tag{2.27}$$

Denklem 2.23, 2.25, 2.27 ve ($B = \mu H$) ile şu şekilde hesaplanabilir,

$$\phi \oint (dl / \mu a) = F \tag{2.28}$$

Bu benzetmeyi genişleten, makroskopik Ohm yasasının ($I = V / R$) karşılığı:

$$\phi = F / \Re \tag{2.29}$$

Burada,

$$\Re = l / \mu a \tag{2.30}$$

Burada ($\Re$) sembolü, (A.N/Wb) veya (N/H) olarak ölçülen devrenin manyetik isteksizliğidir.

Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasını uygulayarak, DCR çekirdeğinin normal ve arıza durumunda endüktansı sırasıyla şu şekilde yazılabilir:

$$L_{N-DCR} = N^2 / \Re_{U-DCR} \tag{2.31}$$

$$L_{F-DCR} = N^2 / \Re_{S-DCR} \tag{2.32}$$

Burada, ($\Re_{\mathbf{U-DCR}}$) ve ($\Re_{\mathbf{S-DCR}}$) sembolleri, DCR çekirdeğinin doymamış isteksizlik ve doygun isteksizliğidir:

$$\Re_{U-DCR} = l_{DCR} / \mu_{U-DCR} a_{DCR} \tag{2.33}$$

$$\Re_{S-DCR} = l_{DCR} / \mu_{S-DCR} a_{DCR} \tag{2.34}$$

($\mathbf{l}_{\mathbf{DCR}}$), ($\mathbf{a}_{\mathbf{DCR}}$), ($\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{U-DCR}}$) ve ($\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{S-DCR}}$) 'nin sembolleri ferromanyetik DCR çekirdeğinin uzunluğu, alanı, doymamış (normal durum) ve doymuş (arıza durumu) geçirgenliğidir.

PDCR'lielektrikdevresininarızadurumu

Sabit mıknatısın manyetik alan şiddeti [64] olarak temsil edilebilir:

$$H_{PM} = -H_{C-PM} + \left(B_{PM} / \mu_{PM} \right) \tag{2.35}$$

(H_{C-PM}), (μ_{PM}) ve (B_{PM})'nin sembolleri sırasıyla zorlayıcı kuvvet, kalıcı mıknatısın geçirgenliği ve manyetik alanıdır.

Ferromanyetik PDCR çekirdeğinin manyetik alanı [64] olarak temsil edilebilir:

$$\begin{aligned} B_{PDCR} &= \mu_{U-PDCR} H_{PDCR} && B_{PDCR} < B_{R-PDCR} \\ B_{PDCR} &= B_{R-PDCR} + \mu_{S-PDCR} \left(H_{PDCR} / H_{R-PDCR} \right) && B_{PDCR} \geq B_{R-PDCR} \end{aligned} \tag{2.36}$$

(H_{PDCR}), (B_{R-PDCR}), ($\mu_{S\text{-}PDCR}$) Ve ($\mu_{U\text{-}PDCR}$) 'nin sembolleri sırasıyla manyetik alan yoğunluğu, artık akı yoğunluğu, PDCR'nin ferromanyetik çekirdeğinin doymuş ve doymamış geçirgenliğidir.

Amper yasasını manyetik devre için uygulayarak sonuç aşağıdaki denklem olarak hesaplanabilir:

$$2H_{C-PM} l_{PM} + Ni_D = 2\phi \Re_{PM} + 2H_{PDCR} l_{PDCR} \tag{2.37}$$

Burda,

$$\Re_{PM} = l_{PM} / \mu_{PM} a_{PM} \tag{2.38}$$

($\Re_{PM}$), (a_{PM}) ve (l_{PM})'nin sembolleri sabit mıknatısın isteksizliği, alanı, uzunluğu ve (l_{PDCR}) sembolu PDCR'nin ferromanyetik çekirdeğinin uzunluğudur.

Çekirdekler derin doygunlukta (arıza durumu) ve doygunluktan (normal durum) çıktığında akı ifadesi sırasıyla şöyle yazılabilir:

$$\phi = (H_{C-PM} l_{PM} + \phi_{R-PDCR}(\Re_{S-PDCR} - \Re_{U-PDCR}) + (Ni_D / 2)) / (\Re_{PM} + \Re_{S-PDCR}) \quad (2.39)$$

$$\phi = (H_{C-PM} l_{PM} + (Ni_D / 2)) / (\Re_{PM} + \Re_{S-PDCR}) \quad (2.40)$$

Burada,

$$\Re_{S-PDCR} = l_{PDCR} / \mu_{S-PDCR} a_{PDCR} \quad (2.41)$$

$$\Re_{U-PDCR} = l_{PDCR} / \mu_{U-PDCR} a_{PDCR} \quad (2.42)$$

Burada, ($\Re_{\text{S-PDCR}}$) ve ($\Re_{\text{U-PDCR}}$) sembolleri PDCR çekirdeğinin doymuş isteksizliği ve doymamış isteksizliğidir; (a_{PDCR}) sembolu PDCR'nin ferromanyetik çekirdek bölümünün alanıdır.

Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasını uygulayarak, PDCR çekirdeğinin normal ve arıza durumunda endüktansı şu şekilde yazılabilir:

$$L_{N-PDCR} = N^2 / (\Re_{PM} + \Re_{U-PDCR}) \quad (2.43)$$

$$L_{F-PDCR} = N^2 / (\Re_{PM} + \Re_{S-PDCR}) \quad (2.44)$$

Cevapvegeridönüşsüresi hesaplama yöntemi

FCL'ler için cevap süresinde ve geridönüş süresinde azalma, hataya tepki veriminin artmasına ve elektrik devresinin normal durumuna geri dönmesine neden olur. Bu nedenle, DCR, IDCR ve PDCR çekirdekleri için cevap süresini ve geridönüş süresini hesaplamak çok önemlidir. Çünkü bu yüksek lisans tezinde yapılan çekirdeklerin diğer cihazlarla ayırt edilmesinin nedenlerinden biridir.

DCR, IDCR ve PDCR çekirdeklerinin manyetik alan indüksiyonunun cevap ve geridönüş süresi aşağıdaki denklemlerden hesaplanır; cevap süresi için:

$$T_{Res} = (t_2 - t_1) \times 0.9 \tag{2.33}$$

t_1 parametresi, elektrik devresinin arıza koşulu altında çekirdeğin endüksiyon başlama zamanıdır; bu, arıza akımının başlangıç zamanına veya çekirdeğin manyetik alanının ilk yükseliş zamanına eşittir ve t_2 parametresi, hatanın maksimum endüksiyon süresidir. elektrik devresinin durumu veya çekirdeğin manyetik alanının son yükseliş zamanı; Bu, bu süreden sonra, çekirdeğin, arıza giderilmeden önce elektrik devresinin arıza akımı altında maksimum manyetik alan değerine sahip olduğu anlamına gelir.

Geridönüş süresi için:

$$T_{Rec} = (t_4 - t_3) \times 0.1 \tag{2.34}$$

t_3 parametresi, elektrik devresinin normal durumunda arıza akım sonlandırma süresine veya çekirdeğin manyetik alan değerindeki ilk azalmanın zamanına eşit olan çekirdeğin endüksiyon sonlandırma zamanıdır ve t_4 parametresi, çekirdeğin elektrik devresinin normal durumunda indüksiyonu veya çekirdeğin manyetik alanının son azaltılma zamanı; bu, bu süreden sonra, çekirdeğin arıza akımını çıkardıktan sonra manyetik alan değişikliği olmadığı ve normal duruma döndüğü anlamına gelir.

Elektrikkayıpları

Genel olarak, ferromanyetik malzemelerdeki manyetik çekirdeklerde, alternatif manyetik alan uyarımları altında meydana gelen çekirdek kayıpları, Girdap Akım Kaybı ve Histerezis Kaybından oluşur. Ancak bu yüksek lisans tezinde, ferromanyetik çekirdeğin bobininden DC akım akışı nedeniyle alternatif manyetik alan uyarımları yoktur. Böylece, çekirdekler için elektrik kayıpları aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$P_{Core} = R i_D^{\,2} \tag{2.35}$$

Burada, (R) ve (i_D) sembolleri çekirdeğin direnci ve DC akımıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

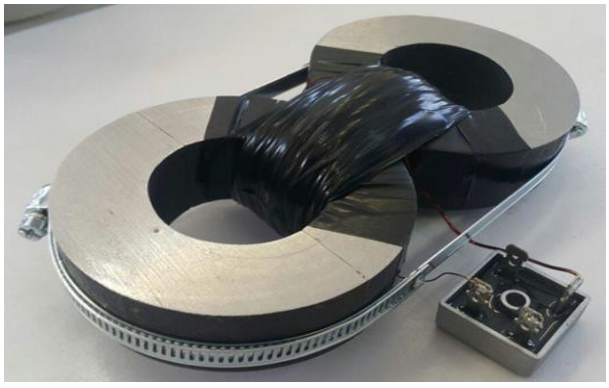
Bu yüksek lisans tezi, metal çekirdeğine farklı özellikler eklenerek performans kalitesinin iki aşamada iyileştirildiği yeni bir DC reaktör yapısı içerir. İlk adımda, yeni DC-Reactor metal çekirdek yapısının manyetik indüksiyon kapasitesi, bobin sargılarının sayısı değiştirilerek arttırıldı ve ikinci adımda metal çekirdek yapısına kalıcı mıknatıslar ilave edildi ve çeşitli laboratuvar ortamı hataları altında test edildi.

Önerilen prototip yapısı aşağıdaki başlıklarla çeşitli özelliklerle sunulmuştur:

- DC-Reaktörü (DCR),
- Geliştirilmiş DC-Reaktörü (IDCR),
- Kalıcı Mıknatıslı DC-Reaktörü (PDCR).

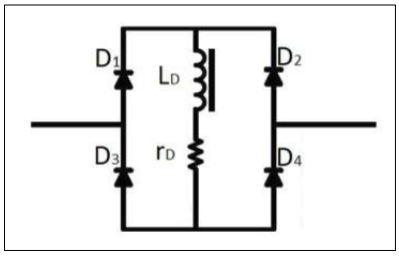
3.1. DC-Reaktörü (DCR)

Resim 3.1'de gösterildiği gibi arıza akımı sınırlayıcısı yeni DC-reaktörün (DCR) prototipi, bir bobin ile birbirine bağlanan iki ferromanyetik çekirdekten oluşur. Bobinin yapısında, yaklaşık 400gr, 0,3mm çaplı telden, 350 sarım sayısı bulunmaktadır. Daha önce yapılan araştırmalarda, ferromanyetik çekirdekler 1500 'de eritilmiş %2.3 Silikon ve %97.7 Demir malzemelerden üretilip çekirdek kayıplarını daha fazla düşürmeyi başarı olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle üretilen çekirdeklerde bu karışımdan yapılmıştır.



Resim 3.1. Arıza akımı sınırlayıcısı olarak yeni DC-Reaktör (DCR) prototipi.

Arıza akımı sınırlayıcısına olarak yeni DC-Reaktör (DCR) prototipinin elektrik devresi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. DCR'nin elektrik devresi.

Şekil 3.1'de D_1, D_2, D_3 ve D_4 köprü diyotlu doğrultucu, L_D bobin endüktansıdır ve r_D DCR'nin bobin direncidir.

3.2. Geliştirilmiş DC-Reaktörü (IDCR)

Resim 3.1'de gösterilen arıza akımı sınırlayıcısı DC-Reaktör (DCR) prototipi, 0,3mm çaplı tel ile bobin sargılarının sayısının 400gr'dan 590gr'a (520 sarım sayısı ile) artırılmasıyla geliştirilmiştir.

3.3. Kalıcı Mıknatıslı DC-Reaktörü (PDCR)

Resim 3.2'de gösterildiği gibi bu bölümde, ferromanyetik çekirdek yapısına kalıcı mıknatıslar eklenerek IDCR yapısı iyileştirilmiştir. Geliştirilmiş prototip, IDCR'nin her iki ferromanyetik çekirdeğinde iki kalıcı mıknatıs (Neodyum) yerleştirilmiştir.

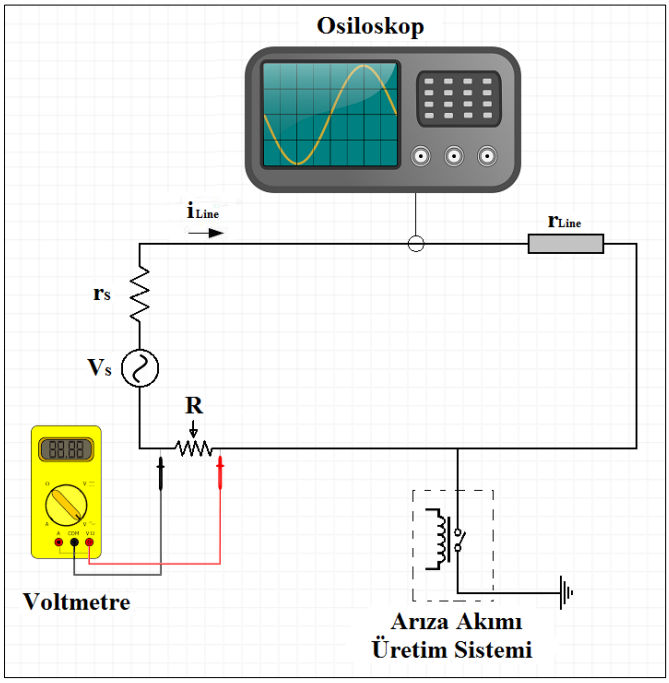


Resim 3.2. Kalıcı mıknatıslı DC-Reaktörü (PDCR).

3.4. Elektrik devresi

3.4.1. Koruma sistemi olarak FCL'siz elektrik devresi

Bu durumda, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, elektrik devresine bağlı herhangi bir arıza akımı sınırlayıcısı yoktur; elektrik devresine farklı arıza akımları uygulanarak akım değişimi bir osiloskop ile kaydedilir. Bu durum, meydana gelen arıza akımını sınırlamak için herhangi bir koruma sistemi olmayan gerçek bir elektrik sistemini temsil eder.



Şekil 3.2. Koruma sistemi olmayan elektrik devresi.

Bir voltmetre kullanarak, arıza akımları sırasında yük direnci üzerindeki voltaj düşüşünü gözlemlemek mümkündür.

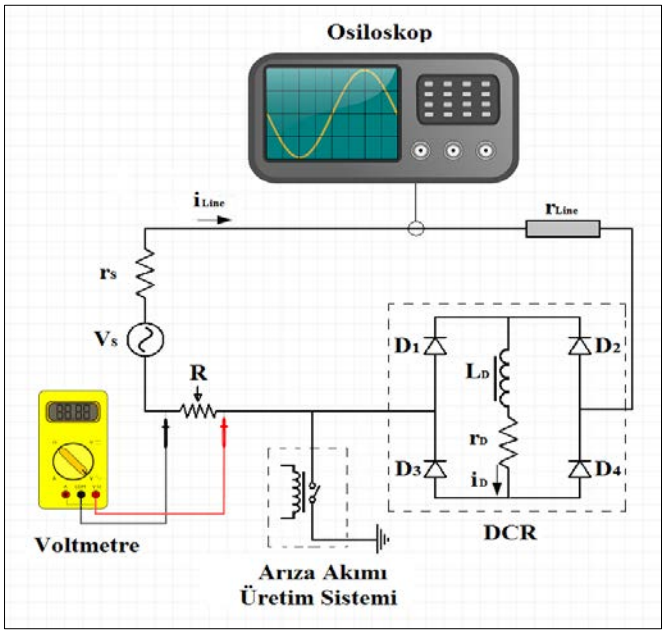
Parametre değerleri Tablo 3.1'de listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Herhangi bir koruma cihazı olmadan elektrik devresinin parametre değerleri.

