

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**İNDÜKTİF TİP SÜPERİLETKEN HATALI AKIM SINIRLAYICI CİHAZ
TASARIMI VE ÇALIŞTIRILMASI**

Sahure GEÇER

FİZİK ANABİLİM DALI

**ANKARA
2017**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Sahure GEÇER tarafından hazırlanan “İndüktif Tip Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı Cihaz Tasarımı ve Çalıştırılması” adlı tez çalışması 19/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ali GENCER

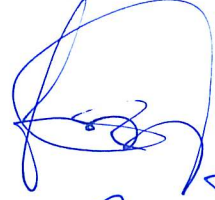
Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı



Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı



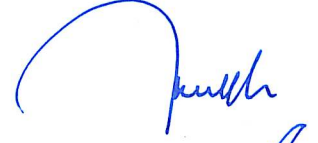
Üye : Prof. Dr. Ali GENCER

Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ

Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı



Üye : Doç. Dr. Ali BOZBEY

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Doç. Dr. Haluk KORALAY

Gazi Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

19.06.2017



Sahure GEÇER

ÖZET

Doktora Tezi

İNDÜKTİF TİP SÜPERİLETKEN HATALI AKIM SINIRLAYICI CİHAZ TASARIMI VE ÇALIŞTIRILMASI

Sahure GEÇER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali GENCER

Bu tez çalışmasında süperiletken hatalı akım sınırlayıcı özelliği taşıyan üç farklı trafo kısa devre testleri gerçekleştirilerek üretilmiştir. Üretilen her bir trafo manyetik akı transferi yöntemiyle çalışmaktadır. Bu çalışmadaki temel yaklaşım, Lenz Kanunu ve süperiletken halka fiziğinin özelliklerini kullanarak trafo geliştirmektir. Birincil ve ikincil nüveler arasındaki manyetik akı transferi süperiletken halka vasıtasıyla yapılmıştır. Süperiletken halkanın normal duruma geçmesinden sonra manyetik akı transferi büyük ölçüde kesilmiştir. Dolayısıyla üretilen trafoların süperiletken hatalı akım sınırlayıcı (SHAS) olarak kullanılması mümkündür. Trafolar 2,5 kVA tek-fazlı aynı geometride nüvelere sahip, 2,5 kVA tek-fazlı farklı geometride nüvelere sahip ve 6 kVA 3-fazlı olacak şekilde üretilmiştir. 2,5 kVA tek-fazlı aynı geometride nüveler kullanılarak üretilen trafo için; uygulama açısından farklı olarak, süperiletken halkaya kontrol edilebilir ekstra doğru akım (400 A) verilmiş ve oluşan şok geçişle birlikte ikincil tarafta akım sınırlandırılmıştır. Trafo tasarımı sırasında yapılan simülasyon çalışmalarında COMSOL MP programı kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında birbirinden bağımsız olan iki tane demir nüve arasındaki manyetik akı transferinin süperiletken halka vasıtasıyla % 100 oranında yapıldığı gösterilmiştir. Birincil ve ikincil bobinlere ait akım-gerilim dalga grafikleri zamanın fonksiyonu olarak PicoScope üzerinde kaydedilmiştir. Trafoların birincil ve ikincil taraflar için voltaj düşümleri ve maksimum hatalı akım değerleri deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

Temmuz 2017, 139 sayfa

Anahtar Kelimeler: süperiletken halka, süperiletken hatalı akım sınırlayıcı, manyetik akı transferi

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN AND OPERATING OF THE INDUCTIVE TYPE SUPERCONDUCTOR FAULT CURRENT LIMITER