Sembol	Açıklama	Değer
V_S	AC kaynak gerilimi	26,5V
r_S	Kaynak direnci	0,1Ω
r_{Line}	Hat direnci	0,1Ω
R	Değişken direnç	0-1000Ω
L_S	Kaynak endüktansı	10mH
L_{Line}	Hat endüktansı	10mH
i_{Line}	Hat akımı	

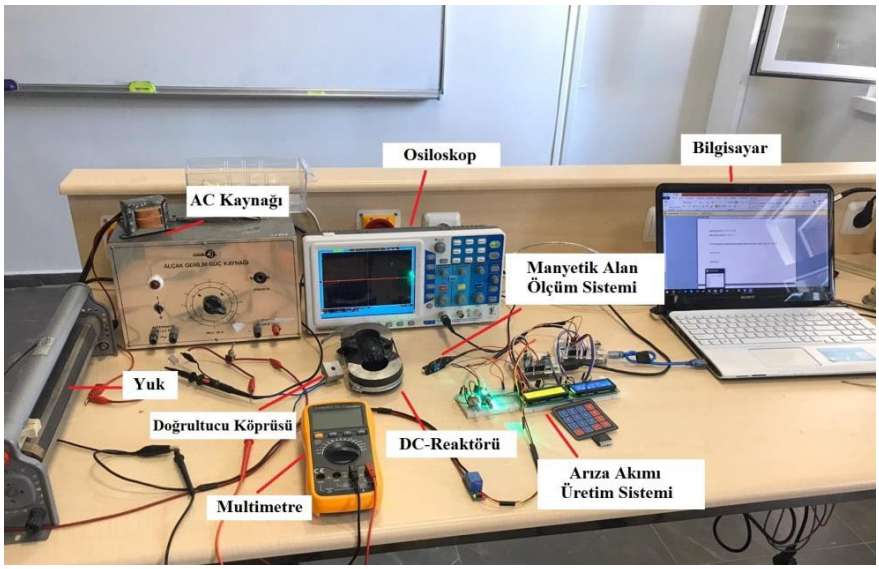
3.4.2. Koruma sistemi olarak FCL'li elektrik devresi

Bu bölümde, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, DCR elektrik devresine bağlanır ve akım değişimi bir osiloskopla kaydedilir. IDCR ve PDCR elektrik devresi bağlantıları DCR ile aynıdır. Bu durum, oluşan arıza akımını sınırlamak, hat akımını ve DCR manyetik davranışını analiz etmek için bir koruma sistemi ile gerçek bir elektrik sistemini temsil eder.



Şekil 3.3. DCR koruma sistemli elektrik devresi.

Deney düzeneği Resim 3.3'te gösterilmiştir.



Resim 3.3. Deney düzeneği.

Parametre değerleri Tablo 3.2'de listelenmiştir.

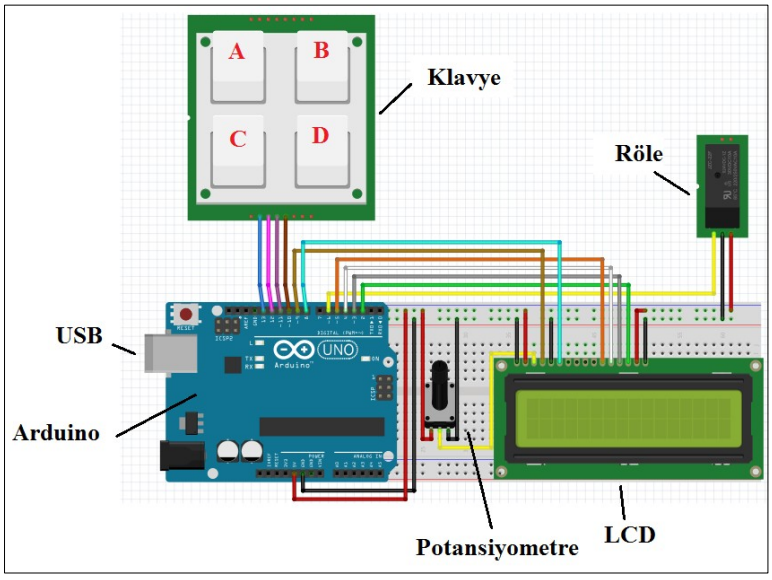
Çizelge 3.2. DCR'li elektrik devresinin parametre değerleri.

Sembol	Açıklama	Değer
V_S	AC kaynak gerilimi	26,5V
r_S	Kaynak direnci	0,1Ω
r_{Line}	Hat direnci	0,1Ω
r_D	DCR direnci	0,1Ω
r_f	Arıza direnci	0,01Ω
R	Değişken direnç	0-1000Ω
L_S	Kaynak endüktansı	10mH
L_{Line}	Hat endüktansı	10mH
L_D	DCR endüktansı	0,5H
i_{Line}	Hat akımı	
i_D	DCR akımı	
D_1	Doğrultucu köprü diyot	

D_2	Doğrultucu köprü diyot	
D_3	Doğrultucu köprü diyot	
D_4	Doğrultucu köprü diyot	

3.5. Arıza Akımı Üretim Sistemi

Gerçeğe yakın olacak şekilde laboratuvar ortamında farklı arıza akımını üretebilmek için, arıza akımı üretim sistemine ihtiyaç duymuştur. Bu nedenle Arduino Uno, röle ve klavye ile arıza akım üretim sistemi tasarlandı ve programlandı. Sistemin elektrik devresi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Arıza akımı üretim sisteminin elektrik devresi.

Arduino, dizüstü bilgisayara veya DC kaynağına bir USB bağlantı noktası üzerinden bağlanır. Röle, elektrik devresinin değişken yüküne (R) paralel bağlanır. Tuş takımını ve röleyi kullanarak elektrik devresine üç farklı arıza akım periyodu uygulayabilir. Bu çalışmada, 0,2s, 0,4s ve 1s'lik farklı sürelere sahip üç tip hata akımı kullanılmıştır. Tuş takımındaki A, B ve C tuşlarına basarak devreye uygulanabilirler. Cihaz arıza modlarının tüm elektriksel deneysel sinyal diyagramları bir osiloskopla alınmıştır. Ana elektrik devresine 1 saniyeden fazla kısa devre akım uygulanması elektrik kaynağını, elektrik koruma cihazlarını (DCR, IDCR ve PDCR) ve diğer cihazları aşırı ısınacak ve bozacaktır.

LCD, yapılan tüm eylemleri görüntüler ve LCD'nin parlaklığı bir potansiyometre ile değiştirilebilir. Arduino aşağıdaki programla programlanmıştır:

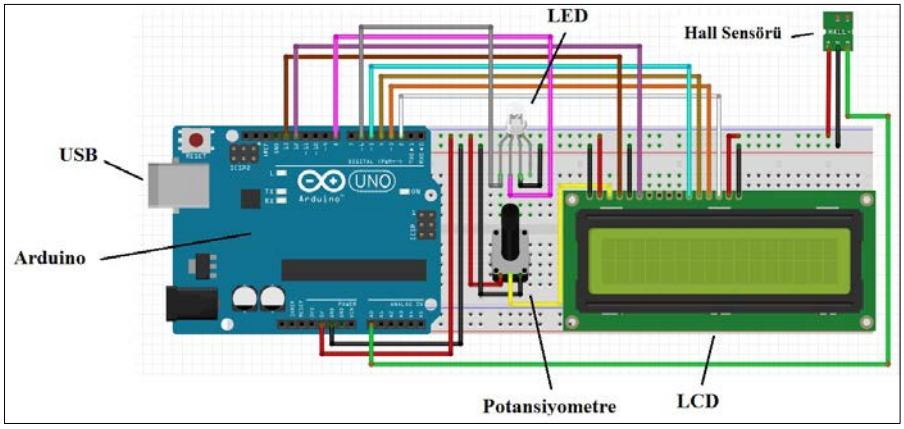
```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Keypad.h>
// --------------------------------------------------------------------
int Relay = 6;
const byte line = 3;
const byte column = 1;
char key;
char A;
char B;
char C;
char KeyPad[line][column]={ {'A'},{'B'}, {'C'} };
byte line_pins[]={13,12,11};
byte column_pins[]={7};
Keypad Pad = Keypad(makeKeymap(KeyPad) , line_pins , column_pins , line , column );
LiquidCrystal lcd(9,8,5,4,3,2);
// --------------------------------------------------------------------
void setup() {
pinMode(Relay,OUTPUT);
                    Serial.begin(9600);
                     lcd.begin(16,2);
                     Serial.println("Press A, B or C");
                     Serial.println("A=0.2s,B=0.4s,C=1s");
                     delay(0);
                    }
// --------------------------------------------------------------------
void loop() {

                     Serial.begin(9600);
                     key=Pad.getKey();
          if(key == 'A')  {
```

```
                    lcd.setCursor(0,0);
                    lcd.print("0.2s F.C. Applied");
                Serial.println(key);
                    Serial.println("0.2s F.C. Applied");
                    digitalWrite(Relay,HIGH);
                    delay(200);
                  }
    if(key == 'B')  {
                    lcd.setCursor(0,0);
                    lcd.print("0.4s F.C. Applied");
                    Serial.println(key);
                    Serial.println("0.4s F.C. Applied");
                    digitalWrite(Relay,HIGH);
                    delay(400);
                  }
    if(key == 'C')  {
                    lcd.setCursor(0,0);
                    lcd.print("1s F.C. Applied");
                    Serial.println(key);
                    Serial.println("1s F.C. Applied");
                    digitalWrite(Relay,HIGH);
                    delay(1000);
                  }
    else            {
                    lcd.setCursor(0,0);
                    lcd.print("Press A, B or C");
                    lcd.setCursor(0,1);
                lcd.print("A=0.2s,B=0.4s,C=1s");
                    digitalWrite(Relay,LOW);
                    delay(0);
                  }
        }
```

3.6. Manyetik Alan Ölçüm Sistemi

Bu bölümde, çalışmanın DCR ferromanyetik çekirdeğinin manyetik alanını ölçmek için bir manyetik alan detektörüne ihtiyacı vardır. Bu nedenle, manyetik sensörün mT ve ms cinsinden veri algıladığı Arduino ve Hall Sensor ile bir manyetik alan ölçüm cihazı yapılmıştır. Dedektörün elektrik devresi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Laboratuvarımızda mevcut olan UNILAB marka gaussmetre ile kıyaslanarak kalibrasyon ayarları yapılmıştır.



Şekil 3.5. Manyetik alan ölçüm sisteminin elektrik devresi.

Arduino, verileri (Zaman ve Manyetik Alan) bir excel dosyasına kaydetmek için bir USB bağlantı noktası üzerinden bir dizüstü bilgisayara bağlanır. Hall sensörünün çevresinde manyetik alan yoksa, LED yeşil yanar, ancak manyetik alan tespit edilirse LED mavi yanar. LCD her iki sonucu da gösterecektir ve LCD'nin parlaklığı bir potansiyometre ile değiştirilebilir. Arduino aşağıdaki programla programlanmıştır:

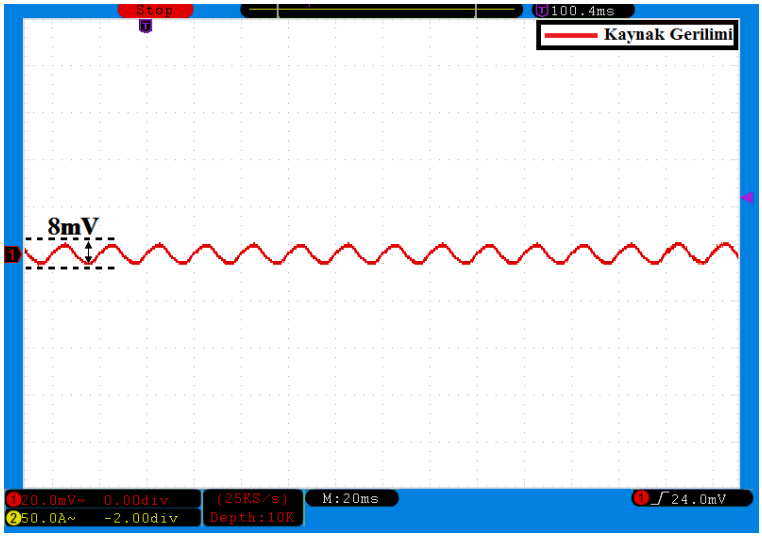
```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <TimerOne.h>
// ----------------------------------------------------------------
LiquidCrystal lcd(12,11,5,4,3,2);
int blue= 8;
int green= 6;
int sensor_pin= A0;
int variable;
volatile boolean onOrOff;
```

```
int timerInterruptLed;
volatile unsigned long functionCounter = 0;
unsigned int motherLoopCounter = 0;
// ----------------------------------------------------------------
void setup() {
Serial.begin(9600);
lcd.begin(16,2);
pinMode(sensor_pin,INPUT);
pinMode(green, OUTPUT) ;
pinMode(blue, OUTPUT) ;
Timer1.initialize(1000);
Timer1.attachInterrupt(function);
Serial.println("LABEL,Time,Field");
delay(0);
                    }
// ----------------------------------------------------------------
void loop() {
motherLoopCounter = functionCounter;
lcd.setCursor(0,1);
variable = analogRead(sensor_pin);
lcd.print(analogRead(sensor_pin));
Serial.print("Field: ");
Serial.println(variable);
Serial.println( (String) "DATA," + (functionCounter) + "," + (variable) );
delay(0);
if(variable <= 518 || 522 <= variable  )
                    {
                                        lcd.setCursor(0,0);
                    if(variable <= 518)
                                        {
lcd.print("Magnetic Field(-)");
                                        }
                    if(522 <= variable)
                                        {
```

```
                lcd.print("Magnetic Field(+)");
                                }
                                        digitalWrite (blue, LOW);
                                        digitalWrite (green, HIGH);
                 }
                else
                        {
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Mag.Field Det...");
digitalWrite (green, LOW);
digitalWrite (blue, HIGH);
                        }
                }
// ---------------------------------------------------------------------
void function(){
                    digitalWrite(timerInterruptLed,onOrOff);
                    functionCounter ++;
                }
```

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde DCR, IDCR ve PDCR cihazlarının deneysel kurulumundan elde edilen elektriksel ve manyetik sonuçlardan bahsedilmiştir. Şekil 4.1, elektrik devresine bağlı voltaj kaynağının rms değeri 26.5V ve frekansı 50Hz'dir. Bu voltaj, DC elektronik yükünü koruma cihazı ile veya koruma cihazı olmadan iki durumda besler. Ayrıca, bir dereceye kadar harmonik bozulma vardır.