Sahure GEÇER

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ali GENCER

In this thesis, three different transformers with superconducting fault current limiting properties have been produced with executed short circuit tests. Produced each transformer works with magnetic flux transfer method. The basic approach in this work is to develop the transformer by using superconducting loop physics and Lenz Law. Magnetic flux transfer between primary and secondary iron cores have been made via superconducting loop. After the transition from superconducting state to normal state of superconducting loop, magnetic flux transfer has been limited majorly. Due to the situation, it is possible that produced transformers are used as a Superconducting Fault Current Limiter (SFCL). The transformers are produced 2,5 kVA single phase together with iron core as a same geometry, 2,5 kVA single phase together with iron core as a different geometry and 6 kVA 3-phase transformers. For the 2,5 kVA single-phase transformer having same geometry iron core, so as to be a difference for an application, controllable extra DC current (400 A) has been given to the superconducting ring so current has been limited on the secondary side because of quench. COMSOL MP software has been used during the simulation work for the trafo design. 100 % magnetic flux transfer has been shown via superconducting loop between the two different independent iron cores in executed simulation works. Current-voltage wave graphs of primary and secondary side of transformers have been saved as a function of time using PicoScope. Voltage drops of primary and secondary side and the maximum value of fault currents have been calculated using experimental data for transformer.

July 2017, 139 pages

Key Words: superconducting loop, superconducting fault current limiter, magnetic flux transfer

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım esnasında beni yönlendirerek bilgi öneri ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali GENCER'e (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı), çalışmalarım esnasında beni yönlendiren ve bilgilendiren Dr. Janos KOSA'ya (Kecskemet Koleji Öğretim Üyesi) ve Prof. Dr. Ekrem YANMAZ'a (Gelişim Üniversitesi Mekatronik Bölümü Öğretim Üyesi), projeler süresince birlikte çalıştığımız Doç. Dr. Serap SAFRAN (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) ve Dr. Ercan ERTEKİN ile laboratuvarında birlikte çalıştığım arkadaşlarım Meryem ALP, Hamit ÖZTÜRK, Elvan COŞKUN ve Ebru KILIÇARSLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimim süresince, maddi ve manevi her türlü desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam Gürbüz GEÇER ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, “TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Burs Programı” kapsamında ve “Hatalı Akım Sınırlayıcı İçin Uygun Nano-Yapılı Süperiletken Külçe MgB_2 Ve Eriyik Y-Ba-Cu-O Halka Numunelerin Yüksek Basınç Ve Sıcaklık Altında Üretimi; Manyetik Ve Mekanik Karakterizasyonu (113F205-TÜBİTAK)” konulu proje tarafından desteklenmiştir.

Sahure GEÇER

Ankara, Temmuz 2017

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL KAVRAMLAR	4
2.1 Süperiletkenlerde Sıfır Direnç Kavramı.....	4
2.2 Meissner Etkisi	5
2.3 I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler	7
2.4 Nüfuz (Sızma) Derinliği (λ)	8
2.5 Uyum (Koherens) Uzunluğu (ξ)	10
2.6.1 Kritik sıcaklık (T_c)	11
2.6.2 Kritik alan (H_c).....	12
2.6.3 Kritik akım yoğunluğu (J_c).....	13
2.7 Süperiletken Halka Fiziği	14
2.8 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri (YSS)	15
2.8.1 YBCO Süperiletkeni	16
2.9 Birinci ve İkinci Nesil Teller	20
2.10 Hatalı Akım Sınırlayıcılar	22
2.10.1 Elektrik Enerjisinin İletilmesi ve Dağıtılması	22
2.10.2 Hatalı Akım için Geleneksel Koruma Sistemleri	27
2.11 Hatalı Akım Sınırlayıcılar (HAS)	28
2.12 Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcılar (SHAS)	32
2.12.1 Rezistif SHAS	33
2.12.2 Köprü Tipi SHAS.....	36