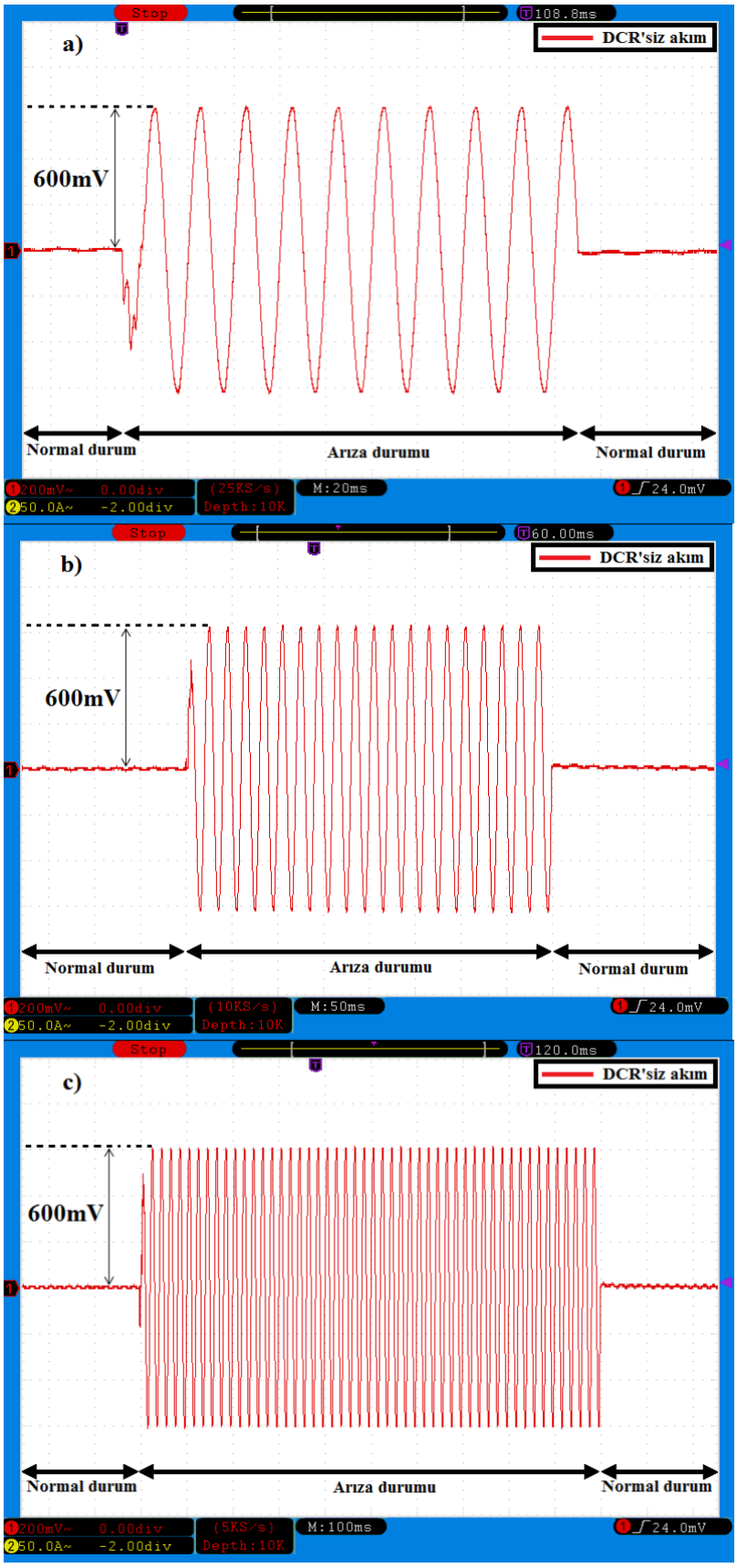


Şekil 4.1. Normal şartlarda kaynak gerilimi, zaman çarpanı 20ms/div, voltaj çarpanı 20mV/div.

Arıza durumunda hat akımını analiz etmek için, elektrik hattına uygulanacak 0,2s, 0,4s ve 1s'lik farklı sürelerde üç tip arıza akımı vardır.

4.1. DCR'siz Arıza Akımının Deneysel Elektrik Analizi

DCR akım koruyucu bağlanmadan, arıza altındaki hat akımının elektriksel analizi Şekil 4.2'de verildi ve üzerlerinde bir dereceye kadar harmonik bozulma görüldü. 0,2s, 0,4s ve 1s'lik farklı sürelerde üç tip arıza akımı oluşturularak devreye uygulandı ve devre çıkışında elde edilen sinyaller Şekil 4.2'de verildi. Değişikliklerin net olarak görülebilmesi için voltaj çarpanı tüm grafiklerde 200mV/bölme olarak aynı verilirken, zaman çarpanları a) 20ms/bölme b) 50ms/bölme ve c) 100ms/bölme olarak kaydedildi. Bu analiz, arıza durumlarında hat devresinin akımının maksimum tepesi 0.51A değerine ulaştığını göstermiştir.

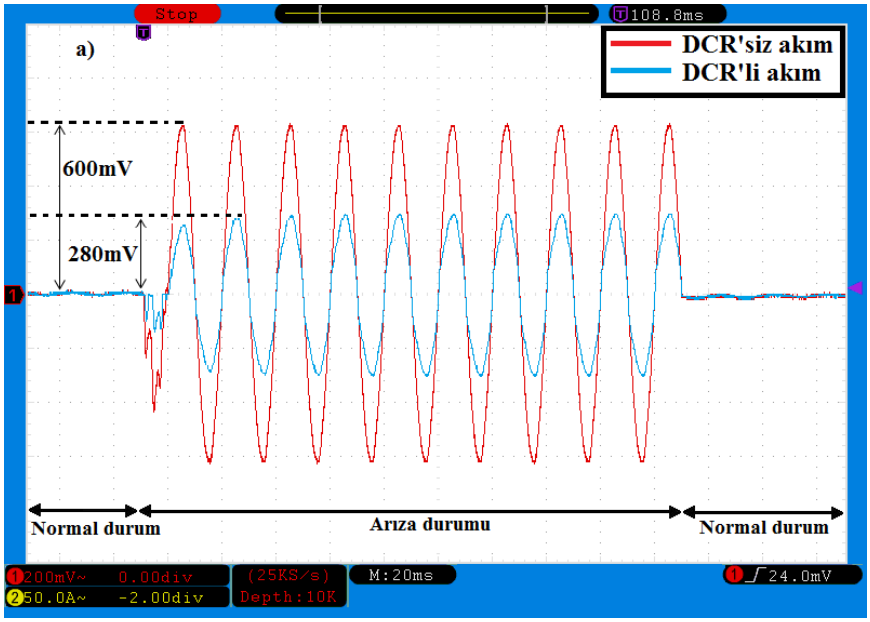


Şekil 4.2. Arıza akım sırasında DCR'siz hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

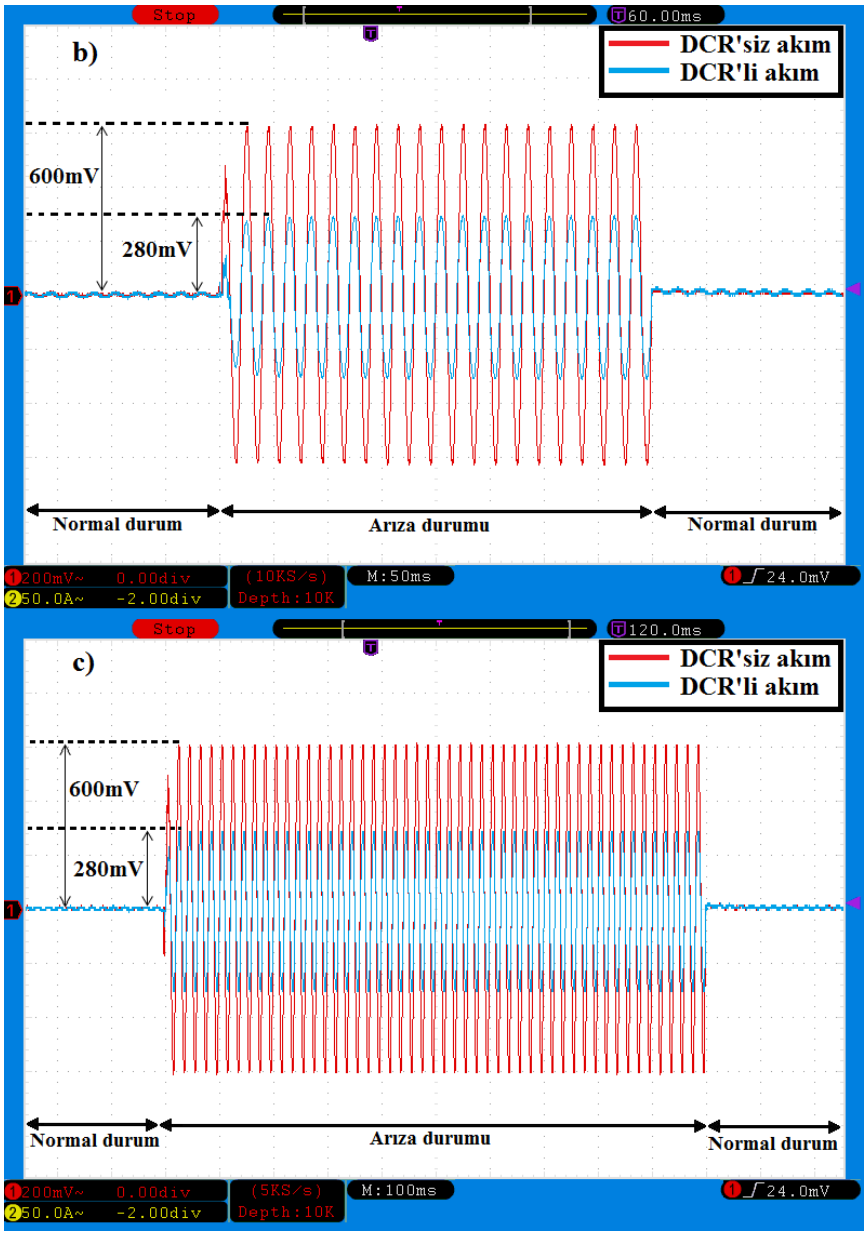
4.2. DCR'li Arıza Akımının Deneysel Analizi

4.2.1. Deneysel elektrik analizi

DCR akım koruyucu bağlandıktan sonra, arıza altındaki hat akımının elektriksel analizi Şekil 4.3'de verildi ve üzerlerinde bir dereceye kadar harmonik bozulma görüldü. 0,2s, 0,4s ve 1s'lik farklı sürelerde üç tip arıza akımı oluşturularak devreye uygulandı ve devre çıkışında elde edilen sinyaller Şekil 4.3'de verildi. Değişikliklerin net olarak görülebilmesi için voltaj çarpanı tüm grafiklerde 200mV/bölme olarak aynı verilirken, zaman çarpanları a) 20ms/bölme b) 50ms/bölme ve c) 100ms/bölme olarak kaydedildi. Bu analiz, koruma cihazı olarak önerilen DCR bağlantısının, arıza durumlarında hat akımını maksimum tepesi 0,24A değerine düşürdüğünü göstermiştir. Bu sonuç hat akımında %53'lük bir azalma olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3. Arıza akımı sırasında DCR'siz ve DCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

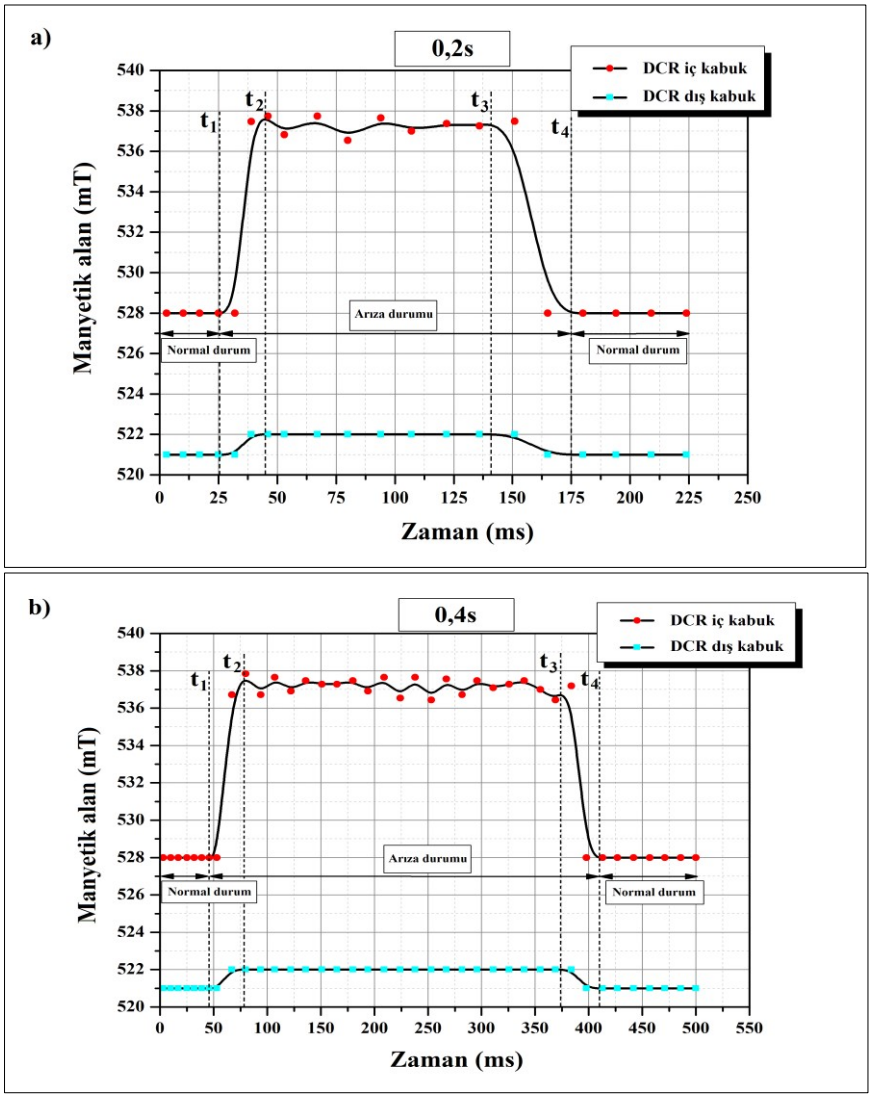


Şekil 4.3. Devamı arıza akımı sırasında DCR'siz ve DCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

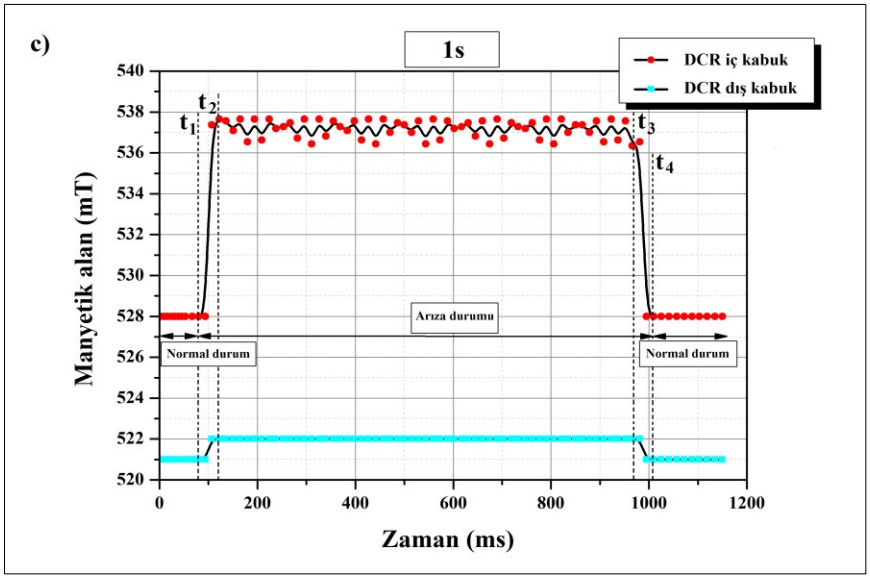
4.2.2. Deneysel manyetik alan analizi

Bu bölümde, DCR ferromanyetik çekirdeğinin manyetik alan ölçümü, bu tez kapsamında tasarlanmış ve yapılmış olan detayları 3.6 da verilen manyetik alan algılama sistemi kullanılarak yapıldı. Ölçüm sonuçları Şekil 4.4'de verildi. Şekil 4.4'e göre, DCR çekirdeğinin $t < t_1$ ve $t > t_4$'de normal durumda herhangi bir manyetik alan değişikliği yoktur, ancak $t_1 \le t \le t_4$'teki arıza durumunda, DCR çekirdeğinin iç ve dış kabuğunun manyetik alan değerleri $t_1 \le t < t_2$ ve $t_3 \le t < t_4$'de yaklaşık 9mT ve 1mT olarak

ölçülmüştür. Çekirdek manyetik alanın maksimum değeri $t_2 \le t \le t_3$'dır. Dolayısıyla, iç kabuğun manyetik endüktans varyasyonunun dış kabuktan 9 kat daha büyük olduğu anlamına gelir, bu nedenle DCR'nin deneysel manyetik alanı Şekil 2.10'daki simülasyon sonucunu doğrular. Elektrik devresinin normal durumunda, iç kabuğun ve dış kabuğun temel manyetik alan değeri farklıdır; dış kabuk değeri 521mT ve iç kabuk değeri Şekil 4.4'te gösterildiği gibi 528mT'dir. Bu farklar, elektrik devresinin AÇIK modunda DCR bobininden geçen DC akımından kaynaklanmaktadır.



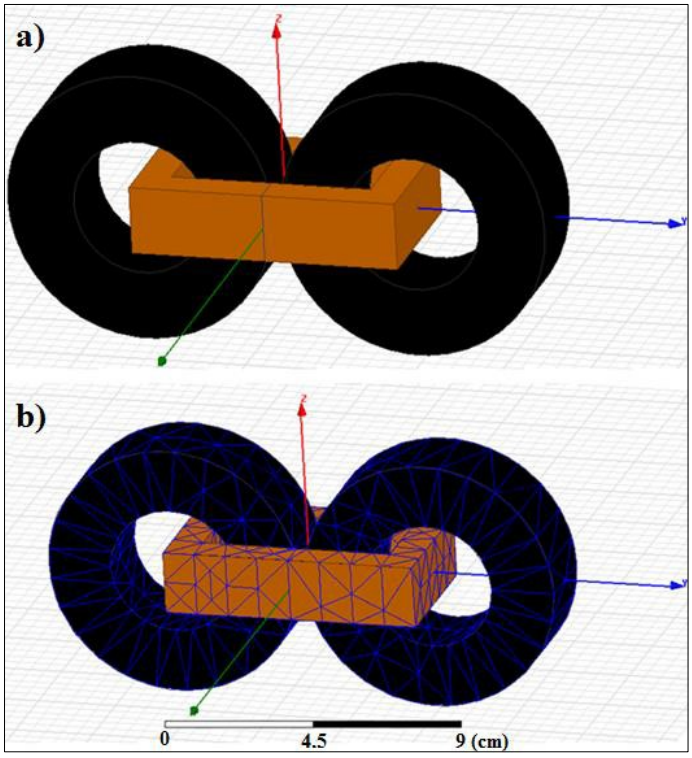
Şekil 4.4. DCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.



Şekil 4.4. Devamı DCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

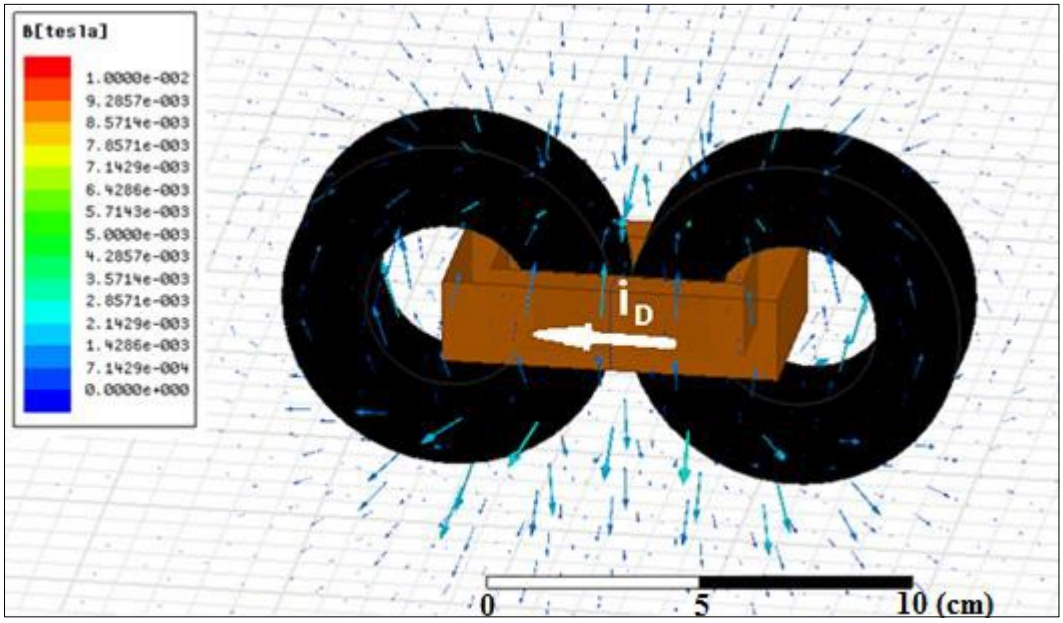
4.2.3. Simülasyon manyetik analizi

DCR çekirdeğinin 3D tasarımı ve MESH Analizleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



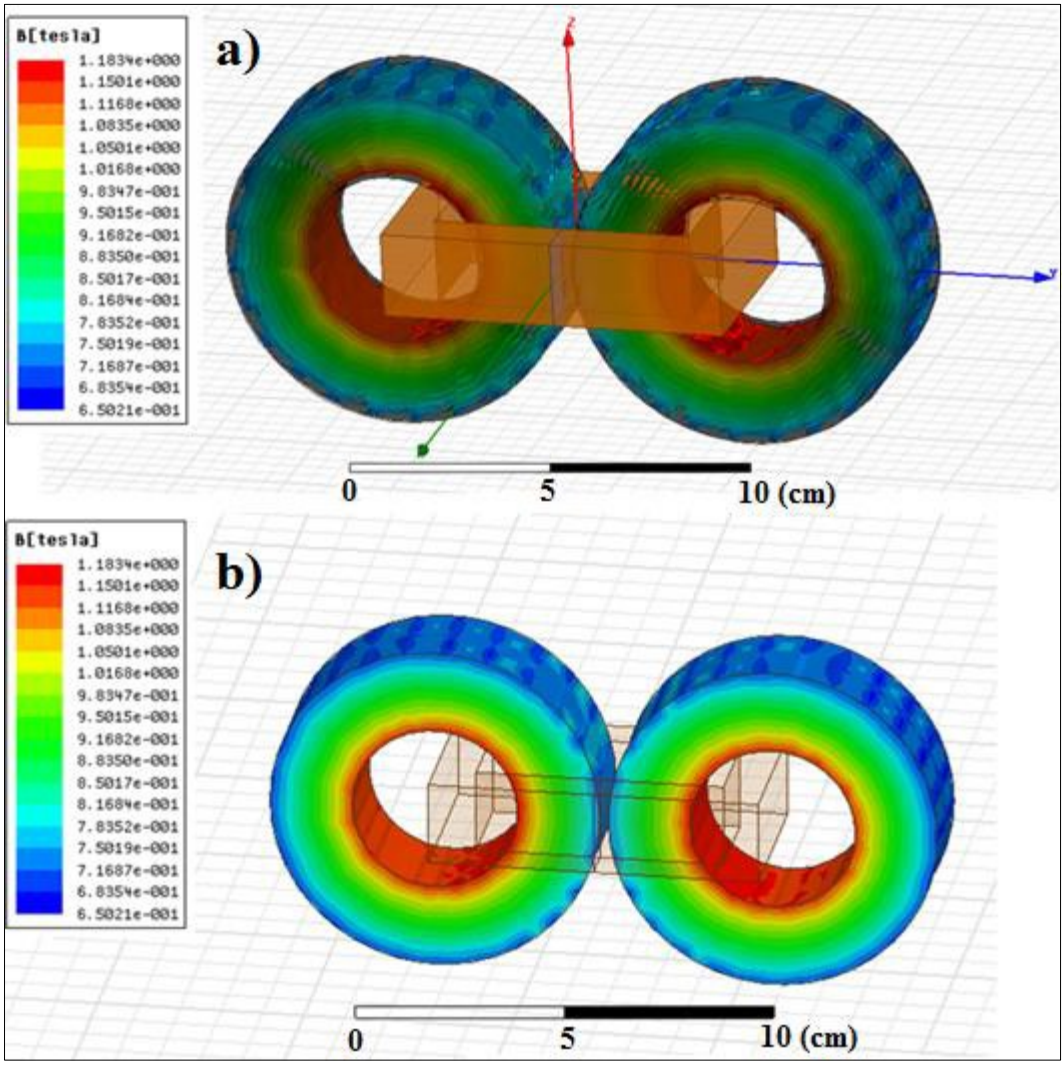
Şekil 4.5. DCR çekirdeği, (a) 3D tasarım ve (b) MESH Analizi.

DCR'den manyetik alan vektörleri ve DCR çekirdeğindeki manyetik alan yoğunluğu dağılımı, Şekil 4.6 ve 4.7'de gösterildiği gibi sistemin arıza durumundaki aşırı akım oluşumu nedeniyle değişmektedir. DCR çekirdeğinin DC akımının yönü, manyetik alan vektörlerinin yönünü gösterir; bu nedenle, Şekil 4.6'daki bobinin akım (i_D) yönü saat yönündedir, bu nedenle DCR çekirdek manyetik vektörlerinin yönünü gözlemlemek mümkündür. Şekil 4.6'da manyetik vektörlerin uzunlukları ve renkleri o alandaki manyetik alanın büyüklüğünü ve yoğunluğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. DCR'nin dışında manyetik alan vektörleri.

Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, halkaların iç kabuğundaki manyetik alanın yoğunluk dağılımı, dış kabuklardan çok daha büyüktür. Manyetik alan değerinin halkaların dış kabuklarından çekirdek içlerine doğru arttığı anlamına gelir. DCR çekirdeklerinin iç yüzeyinde manyetik alanın yoğunluk dağılımının büyüklükleri birbiriyle aynıdır.



Şekil 4.7. DCR çekirdeğinin manyetik alan yoğunluğu dağılımı, (a) çekirdeğin içinde ve (b) çekirdeğin yüzeyinde.

4.2.4. Cevap ve geridönüş süresi hesaplaması

Şekil 4.4'e göre, DCR çekirdeğinin manyetik alan indüksiyonunun cevap ve geridönüş süresi, denklem 2.31 ve 2.32 ile hesaplandı ve sonuçlar Tablo 4.1'de verildi.

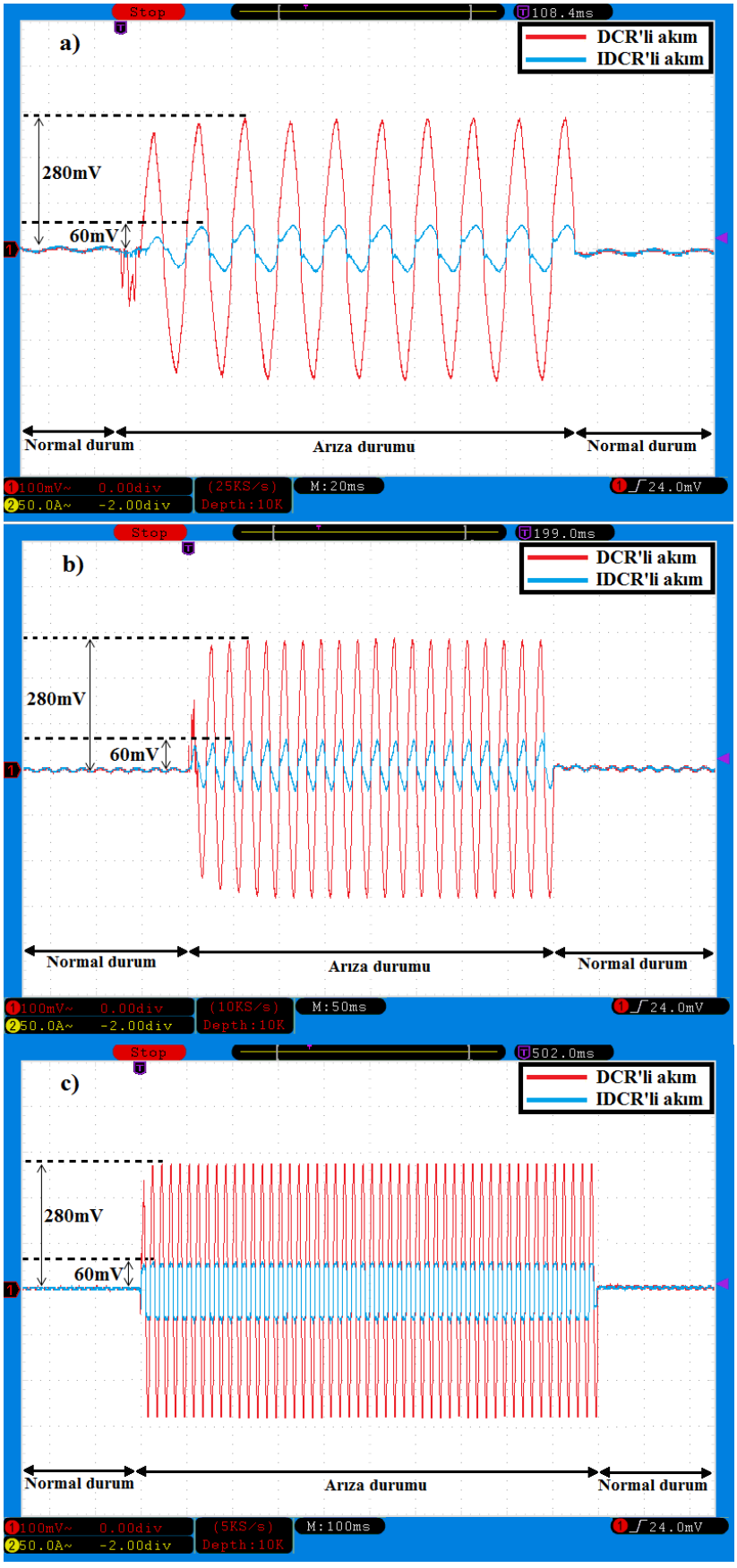
Çizelge 4.1. DCR'nin cevap ve geridönüş süresi.