2.12.3 DC eğilimli (doymuş) demir çekirdekli SHAS.....	38
2.12.4 Korumalı Demir Çekirdekli (İndüktif Tip) SHAS.....	39
2.13 SHAS Tiplerinin Kıyaslaması	41
2.14 SHAS Üretilmesinde Kullanılan Malzemeler	43
2.15 SHAS'ın Tarihi Gelişim Süreci.....	44
3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	52
3.1.1 Aynı geometriye sahip demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS	57
3.1.2 Farklı geometriye sahip demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS.....	63
3.1.3 3-fazlı 6 kVA SHAS.....	64
3.2 Deney Düzenegi İçin Hazırlıklar.....	67
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	72
4.1 SHAS'lara ait simülasyon çalışmaları.....	72
4.2 Süperiletken tellere ait ölçüm sonuçları.....	80
4.3 Aynı Geometride Demir Nüveler Kullanılarak Yapılan Tek Fazlı 2,5 kVA'lık SHAS'a ait ölçümler.....	84
4.3.1 Farklı dirençlerde teller kullanılarak alınan ölçümler	87
4.3.2 Süperiletken halka kullanılarak alınan ölçümler	95
4.3.3 2,5 kVA'lık tek- fazlı SHAS'a kontrol edilebilir ekstra DA verilmesi	103
4.4 Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan tek fazlı 2,5 kVA'lık SHAS'a ait ölçümler	110
4.5 3- fazlı 6 kVA'lık SHAS'a ait ölçümler	118
5. SONUÇ.....	126
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ.....	139

SİMGELER DİZİNİ

$B_{\text{dış}}$	Dışardan uygulanan manyetik alan
f	Frekans
$\vec{E}$	Elektrik alan
H_c	Kritik manyetik alan şiddeti
H_{c1}	Alt kritik manyetik alan
H_{c2}	Üst kritik manyetik alan
I_{rms}	Akımın etkin değeri
J_c	Kritik akım yoğunluğu
μ_0	Manyetik Geçirgenlik
ρ	Özdirenç
R	Direnç
T_c	Kritik sıcaklık
λ_L	Nüfuz etme derinliği
ξ	Uyum uzunluğu
V	Voltaaj
ε	Gerilim düşümü

Kısaltmalar

AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
DSS	Düşük Sıcaklık Süperiletkenleri
HAS	Hatalı Akım Sınırlayıcı
SHAS	Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı
YBCO	Yttrium-Baryum-Bakır-Oksit ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)
YSS	Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Hg'nin direnç- sıcaklık grafiği (Ginzburg ve Andryushin 2004)	1
Şekil 2.1 Metal ve süperiletkenin öz direnç- sıcaklık grafiği	5
Şekil 2.2 Süperiletkenin manyetik alandaki davranışı	6
Şekil 2.3.a I. tip, b. II. tip bir süperiletkenin uygulanan manyetik alandaki mıknatıslanma eğrileri, c. I. tip, d. II. tip süperiletkenlerin faz diyagramı (Kittel 1996)	7
Şekil 2.4 II. tip bir süperiletkenin girdap durumu	8
Şekil 2.5 Manyetik alanın numune içine nüfuz etmesi	9
Şekil 2.6 I ve II. tip süperiletkenlerde uyum uzunluğu ve nüfuz etme derinliği (Rose-Innes ve Rhoderick 1994)	10
Şekil 2.7 Gümüşün öz direncinin sıcaklığa bağlı değişimi	12
Şekil 2.8 Süperiletkenin kritik manyetik alanının-sıcaklık grafiği	12
Şekil 2.9 Süperiletkenlik faz diyagramı	13
Şekil 2.10 Manyetik alan içerisinde süperiletken halka	14
Şekil 2.11 YBCO süperiletkeninin kristal yapısı	17
Şekil 2.12 YBCO'nun normalize edilmiş kritik akım yoğunluğunun dirence bağlı grafiği (Iwasa 1994)	20
Şekil 2.13 AMSC'nin ürettiği birinci nesil süperiletken tel	21
Şekil 2.14 SuperPower'ın ürettiği SCS4050 süperiletken tel	22
Şekil 2.17 Hatalı akımın oluştuğu durumların fotoğrafları (Martini 2016)	25
Şekil 2.18 Trafolarda meydana gelen hasar	26
Şekil 2.19 HAS'lı bir elektrik sistemi (http://energy.gov 2016a)	28
Şekil 2.20.a Elektrik sisteminin HAS'sız şematik gösterimi, b. HAS'lı sistemin şematik gösterimi	29
Şekil 2.21 HAS kullanılarak ve kullanılmadan elde edilen akımın genel gösterimi (Pei 2012)	30
Şekil 2.22.a Normal çalışma durumunda olan sistemin akım değeri b. Sistemin şematik gösterimi (Noe 2008)	33
Şekil 2.23.a Kısa devre durumunda olan sistemin akım değeri, b. Sistemin şematik gösterimi (Noe 2008)	34
Şekil 2.24.a Kısa devre durumundan sonra sistemin akım değeri, b. Sistemin şematik gösterim (Noe 2008)	35
Şekil 2.25 Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)	36
Şekil 2.26 Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)	37
Şekil 2.27 Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)	37
Şekil 2.28 Sistemin elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)	39
Şekil 2.29.a İndüktif tip SHAS'ın şematik gösterimi (Mumford ve Usoskin 2009), b. Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)	40
Şekil 2.30 Nexans'a ait üç tane SHAS:12 kV/100 A, 12 kV/400 A, 12 kV/800 A (Bock vd. 2011).	48
Şekil 2.31 Bi-2212 elementleri (Tixador 2010)	49
Şekil 2.32. a Boxberg, Almanya, b. Shandin, ABD, c. Tianjin, Çin (Nagarathna vd. 2015)	49
Şekil 3.1 SHAS'ın şematik gösterimi	52

Şekil 3.2 Manyetik akı transfer tipi ve süperiletken trafonun şematik olarak kıyaslanması	53
Şekil 3.3 Manyetik akı transfer tipi SHAS'ın tek fazı için şematik gösterim.....	55
Şekil 3.4 Süperiletken halkadaki akı değişimleri	55
Şekil 3.5 Demir nüvenin dikey gösterimi	57
Şekil 3.6 2,5 kVA tek- fazlı Trafo.....	61
Şekil 3.7 Süperiletken halka/sarım doğru akım güç kaynağına mekanik kontaklarla bağlanması.....	62
Şekil 3.8 Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS'a ait görseller	64
Şekil 3.9 SHAS yapımında kullanılan demir nüve	65
Şekil 3.10 3- fazlı SHAS'ın üstten şematik gösterimi	66
Şekil 3.11.a Bobinler için demir kalıp, b. Demir kalıbın yalıtım malzemesi ile kaplanması, c. Bobinlerin sarımı.....	67
Şekil 3.12 Bobinin dikey olarak gösterimi.....	68
Şekil 3.13.a Seri hazırlanan SCS4050 süperiletken tel b,c. Paralel hazırlanan SF12050 süperiletken tel.....	69
Şekil 3.14 Telleri denemek için hazırlanan düzenek	69
Şekil 3.16 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'a ait fotoğraflar	71
Şekil 4.1 2,5 kVA'lık trafoya ait demir nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğu normu	72
Şekil 4.2 2,5 kVA'lık tek fazlı trafodaki voltaj değerleri	73
Şekil 4.3 2,5 kVA'lık trafoya ait demir nüveler üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu.....	73
Şekil 4.4 Demir nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dolanımının dikey kesit görünümü.....	74
Şekil 4.5 2,5 kVA'lık trafoya ait kısa devre olma anı.....	74
Şekil 4.6 2,5 kVA'lık trafoya ait akım değerleri.....	75
Şekil 4.7 2,5 kVA'lık trafoya ait voltaj değerleri.....	75
Şekil 4.8 2,5 kVA'lık trafoya ait demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	76
Şekil 4.9 2 kVA'lık trafoya ait demir nüveler üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu.....	77
Şekil 4.10 Demir nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dolanımının dikey kesit görünümü.....	78
Şekil 4.11 2 kVA'lık trafoya ait akım değerleri.....	78
Şekil 4.12 2 kVA'lık trafoya ait voltaj değerleri.....	79
Şekil 4.13 2 kVA'lık trafoya ait demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	80
Şekil 4.14 Tellerin denenmesi için hazırlanan düzenek.....	81
Şekil 4.15 SF1050 süperiletken telinin indüktans ölçüm deney düzeneği.....	82
Şekil 4.16 Süperiletken halkanın indüktansının sarım sayısına bağlı grafiği	83
Şekil 4.17.a Tek- fazlı SHAS b. SHAS'a ait bobinlerin şematik gösterimi.....	84
Şekil 4.18 Tek- fazlı SHAS'ın birincil tarafı için drop ölçümü.....	86
Şekil 4.19 Tek- fazlı SHAS'ın ikincil tarafı için drop ölçümü	87
Şekil 4.20 Bakır halka kullanılarak hazırlanan sistem	88
Şekil 4.21 Yüksüz durumda bakır halka kullanılarak yapılan sisteme ait ölçüm	89