	Arıza Süresi (s)	Çekirdek kabuğu	Cevap Süresi (ms)	Geridönüş Süresi (ms)
DCR	0,2	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4
	0,4	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4
	1	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4

4.3. IDCR'li Arıza Akımının Deneysel Analizi

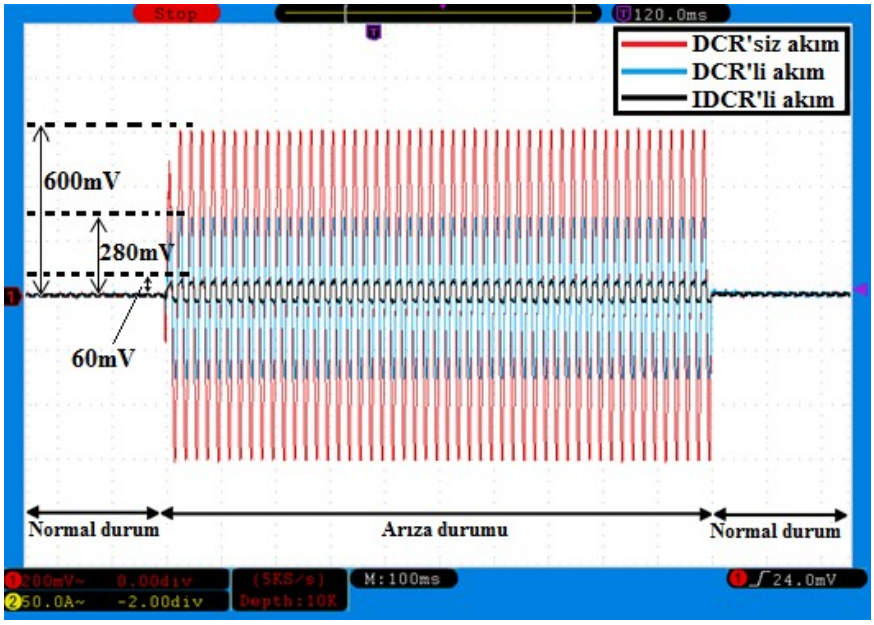
4.3.1. Deneysel elektrik analizi

Geliştirlmiş DCR akım koruyucu bağlandıktan sonra, arıza altındaki hat akımının elektriksel analizi Şekil 4.3'de verildi ve üzerlerinde bir dereceye kadar harmonik bozulma görüldü. 0,2s, 0,4s ve 1s'lik farklı sürelerde üç tip arıza akımı oluşturularak devreye uygulandı ve devre çıkışında elde edilen sinyaller Şekil 4.3'de verildi. Değişikliklerin net olarak görülebilmesi için voltaj çarpanı tüm grafiklerde 200mV/bölme olarak aynı verilirken, zaman çarpanları a) 20ms/bölme b) 50 ms/bölme ve c) 100 ms/bölme olarak kaydedildi. Bu analiz, koruma cihazı olarak hatta önerilen IDCR bağlantısının, arıza durumlarnda hat akımını maksimum tepesi 0,05A değerine düşürdüğünü göstermiştir. Bu sonuç hat akımında %90'lık bir azalma olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8. Arıza akımı sırasında DCR'li ve IDCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

Şekil 4.9'da gösterildiği gibi, DCR ve IDCR olan ve olmayan elektrik devresinin 1s arıza akımındaki hat akımı ile karşılaştırılmıştır. DCR'siz, DCR'li ve IDCR'li arıza durumunda hat akımı tepe değerleri 0,51A, 0,24A ve 0,05A'dır.



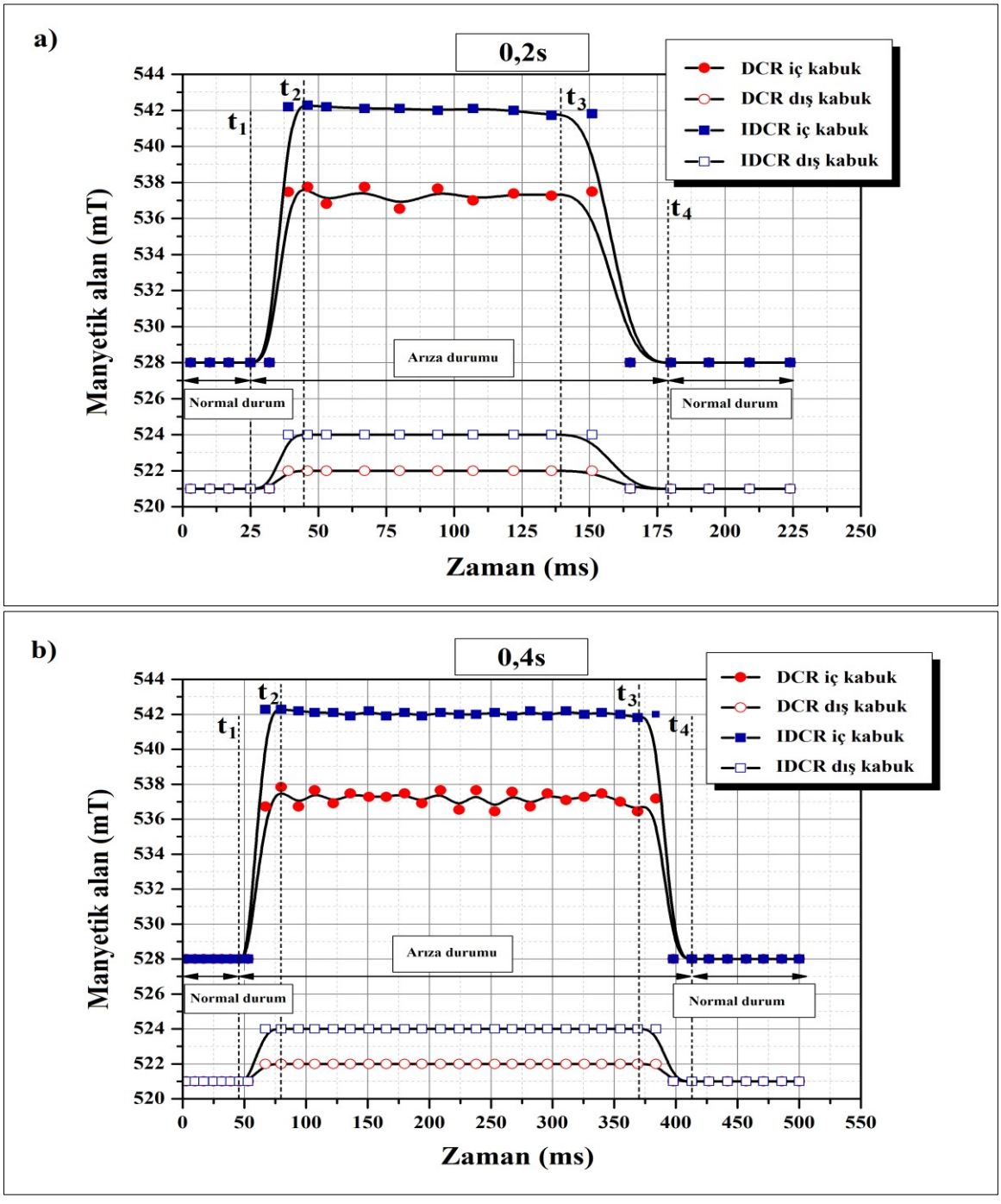
Şekil 4.9. Arıza akımı sırasında DCR'siz, DCR'li ve IDCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

4.3.2. Deneysel manyetik analizi

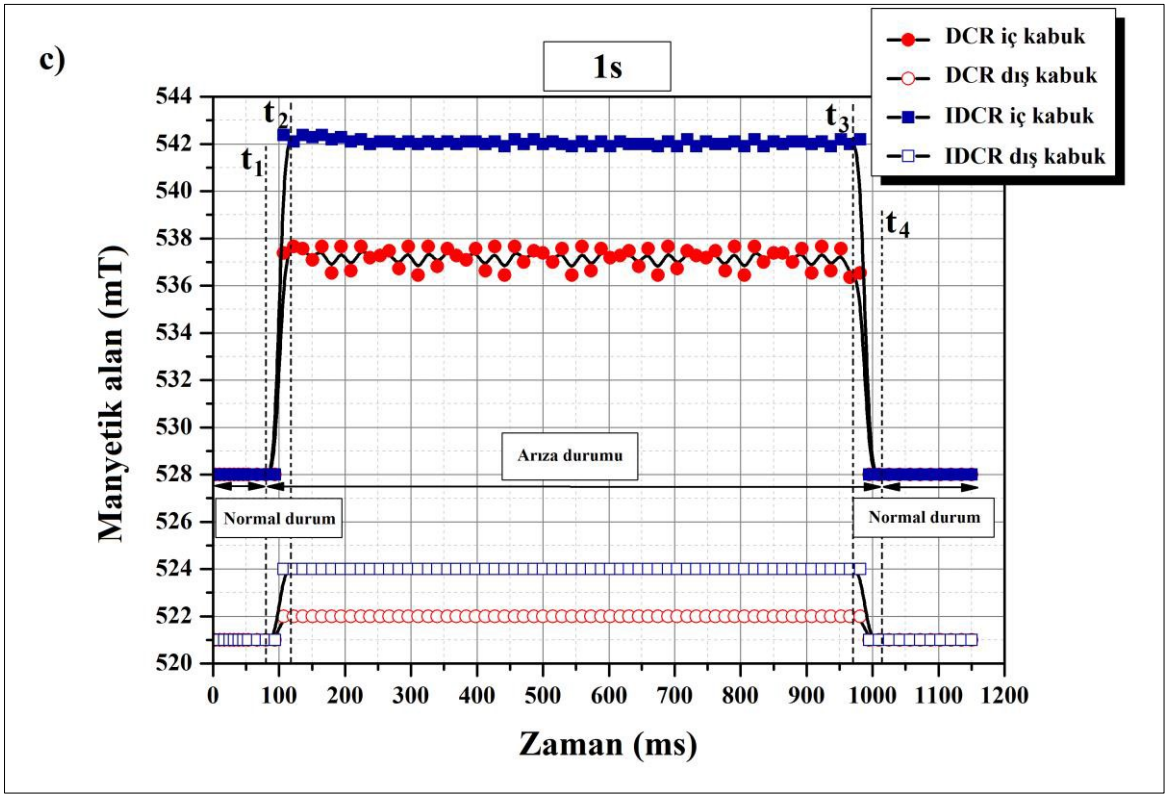
Bu bölümde, IDCR ferromanyetik çekirdeğin manyetik alan ölçümü, manyetik alan algılama sistemi kullanılarak yapılmıştır ve sonuç Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Şekil 4.10'a göre, IDCR çekirdeğinin DCR gibi $t < t_1$ ve $t > t_4$'da normal durumda herhangi bir manyetik alan değişikliği yoktur, ancak $t_1 \le t \le t_4$'teki arıza durumunda, IDCR çekirdeğinin iç ve dış kabuğunun manyetik alan değerleri $t_1 \le t < t_2$ ve $t_3 \le t < t_4$ 'de yaklaşık 14mT ve 3mT olarak ölçüldü. Çekirdek manyetik alanın maksimum değeri $t_2 \le t \le t_3$'dur. IDCR iç kabuğunun manyetik endüktans değişimi, dış kabuğa göre 4,6 kat daha büyüktür. Böylece, DCR ve IDCR'nin manyetik alan değerleri birbirleriyle karşılaştırıldığında, IDCR'nin manyetik alan değerinin, bobin sargılarının sayısının artması nedeniyle arttığı gözlendi. IDCR'nin dış ve iç kabuklarındaki manyetik alan değişimi, DCR'den 3 ve 1,5 kat daha fazladır. Elektrik devresinin normal durumunda, DCR ve IDCR'nin iç kabuğunun ve dış kabuğunun temel manyetik alan değeri birbiriyle aynıdır;

Normal durumda IDCR ve DCR'nin dış kabuk değeri 521mT ve iç kabuk değeri Şekil 4.10'da gösterildiği gibi 528mT'dir.



Şekil 4.10. DCR ve IDCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) saniyelik arıza akımında.



Şekil 4.10. Devamı DCR ve IDCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

4.3.3. Simülasyon manyetik analizi

IDCR çekirdeğinden ve IDCR çekirdeğindeki manyetik alan yoğunluğunun tüm manyetik alan vektörlerinin 3D simülasyonları, Bölüm 4.2.3'te incelenen DCR ile aynıdır; ancak IDCR çekirdek yapısındaki bobin sarma sayısının artması nedeniyle, değerleri DCR çekirdeğinden daha fazladır.

4.3.4. Cevap ve geridönüş süresi hesaplaması

Şekil 4.10'a göre IDCR çekirdeğinin manyetik alan indüksiyonunun cevap ve geridönüş süresi, Denklem 2.31 ve 2.32 ile hesaplandı ve Tablo 4.2'de verildi.

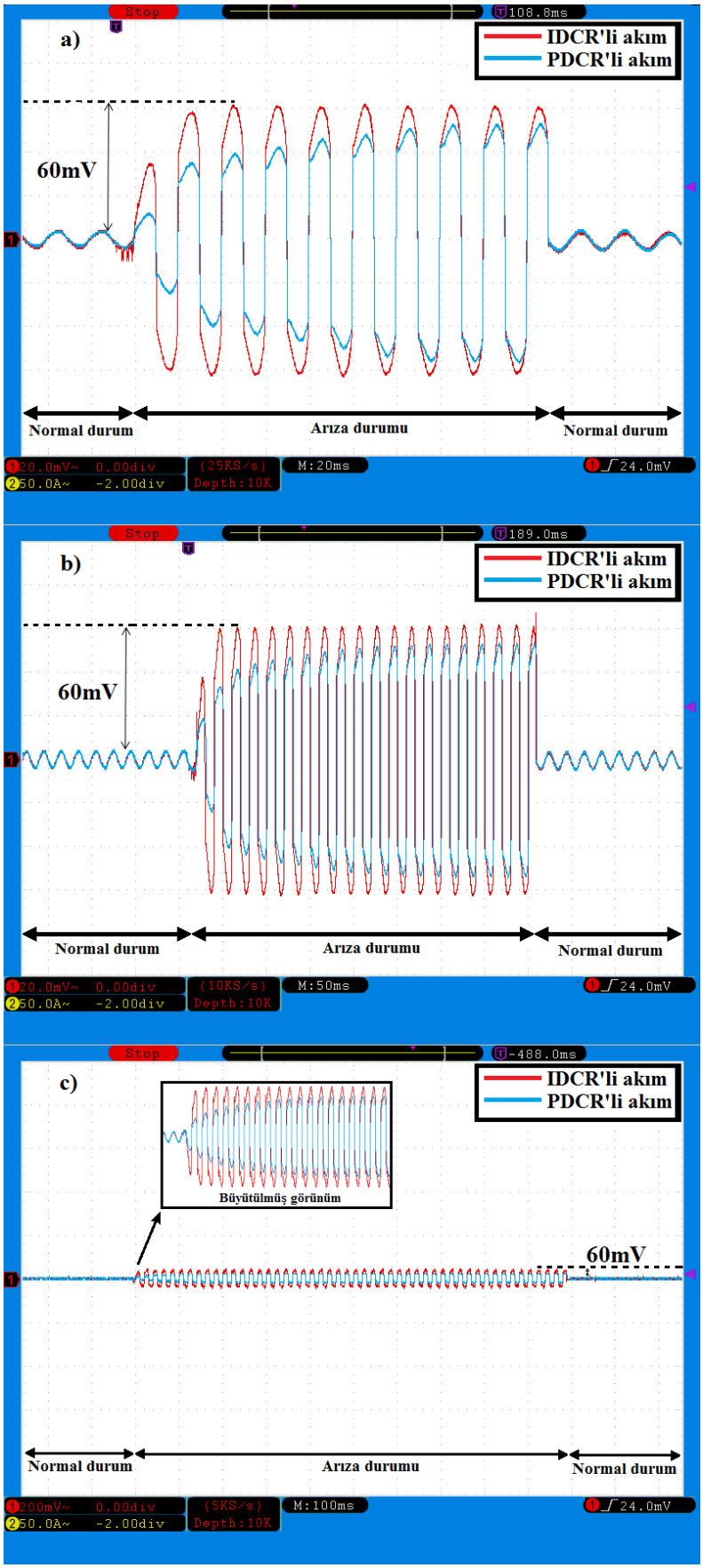
Çizelge 4.2. IDCR'nin cevap ve geridönüş süresi.