Şekil 4.23.a Tek- fazlı sistemde 0,25 Ω , b. 0,083 Ω direncinde konstantan halka kullanılarak hazırlanan düzenek.....	91
Şekil 4.24 Yüksüz durumda birincil ve ikincil taraftaki voltaj değerleri.....	92
Şekil 4.25 Yüklü durumda birincil ve ikincil taraftaki voltaj değerleri ve akım değeri.....	92
Şekil 4.29 Tek halka kullanılarak yapılan sisteme ait voltaj değerleri	95
Şekil 4.30 Bakır halka ve süperiletken halka varken sisteme ait voltaj ve akım değerleri.....	96
Şekil 4.31 Tek- fazlı SHAS'ın şematik gösterimi.....	97
Şekil 4.32 Sisteme ait voltaj ve akım değerleri.....	97
Şekil 4.33.a Sistem yüklü durumdayken 21 sarımlı halka ile alınan ölçüm, b. V_{2S} ve I_{2S} zamanla değişimi	98
Şekil 4.34.a Sistem yüksüz durumdayken 21 sarımlı halka ile alınan ölçüm, b. V_{2S} ve I_{2S} zamanla değişimi	99
Şekil 4.35.a.b. Yüksüz sisteme ait voltaj ve akım değerlerinin kısa devre öncesi ve sonrası değerleri	100
Şekil 4.36 Birbirine paralel 45 tane süperiletken tel kullanılarak oluşturulan deney düzeneği	101
Şekil 4.37.a.b Yüklü sisteme ait voltaj ve akım değerlerinin kısa devre öncesi ve sonrası değerleri	102
Şekil 4.39.a. 45 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait DA öncesi, b. DA sonrası grafikler.....	104
Şekil 4.40.a V_{2S} , b. I_{2S} , c. DA değerleri (Gecer vd. 2016).....	105
Şekil 4.41.a Sisteme 1s, b. 2,15 s DA verildiği zaman voltaj değerleri.....	106
Şekil 4.42.a Sisteme ait DA ve voltaj değerleri, b. V_{2S} ve DA değerleri.....	107
Şekil 4.43.a Sisteme ait akım değerleri, b. I_{2S} ve DA değerleri	108
Şekil 4.44.a 45 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait DA öncesi, b. DA sonrası grafikler.....	109
Şekil 4.45.a 30 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait DA öncesi, b. DA sonrası grafikler.....	109
Şekil 4.46.a Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan sistemin fotoğrafı, b. Bobinlerin şematik gösterimi	111
Şekil 4.48 Tek- fazlı SHAS'ın ikincil tarafı için drop ölçümü	112
Şekil 4.49. 12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait voltaj değerleri.....	113
Şekil 4.50 12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait V_{1P} ve akım değerleri.....	114
Şekil 4.51 12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait V_{1P} ve akım değerleri.....	115
Şekil 4.52.a Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan sistemin şematik gösterimi, b. 17 sarımlı süperiletken halka	116
Şekil 4.53.a 17 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait akım ve voltaj değerleri, b. V_{2S} ve I_{2S} değerleri.....	116
Şekil 4.54. a 17 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait akım ve voltaj değerleri.....	117
Şekil 4.55 3- fazlı 6 kVA'lık SHAS'a ait bobinlerin şematik gösterimi	118
Şekil 4.56 SHAS'ın birincil tarafı için drop ölçümü için şematik gösterim	120