	Arıza Süresi (s)	Çekirdek kabuğu	Cevap Süresi (ms)	Geridönüş Süresi (ms)
IDCR	0,2	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4
	0,4	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4
	1	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4

4.4. PDCR'li Arıza Akımının Deneysel Analizi

4.4.1. Deneysel elektrik analizi

Geliştirlmiş PDCR akım koruyucu bağlandıktan sonra, arıza altındaki hat akımının elektriksel analizi Şekil 4.11'de verildi ve üzerlerinde bir dereceye kadar harmonik bozulma görüldü. 0,2s, 0,4s ve 1s'lik farklı sürelerde üç tip arıza akımı oluşturularak devreye uygulandı ve devre çıkışında elde edilen sinyaller Şekil 4.3'de verildi. Değişikliklerin net olarak görülebilmesi için voltaj çarpanı tüm grafiklerde 200mV/bölme olarak aynı verilirken, zaman çarpanları a) 20 ms/bölme b) 50 ms/bölme ve c) 100ms/bölme olarak kaydedildi. Bu analiz, koruma cihazı olarak hatta önerilen PDCR bağlantısının arıza durumlarında hat akımını maksimum tepesi 0,04A değerine düşürdüğünü göstermiştir. Bu sonuç hat akımında %92'lik bir azalma olduğunu göstermektedir. Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, çekirdek yapıya kalıcı mıknatısların eklenmesinin, arıza akım değerinin ani artışını sınırladığı ve süresini arttırdığı görülebilir. Arıza akımının ani artış süresini arttırarak, arıza akımının darbe gücü elektrik sistemine verilen hasar miktarını azaltmış ve en aza indirmiştir.



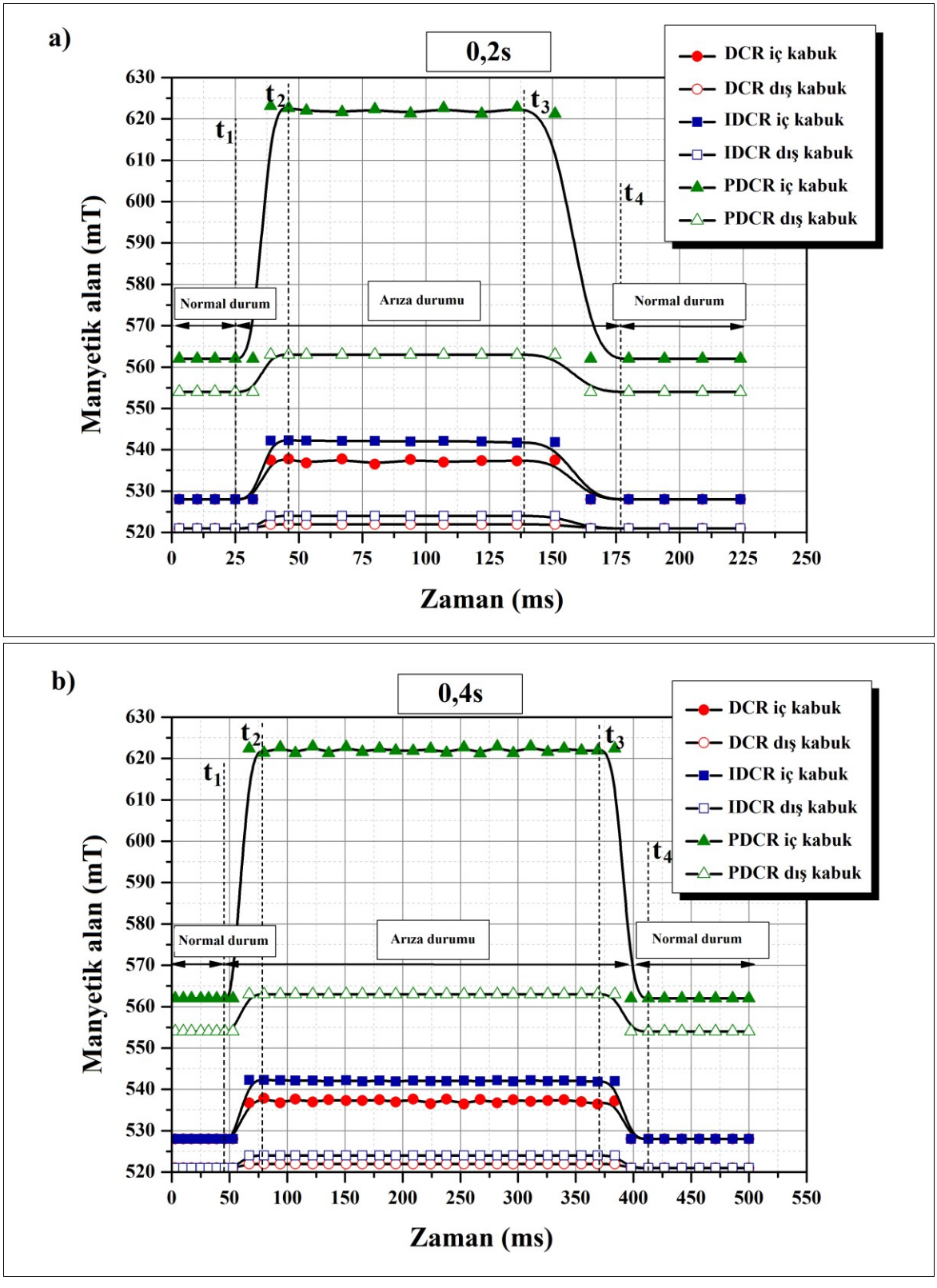
Şekil 4.11. Arıza akım sırasında IDCR ve PDCR'li hat akımı, (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

4.4.2. Deneysel manyetik analizi

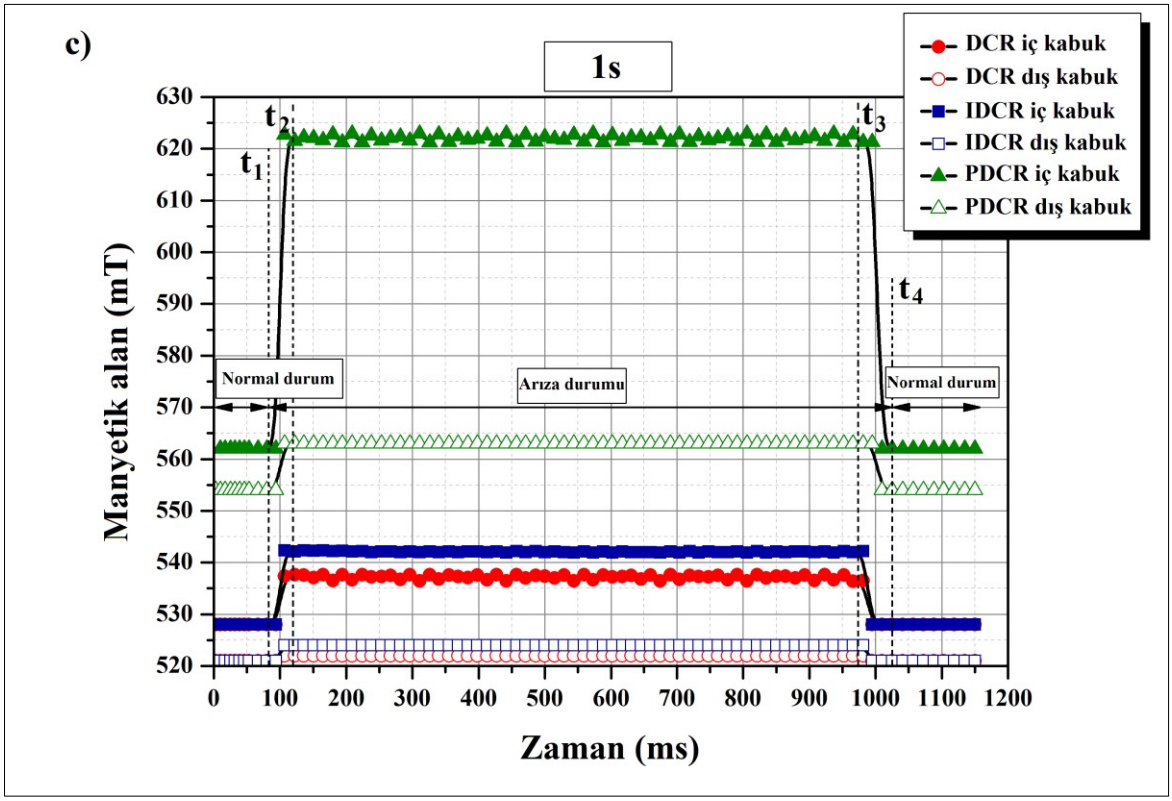
Bu bölümde, IDCR ferromanyetik çekirdeğin manyetik alan ölçümü manyetik alan algılama sistemi kullanılarak yapılmıştır ve sonuç Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Şekil 4.12'ye göre, PDCR çekirdeğinin DCR ve IDCR gibi $t < t_1$ ve $t > t_4$'da normal durumda herhangi bir manyetik alan değişikliği yoktur, ancak $t_1 \le t \le t_4$'daki arıza durumunda, PDCR çekirdeğinin iç ve dış kabuğunun manyetik alan varyasyon değerleri $t_1 \le t < t_2$ ve $t_3 \le t < t_4$'de yaklaşık 60mT ve 9mT olarak ölçüldü. Çekirdek manyetik alanın maksimum değeri $t_2 \le t \le t_3$'dir. PDCR iç kabuğunun manyetik endüktans değişimi, dış kabuğa göre 6,7 kat daha büyüktür. Bu nedenle, DCR ve PDCR'nin manyetik alan değerlerini birbirleriyle karşılaştırarak, ferromanyetik çekirdek yapısına kalıcı mıknatıslar eklenmesi nedeniyle PDCR'nin endüktans değerinin arttığı gözlenmektedir. PDCR'nin dış ve iç kabuklarındaki endüktans değişimi, IDCR'den 4,3 ve 3 kat, DCR'den 6,7 ve 9 kat daha büyüktür.

Elektrik devresinin normal durumunda, PDCR'nin iç kabuğunun ve dış kabuğunun temel manyetik alan değeri DCR ve IDCR'den farklıdır; PDCR'nin normal durumdaki dış kabuk değeri 554mT ve iç kabuk değeri 562mT ve DCR ve IDCR'nin dış kabuk değeri 521mT ve iç kabuk değeri 528mT'dir. Bu farklılıklar, prototipin ferromanyetik çekirdek yapısına eklenen kalıcı mıknatıslardan kaynaklanmaktadır. Kalıcı mıknatısın manyetik alanı bobinin ürettiğinden çok daha büyüktür.



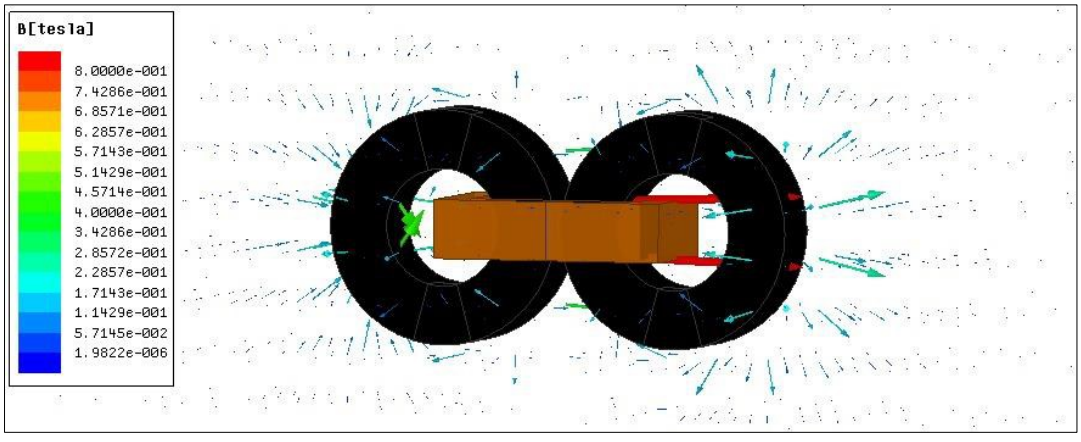
Şekil 4.12. DCR, IDCR ve PDCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.



Şekil 4.12. Devamı DCR, IDCR ve PDCR çekirdeğinin dış ve iç kabuklarının normal ve arıza akım modlarında manyetik alan değişikliği. (a) 0,2 saniyelik, (b) 0,4 saniyelik ve (c) 1 saniyelik arıza akımında.

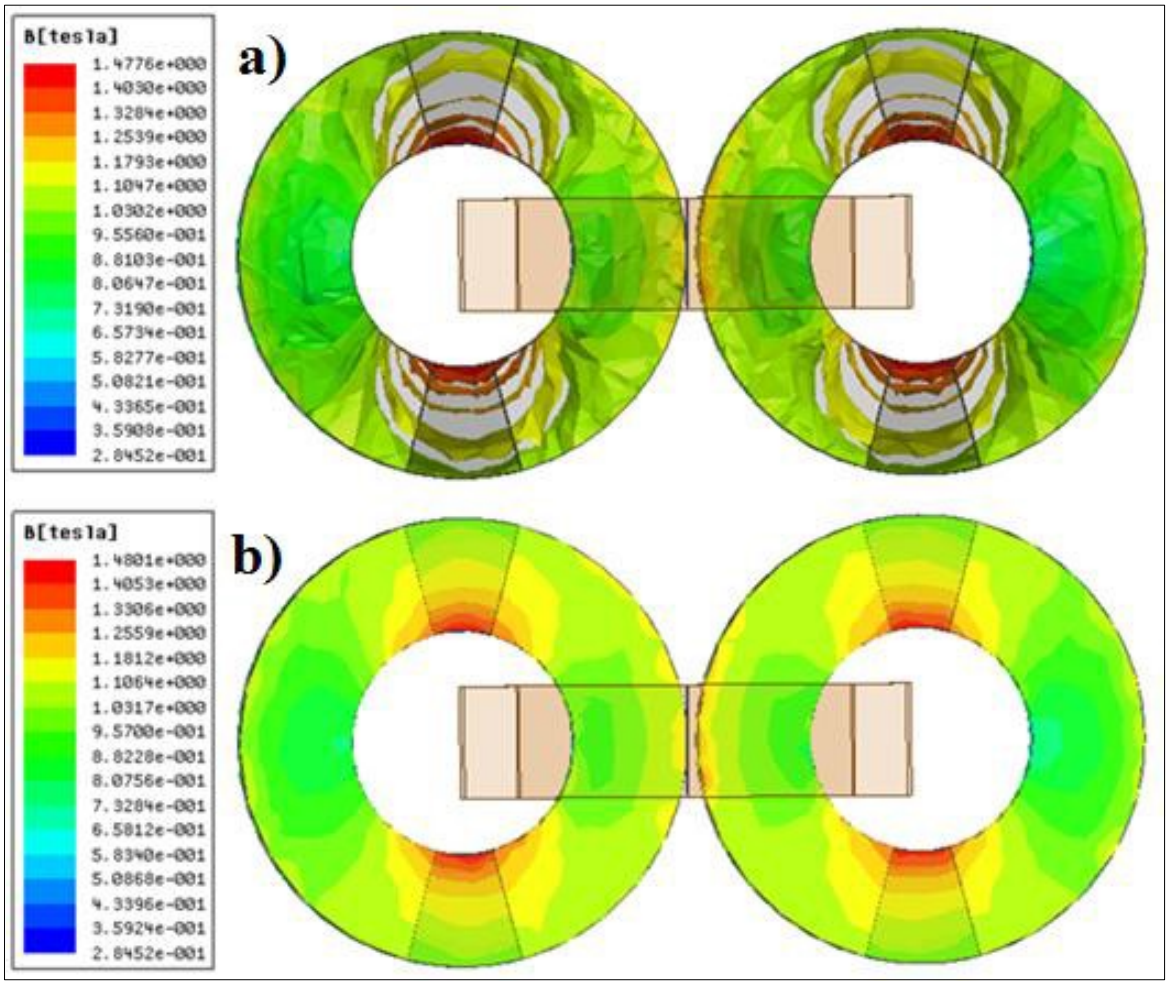
4.4.3. Simülasyon manyetik analizi

PDCR çekirdeğinin dışındaki manyetik alan vektörleri ve PDCR çekirdeğindeki manyetik alan yoğunluğu dağılımı, Şekil 4.13 ve 4.14'te gösterildiği gibi sistemin arıza durumundaki aşırı akım oluşumu nedeniyle değişimektedir.



Şekil 4.13. PDCR çekirdeği dışındaki manyetik alan vektörleri.

Şekil 4.14'te gösterildiği gibi, çekirdeklerin derinliğindeki manyetik alanın yoğunluk dağılımı çekirdeklerin yüzeyinden biraz daha azdır. Genel olarak, manyetik dağılım değerinin çekirdekten halkanın dış kabuğuna doğru arttığı anlamına gelir.



Şekil 4.14. PDCR çekirdeğinin manyetik alan yoğunluğu dağılımı, (a) çekirdeğin içinde ve (b) çekirdeğin yüzeyinde.

4.4.4. Cevap ve geridönüş süresi hesaplaması

Şekil 4.12'ye göre, PDCR çekirdeğinin manyetik alan indüksiyonunun cevap ve geridönüş süresi, Denklemler 2.31 ve 2.32 ile hesaplandı ve Tablo 4.3'te verildi.

Çizelge 4.3. PDCR'nin cevap ve geridönüş süresi.

	Arıza Süresi (s)	Çekirdek kabuğu	Cevap Süresi (ms)	Geridönüş Süresi (ms)
PDCR	0,2	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4
	0,4	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4
	1	İç	12,6	1,4
		Dış	12,6	1,4

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Özetle, bu yüksek lisans tezinin Bölüm 1 ve 2'de açıklandığı gibi, insan nüfusunun artması ve sanayi ve teknolojilerin ilerlemesi elektrik tüketiminde bir artışa yol açarak elektrik üretim kaynaklarını, iletim hatlarını ve dağıtım ağlarını arttırdı. Şimdi, elektrik talebindeki dramatik artış göz önüne alındığında, tüketicilere ihtiyaç duyulan elektriği üretip teslim etmek için, bu konuda risklerin ve olası sonuçların öngörülmesi ve elektrik dağıtım sistemi için koruyucu teknolojilerin üretilmesi gerekmektedir.

Enerji iletim ve dağıtım hatlarını tehlikeye atabilecek nedenler üç tipte özetlenebilir:

- Doğal tehlikeler
  - Transmission İletim hatlarındaki yıldırım düşmesi (aşırı voltaj),
  - Deprem,
  - Heyelan,
  - Fırtına,
  - Transmission iletim hatlarında kopma ve kısa devreye (aşırı akım) neden olan vb.
- İnsan tehlikeleri
  - Onarım sırasında kısa devre,
  - Hatalı kablolama nedeniyle kısa devre,
  - Vb.
- Endüstriyel tehlikeler
  - Elektrikli ev aletlerinin kısa devresi,
  - Endüstriyel ekipmanın kısa devresi,
  - Vb.

Bahsedilen tehlikeler göz önüne alındığında, bu sebeplerden dolayı meydana gelebilecek arızaları engellemek ve en aza indirmek için, güç kaynağının sürekliliğini sağlamak, hasar ve onarım maliyetlerini en aza indirmek, elektrik tüketicilerinin güvenliğini sağlamak ve tüm sistemi korumak için koruyucu cihazlar gereklidir.

İkinci bölümde detayları verildiği gibi çeşitli koruma yöntemleri geliştirlmiştir. Bu arızaları en aza indirmenin başlıca iki yöntemi vardır:

- Geleneksel yöntem
  - Sigortalar,
  - Devre kesici (Şalter),
  - Vb.
- Yeni yöntem olarak FCL tabanlı koruma sistemleri
  - Süper iletken olmayan FCL (NSFCL),
  - Süperiletken FCL (SFCL),
  - Kalıcı Mıknatıs Bazlı FCL (PFCL),
  - DC-Reaktörü (DCR),
  - Vb.

İlk korunma yönteminde, koruma sistemleri, çok düşük reaksiyon çalışma hızı ve düşük ömürleri nedeniyle parçaların değiştirilmesi gibi önemli dezavantajlara sahiptir. İkinci koruma yönteminde, süperiletken malzemelerin üretimindeki ekonomik ve teknoloji kısıtlamalarından, kapasite sınırlamalarından, düşük verimlilikten ve genel sistem verimliliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkileyen bu tip arıza akım sınırlayıcılarının yüksek voltaj kullanımına ilişkin kısıtlamalardan bahsedilmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, voltaj kalitesini düşürmeden sistemin güvenilirliğini ve verimliliğini artıran yeni bir düşük maliyetli arıza akımı sınırlayıcı tabanlı süper iletken olmayan katı hal dc-reaktör cihaz önerdi. DCR'nin ferromanyetik Fe-Si çekirdeğinin manyetik ve elektriksel davranışları ve verimliliğini, bobin sargılarının sayısını artırarak (IDCR) ve Neodimyum kalıcı mıknatıslar eklenerek (PDCR), iki adımda çeşitli laboratuvar arıza uygulayarak, sınırlama yeteneği ve elektrik devresinin arıza koşullarında güvenilirliği araştırıldı. DCR, IDCR ve PDCR tasarlandı ve analitik yöntemi doğrulamak için deneysel prototipler üretildi. Bu çalışma dört ana aşamadan oluşmaktadır.

<u>İlkaşama</u>

İlk aşamada, voltaj kaynağı, sabit ve değişken dirençli basit bir elektrik devresi inşa edildi. Değişken yük ve gerilim kaynağı, gerçek tüketici ve elektrik üretim kaynağı, elektrik kablolarda, dağıtım ağlarını simüle ettiği gerçek bir kentsel elektrik şebekeyi simüle etmektedir. Gerçek arıza simülasyonu üretmek için bir arıza akım üretim sistemi tasarlandıktan ve yapıldıktan sonra, elektrik devresine bağlandı. Elektrik devresine farklı

sürelerde 0,2, 0,4 ve 1 saniyelik üç tip arıza akımı uygulanmış ve sonuçlar osiloskop ile kaydedilmiştir.

İkinciaşama

İkinci aşamada, önerilen DCR'yi aynı elektrik devresine bağlayarak, aynı arıza akımları uygulandı ve sonuçlar kaydedildi. DCR çekirdeğinin manyetik alan değişikliklerini kaydetmek ve araştırmak için, bir manyetik alan ölçüm sistemine ihtiyaç vardı. Bu nedenle, tasarlandıktan ve yapıldıktan sonra, DCR çekirdeğinin manyetik alan değişikliklerini arızada ve elektrik devresinin normal durumunda kaydetmek için kullanıldı. Ardından DCR çekirdeğinin 3D manyetik analizi ANSYS MAXWELL yazılımı tarafından gerçekleştirildi.

Deneysel test kurulum sonuçları simülasyon sonuçlarını doğruladı ve elektrik devresinin arıza koşullarında hat akımında% 53'lük bir azalma olduğunu gösterdi. Bu nedenle, bir arıza akımı sınırlayıcı cihaz olarak DCR'nin elektrik devresinin arıza akımını sınırlama ve azaltmada önemli bir rol oynadığı kanıtlandı.

Üçüncüaşama

Üçüncü aşamada, Geliştirilmiş DC-Reaktör (IDCR) adı verilen bobin sargılarının sayısı arttırılarak DCR'nin çekirdeği iyileştirildi. IDCR'nin aynı devreye bağlanmasıyla, elektriksel sonuçlar ve manyetik alan değişiklikleri aynı prensip ile kaydedildi. IDCR çekirdeğinden manyetik alan vektörlerinin tüm 3D simülasyonlarının ve IDCR çekirdeğindeki manyetik yoğunluğu dağılımının DCR ile aynı olduğuna dikkat edilmelidir; ancak IDCR çekirdek yapısındaki bobin sarma sayısındaki artış nedeniyle, değerleri DCR çekirdeğinden fazladır.

Deneysel test kurulum sonuçları, elektrik devresinin arıza durumu altında hat akımında% 90'lık bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, DCR'nin bobin sargılarının sayısının arttırılmasının çekirdek indüksiyon değerinde bir artışa neden olduğu ve elektrik devresinin arıza akımını sınırlama ve azaltmada önemli bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Dördüncüaşama

Dördüncü aşamada, IDCR çekirdeği, ferromanyetik çekirdek yapısında Neodimyum mıknatıslar kullanılarak geliştirildi ve kalıcı mıknatıslı DC Reaktörü (PDCR) olarak adlandırıldı. PDCR'nin aynı devreye bağlanmasıyla, elektriksel sonuçlar ve manyetik alan değişiklikleri aynı prensip ile kaydedilmiş ve bölüm 4.4.3'te incelenen çekirdeğin 3D manyetik analizi de gerçekleştirildi.

PDCR'nin deneysel test kurulum sonuçları, elektrik devresinin arıza koşulu altında hat akımında % 92'lik bir azalma gerçekleştirildiği göstermektedir. Böylece, çekirdek yapıya kalıcı mıknatısların eklenmesinin, elektrik sistemin arıza akım değerinin ani artışını sınırladığı ayrıca arıza akımının darbe gücünde azalmaya ve arıza hasarının en aza indirilmesine neden olduğu kanıtlandı.

KAYNAKLAR

1. Heidary, A., Radmanesh, H., Ghorbanyan, K. and Moradkhani, A. M. (2019). Design and Construction of a Single-Phase Reactor and Its Installation in a Power Grid to Counteract Rapid Fluctuations in Line Current and Current Variation. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 2(2).

2. Ochoa, L. F. and Harrison, G. P. (2011). Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation. *IEEE Transactions Power Systems*, 26(1), 198-205.

3. Akorede, M. F., Hizam, H., Aris, I. and AbKadir, M. Z. A. (2011). Effective Method for Optimal Allocation of Distributed Generation Units in Meshed Electric Power Systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(2), 276-87.

4. Nourmohamadi, H., Nazari-Heris, M., Sabahi, M. and Abapour, M. (2018). A Novel Structure for Bridge-Type Fault Current Limiter: Capacitor-Based Nonsuperconducting FCL. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(4).

5. Yuan, J., Lei, Y., Wei, L., Tian, C., Chen, B. and Du, Z. (2015). A Novel Bridge-Type Hybrid Saturated-Core Fault Current Limiter Based on Permanent Magnets. *IEEE Transactions Magnetics*, 51(11), 8401904.

6. Naderi, S. B., Jafari, M. and Hagh, M. T. (2014). Controllable Resistive Type Fault Current Limiter (CR-FCL) with Frequency and Pulse Duty-Cycle. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 11-19.

7. Javadi, H., Mousavi, S. A. and Khederzadeh, M. (2013). A Novel Approach to Increase FCL Application in Preservation of Over-current Relays Coordination in Presence of Asynchronous DGs. *International Journal Electrical Power Energy Systems*, 44, 810-815.

8. Abramovitz, A. and Smedley, K. M. (2012). Survey of Solid-State Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(6).

9. Olsen, T. W. (2003). Anatomy of a Short Circuit. *Siemens Power Transmission and Distribution, Inc., TechTopics*, 44(1).

10. Haghl, M. T. and Abapour, M. (2006). *A New Topology of Fault-Current Limiter and Its Control Strategy*. SICE-ICASE International Joint Conference.

11. Bollen, M. H. J. (1994). Voltages Sags. *Notes of Course, Manchester Centre for Electrical Energy*.

12. Taylor, T., Hanson, A., Lubkeman, D. and Mousavi, M. (2005). Fault Current Review Study. *ABB Inc. Electric Systems Consulting*, 2005-11222-1-R.04, 41-45.

13. İnternet: Pinnekamp, F. (2007). The Circuit Breaker. *ABB Review*.URL: https://search-xt.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK101130D6578&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch, Son Erişim Tarih: 20.03.2020.

14. Slade, P. G., Voshall, R. E., Wu, J. L., Bonk, J. J., Stacey, E. J., Stubler, W. F., Porter, J. and Hong, L. (1992). The Utility Requirements for a Distribution Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(2), 507-515.

15. Noe, M. and Oswald, B. R. (1999). Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9(2), 1347-1350.

16. İnternet: Neumann, A. Application of Fault Current Limiters. *BERR: Department for Business Enterprise and Regulatory Reform*, 3-14. URL: https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100919182321/http://www.ensg.gov.uk/assets/dgcg00099rep.pdf, Son Erişim Tarih: 20.03.2020.

17. Eckroad, S. (2008). Utility Needs Survey for Fault Current Limiters. *EPRI, Proceedings of International Workshop Coated Conductors Applications*, 7.

18. İnternet: DOE Newsletter. (2009). *Fault Current Limiters*. URL: http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/hts_fcl_110609.pdf, Son Erişim Tarih: 20.03.2020.

19. Krause, J. C. (1980). *Short-Circuit Current Limiters: Literature Survey1973-1979*. Eindhoven University of Technology, TH-Report 80-E-109, ISBN 90-6144-109-9.

20. Power, A. J. (1995). An Overview of Transmission Fault Current Limiters. *IEE Proceedings Colloquium on Fault Current Limiters-A Look on Tomorrow*, 1-5.

21. Leung, E. M. (2000). Superconducting Fault Current Limiters. *IEEE Power Engineering Review*, 20(8), 15-18.

22. Meyer, C., Schroder, S. and DeDoncker, R.W. (2004). Solid-State Circuit Breakers and Current Limiters for Medium-Voltage Systems Having Distributed Power Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5), 1333-40.

23. Noe, M. and Steurer, M. (2007). High-Temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status. *Superconductor Science and Technology*, 20, R15-R29.

24. Hagh, M. T. and Abapour, M. (2009). Nonsuperconducting Fault Current Limiter with Controlling the Magnitudes of Fault Currents. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(3), 613-619.

25. Chen, S., Li, P., Ball, R., dePalma, J.-F. and Lehman, B. (2015). Analysis of a Switched Impedance Transformer-Type Nonsuperconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4), 1925-1936.

26. Firouzi, M., Gharehpetian, G. and Mozafari, B. (2015). Bridge-Type Superconducting Fault Current Limiter Effect on Distance Relay Characteristics. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 68, 115-122.

27. Cui, J. B., Shu, B., Tian, B., Sun, Y. W., Wang, L. Z., Gao, Y. Q., Liu, L., Wei, Z. Q.,Zhang, L. F., Zhu, X. H., Li, Q., Hong, H., Cao, J. B., Gong, W. Z. and Xin, Y. (2013). Safety Considerations in the Design, Fabrication, Testing, and Operation of the DC Bias Coil of a Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3), 5600704-5600704.

28. Majka, M. and Kozak, J. (2016). *Superconducting Fault Current Limiter for the Electric Power System*. Proceedings of the XVII National Conference on Superconductivity, 130(2).

29. Kalsi, S. S. (2011). *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*, Wiley-IEEE Press, 332, 1-14.

30. Kumara, J. R. S. S., Atputharajah, A., Ekanayake, J. B. and Mumford, F.J. (2006). Over Current Protection Coordination of Distribution Networks with Fault Current Limiters. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*.

31. Patil, S. and Thorat, A. (2017). *Development of Fault Current Limiters: A Review*. International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI), 122-126.

32. Ramadan, A. G. M. (2018). *Permanent Magnet Fault Current Limiters for Electrical Power Protection Systems*. PhD Thesis, Sheffield Hallam University, 16-17.

33. Sharma, D. and Sahay, K. B. (2016). *Basic Concepts of Superconducting Fault Current Limiter*. IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 1-5.

34. Fotuhi-Firuzabad, M., Aminifar, F. and Rahmati, I. (2012). Reliability Study of HV Substations Equipped with the Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 610-617.

35. Abramovitz, A. and Smedley, K. M. (2012). Survey of Solid-State Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(6), 2770-2782.

36. Morandi, A. (2013). Fault Current Limiter: An Enabler for Increasing Safety and Power Quality of Distribution Networks. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(6), 57-64.

37. Firouzi, M., Gharehpetian, G. B. and Mozafari, B. (2015). Improvement of Power System Stability by Using New Switching Technique in Bridge-Type Fault Current Limiter. *Electrical Power Components and Systems*, 43, 234-244.

38. Sadi, M. A. H. and Ali, M. H. (2016). A Fuzzy Logic Controlled Bridge Type Fault Current Limiter for Transient Stability Augmentation of Multi-Machine Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 602-611.

39. Chen, S., Li, P., Lehman, B., Ball, R. and dePalma, J.-F. (2013). *A New Topology of Bridge-Type Non-Superconducting Fault Current Limiter*. In Processing 2013 28th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition, 1465-1472.

40. Nazari-Heris, M., Nourmohamadi, H., Abapour, M. and Sabahi, M. (2017). MultilevelNonsuperconducting Fault Current Limiter: Analysis and Practical Feasibility. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(8), 6059-6068.

41. Raju, B. P., Parton, K. C. and Bartram, T. C. (1982). A Current Limiting Device Using Superconducting D.C. Bias Applications and Prospects. *IEEE Power Engineering Review*, 9, 34-35.

42. Hoshino, T., MohammadSalim, K., Nishikawa, M., Muta, I. and Nakamura, T. (2001). Proposal of Saturated DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL). Cryogenics on Science Direct, 41(7), 469-474.

43. Hoshino, T., Salim, K. M., Nishikawa, M., Muta I. and Nakamura, T. (2001). DC Reactor Effect on Bridge Type Superconducting Fault Current Limiter During Load Increasing. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11(1).

44. Mutaa, I., Hoshinoa, T., Salima, K. M., Kawasakia, A., Nakamuraa, T. and Yamadab, M. (2004). Proposal of DC Shield Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter. *Cryogenics on Science Direct*, 44(3), 177-182.

45. Radmanesh, H., Heidary, A. Fathi, S. H. and Gharehpetian, G. B. (2016). Dual Function Ferroresonance and Fault Current Limiter Based on DC Reactor. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(9), 2058-2065.

46. Mansoor, A., Grady, W. M., Thallam, R. S., Doyle, M. T., Krein, S. D. and Samotyj, M. J. (1995). Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-Phase Diode Bridge Rectifier Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(3), 1416-1422.

47. Heidary, A., Ghorbanyan, K., Radmanesh, H. and RajabiKhamse, H. R. (2016). *Voltage Sag and Harmonic Analysis in Distribution Network.* 21st Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC).

48. Carbone, R. and Corsonello, P. (2003). *A New Passive Power Factor Corrector for Single-Phase Bridge Diode Rectifiers*. IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, PESC '03.

49. Carbone, R. and Scappatura, A. (2004). *A High Efficiency Passive Power Factor Corrector for Single-Phase Bridge Diode Rectifiers*. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 8180247.

50. Heidary, A., Radmanesh, H. and Ghorbanyan, K. DC Reactor Based Fault Current Limiter Principle for DC Electronic Load THD Reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, (Submitted).

51. Sainz, L., Pedra, J. and Mesas, J. J. (2007). Single-Phase Full-Wave Rectifier Study with Experimental Measurements. *Electric Power Systems Research*, 77(3-4), 339-351.

52. Beres, R. N., Wang, X., Liserre, M., Blaabjerg, F. and Bak, C. L. (2016). A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 4(1), 54-69.

53. (2009). 1547.2-2008 - IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM), IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. *IEEE*.

54. Rockhill, A. A., Liserre, M., Teodorescu, R. and Rodriguez, P. (2011). Grid- Filter Design for a Multimegawatt Medium-Voltage Voltage-Source Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1205-1217.

55. Beres, R., Wang, X., Blaabjerg, F., Bak, C. L. and Liserre, M. (2014). *Comparative Analysis of the Selective Resonant LCL and LCL Plus Trap Filters*. In Processing International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 740-747.

56. Beres, R., Wang, X., Blaabjerg, F., Liserre, M. and Bak, C. (2015). Optimal Design of High-Order Passive-Damped Filters for Grid-Connected Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 53(4), 1-1.

57. Erickson, R. W. and Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Boston, MA Springer US, ISBN 978-0-306-48048-5.

58. Muhlethaler, J., Schweizer, M., Blattmann, R., Kolar, J. W. and Ecklebe, A. (2013). Optimal Design of LCL Harmonic Filters for Three-Phase PFC Rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(7), 3114-3125.

59. Jennings, GD. and deVilliers, LNF. (2015). Transient Stability Improvement Using Series Reactors: A Case Study. *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 26-28.

60. Zhang, X., Tomsovic, K. and Dimitrovsk, A. (2017). Security Constrained Multi-Stage Transmission Expansion Planning Considering a Continuously Variable Series Reactor. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(6), 4442-4450.

61. Mukhopadhyay, S. C., Iwahara, M., Yamada, S. and Dawson, F. P. (1998). Investigation of the Performances of a Permanent Magnet Biased Faultcurrent Limiting Reactor with a Steel Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(4), 2150-2152.

62. Mukhopadhyay, S. C., Dawson, F. P., Iwahara, M. and Yamada, S. (1999). Analysis, Design and Experimental Results for a Passive Current Limiting Device. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 146(3), 309-316.

63. Iwahara, M., Mukhopadhyay, S. C., Yamada, S. and Dawson, F. P. (1999). Development of Passive Fault Current Limiter in Parallel Biasing Mode. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5), 3523-3525.

64. Yuan, J., Lei, Y., Tian, C., Chen, B., Yu, Z., Yuan, J., Zhou, J. and Yang, K. (2015). Performance Investigation of a Novel Permanent Magnet-Biased Fault-Current Limiter. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 8403004.

65. Rasolonjanahary, J-L., Sturgess, J.P., Chong, E.F.H., Baker, A.E. and Sasse, C.L. (2006). *Design and Construction of a Magnetic Fault Current Limiter*. 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD).

66. Farhoodnea, M., Mohamed, A. and Shareef, H. (2014). *A Comparative Study on the Performance of Custom Power Devices for Power Quality Improvement*. 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA), 153-157.

67. Tian, C., Zhong, Y., Wei, L., Lei, Y., Chen, B., Gao, Y., Muramatsu, K. and Yuan, J. (2017). A Coupled Method for Evaluating Eddy Current Loss of NdFeB Permanent Magnets in a Saturated Core Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53 (6), 1-4.

68. Zou, L., Li, Q., Liu, H. and Siew, W. H. (2009). *Study on the Feasibility of Developing High Voltage and Large Capacity Permanent-Magnet-Biased Fault Current Limiter*. 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1-5.

69. Hall, J. and Cheer, A. (2013). *Fault Current Limiter Surge Protection Device for the Power Grid Based Upon Zero Power Consumption Ceramic Ferrite Permanent Magnets*. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 1-4.

70. Santra, T., Chkraborty, A. K., Roy, D. and Choudhury, A. B. (2009). *Analysis of Passive Magnetic Fault Current Limiter Using Wavelet Transform*. International Conference on Power Systems, 1-6.

71. Hong-shun, L., Liang, Z., Li, Q., Siew, W. H. and Yuan, M. (2008). *Operating Characteristics of the Permanent-Magnet-Biased Saturation Based Fault Current Limiter*. International Conference on High Voltage Engineering and Application, 503-507.

72. Li, Q., Xu, J., Zou, L. and Lou, J. (2012). Modelling Methodology and Experimental Verification of the Permanent-Magnet-Biased Saturation-Based Fault Current Limiter, *IET Electric Power Applications*, 6(8), 504-512.

73. Chen, B., Wei, L., Lei, Y., Zhong, Y., Tian, C., Guan, W., Gao, Y., Muramatsu, K. and Yuan, J. (2016). *Investigation on a Modified Hybrid Compact Saturated-Core Fault Current Limiter Based on Permanent Magnets*. IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 1-1.

74. Yuan, J., Lei, Y., Tian, C., Chen, B., Yu, Z., Yuan, J., Zhou, J. and Yang, K. (2015). *Investigation of the Performance of a Novel Permanent Magnet Biased Fault Current Limiter*. 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG), 1-1.

75. Shah, S. S. A., Khan, F., and Mutalib, P. A. (2012). Fault Current Limiter for a Distributed Power System. *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, 3(8), 30-33.

76. Zou, L., Ma, Y., Liu, H., Li, Q. and Sun, S. (2008). *Impact of Saturation Depth Ratio of Iron-Core on the PMFCL*. International Conference on Electrical Machines and Systems, 4338-4343.

77. Knott, J. C., Comminsa, P. A., Moscrop, J. W., and Dou, S. X. (2014). Design Considerations in MgB_2 -Based Superconducting Coils for Use in Saturated-Core FaultCurrent Limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(5), 1-4.

78. Karady, G. G., Prigmore, J. R. and Mendoza, J. A. (2012). A Neodymium Permanent Magnet Fault Current Limiter for Use in the FREEDM Project. *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 1-7.

79. Wei, L., Chen, B., Yuan, J. Tian, C., Zhong, Y., Li, X. Gao, Y. and Muramatsu, K. (2017). Performance and Optimization Study of a Novel Compact Permanent-Magnet-Biased Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11).

80. Song, S., Zou, L., Zhao, T., Zhang, L., Li, Q. and Liu, M. (2014). FEM Simulations of Permanent-Magnet-Biased Saturation Based Saturation Based Fault Current Limiter. *Advanced Materials Research*, 960-961, 867-870.

81. Patwary, R., Datta, S. and Ghosh, S. (2011). *Harmonics and Interharmonics Estimation of a Passive Magnetic Fault Current Limiter Using Coiflet Wavelet Transform*. International Conference on Communication and Industrial Application, 1-6.

82. Balakrishnan, F. G., Sreedharan S. K. and Michael, J. (2013, July). *Transient Stability Improvement in Power System Using Unified Power Flow Controller (UPFC)*. Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : GHORBANYAN, Kamran
Uyruğu : İran
Doğum tarihi ve yeri : 27 Mart, 1994, Zanjan
Medeni hali : Bekar
Telefon : +90 (552) 211 14 73
+98 (912) 741 73 14
e-mail : kamran_ghorbanyan@yahoo.com
kamran.ghorbanyan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	Devam ediyor
Lisans	Zanjan Üniversitesi / Fizik	2016
Lise	Zanjan - Roozbeh High School	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2013	Elektrik ve Manyetizma - Proje ve Lisans Tezi, Zanjan Üniversitesi, Zanjan, İran	Öğretim asistanı
2013-2014	Mekanik Fizik - Termodinamik ve Dalgalar Laboratuvarı, Zanjan Üniversitesi, Zanjan, İran	Laboratuvar asistanı
2014-2015	Fizik-Farhangi Amoozesh Ghalamchi Organizasyonu, Zanjan, İran	Öğretmen
2012-2015	Zanjan Genel Spor Federasyonu, İran	Hava Sporları Antrenörü
2015-2016	Doğal gaz firması, Zanjan, İran	Badminton Antrenör

Yabancı Dil

İngilizce, Türkçe, Farsça, Azerice

Yayınlar

Kitaplar

1. Najjary, H. and Ghorbanyan, K. (2016). *Optics Experiments*, (Birinci Baskı). İran: NİKAN KETAB Yayınevi.

2. Heidary, A., Ghorbanyan, K. and Bazarghani, Z. (2016). *Exploring of Scientific Laws in Handmade construction-Electric Energy Production Methods*, (Birinci Baskı). İran: NİKAN KETAB Yayınevi.

3. Heidary, A., Ghorbanyan, K. and Bazarghani, Z. (2016). *Exploring of Scientific Laws in Handmade construction-Electric Energy Production Methods*, (Birinci Baskı). İran: NİKAN KETAB Yayınevi.

4. Ghorbanyan, K. (2016). *Handmade Kites*, (Birinci Baskı). İran: NİKAN KETAB Yayınevi.

Makaleler

1. Heidary, A., Radmanesh, H. and Ghorbanyan, K. (2019). A Multi-Inductor H Bridge Fault Current Limiter. *Electronics*, 8(7), 795.

2. Heidary, A., Radmanesh, H. and Ghorbanyan, K. DC Reactor Based Fault Current Limiter Principle for DC Electronic Load THD Reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*. (Submitted).

3. Heidary, A., Radmanesh, H., Ghorbanyan, K. and Moradkhani, A. M. (2019). Design and Construction of a Single-Phase Reactor and Its Installation in a Power Grid to Counteract Rapid Fluctuations in Line Current and Current Variation. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 2(2).

Konferans Makaleleri

1. Heidary, A., Ghorbanyan, K. and Radmanesh, H. (2016, October). *Effect of Electronic Load in Increasing Shunt Capacitor Bank Current*. 21st Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC).

2. Heidary, A., Radmanesh, H., Ghorbanyan, K. and RajabiKhamse, H. R. (2016, October). *Voltage Sag and Harmonic Analysis in Distribution Network*. 21st Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC).

Konferans Posterleri

1. Ghorbanyan, K. and Acar, S. (2019). *Present a New Structure of DC Reactor (DCR) Based on Fault Current Limiter and Magnetic Fields Investigations of DCR Core*

Under Different Network Conditions. 4nd International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC'19), Ankara, Türkiye.

2. Ghorbanyan, K. and Acar, S. (2019). *Structure Improvement of the DC Reactor (DCR) Based on Fault Current Limiter by Using Permanent Magnet in Core Structure (PDCR) and Magnetic Fields Investigation of PDCR Core Under Different Network Conditions*. 4nd International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC'19), Ankara, Türkiye.

Patentler

1. Heidary, A., Ghorbanyan, K., Radmanesh, H. and Rajabi Khamse, H. R. (2016). *Electronic Load Power Factor Corrector Based on DC-Reactor*. Patent No: 89371, Uluslararası Sınıflandırma: H02B;F01B;H03B; İran Patent Organizasyonu.

2. Ghorbanyan, K., Heidari, A., Bazarghani, Z., Khoshkam, M. and Khanbabaishub, R. (2018). *Resonant Electricity Transmission Training Device*. Patent No: 97226, Uluslararası Sınıflandırma: G09B 32/1; İran Patent Organizasyonu.

3. Ghorbanyan, K., Heidari, A., Radmanesh, H., Asadi, N. and Abedini, Y. A. (2017). *Three-Stage Light to Electric Converter*. Patent No: 95085, Uluslararası Sınıflandırma: F28B; İran Patent Organizasyonu.

4. Heidari, A., Ghorbanyan, K., Khoshkam, M., Rajabikhamse, H. R. and Radmanesh, H. (2016). *Magnetic Mechanism to Reduce Impact Due to Impact in Moving Systems*. Patent No: 92695, Uluslararası Sınıflandırma: G01C;21/08;G05B; İran Patent Organizasyonu.

5. Ghorbanyan, K., Abedini, Y. A. and Bazarghani, Z. (2015). *Cold Vapor Producing Laboratory Training System*. Patent No: 78366, Uluslararası Sınıflandırma: C01B 14/3;B21J 24/7; İran Patent Organizasyonu.

6. Ghorbanyan, K., Heidari, A., Bazarghani, Z. and Mahmoudi, M. (2015). *Sound to Electric Converter*. Patent No: 87840, Uluslararası Sınıflandırma: H03B;G09B;H02M 539/7; İran Patent Organizasyonu.

7. Heidary, A., Ghorbanyan, K., Rajabikhamse, H. R. and Radmanesh, H. (2016). *Intelligence Irrigation System by Mini Industrial Computer*. Patent No: 89372, Uluslararası Sınıflandırma: F01B;G05B; İran Patent Organizasyonu.

Hobiler

Badminton, Voleybol



GAZİ GELECEKTİR...