Şekil 4.57 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait voltaj değerleri.....	120
Şekil 4.58 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait voltaj değerleri.....	121
Şekil 4.59 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait akım ve voltaj değerleri.....	122
Şekil 4.60 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait akım ve voltaj değerleri.....	122
Şekil 4.61 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait akım değerleri.....	123
Şekil 4.62 3- fazlı 14 sarımlı sistemin fotoğrafı, b. Telin yanmış hali.....	124
Şekil 4.63 3- fazlı 14 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait voltaj değerleri.....	125

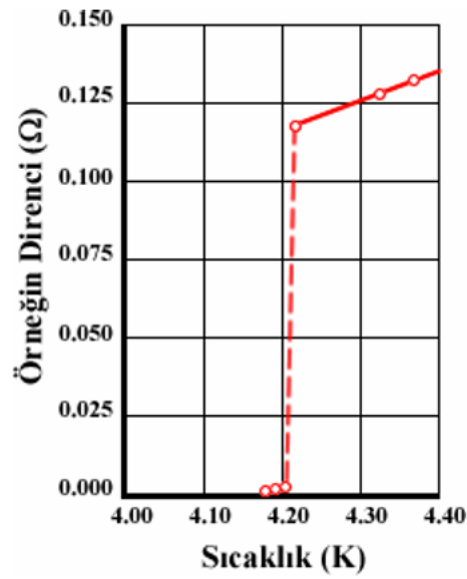


ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Süperiletkenlik tarihindeki keşifler	2
Çizelge 2.1 Bazı yüksek sıcaklık süperiletkenleri, kritik sıcaklıkları ve kristal yapıları.	16
Çizelge 2.2 YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} 'nun ab-düzlemi yönünde ve c-ekseni yönünde sıfır mutlak sıcaklıkta süperiletkenlik ana parametreleri.....	18
Çizelge 2.3 Diğer akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması.....	31
Çizelge 2.4 Farklı SHAS tiplerinin kıyaslanması	42
Çizelge 2.5 2004-2016 arası verilen SHAS projeleri.....	50
Çizelge 3.1 Manyetik akı transfer tipi SHAS'a ait detaylar.....	54
Çizelge 3.2 Demir nüveye ait ölçü parametreleri.....	58
Çizelge 3.3 Demir nüveye ait değerler.....	58
Çizelge 3.4 SHAS'a ait detaylar	61
Çizelge 3.5 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'da kullanılan demir nüveye ait değerler	65
Çizelge 3.6 2,5 kVA'lık trafoya ait detaylar	70
Çizelge 4.1 YBCO halkanın kritik akım değerinin teorik ve deneysel kıyaslaması.....	81
Çizelge 4.2 Yarıçapı 10 cm olan süperiletken halkanın sarım sayısına bağlı indüktans değerleri	82
Çizelge 4.3 Tek- fazlı SHAS'ın birincil ve ikincil tarafındaki bobinlere ait değerler	84
Çizelge 4.4 2,5 kVA tek- fazlı trafoya ait akım ve voltaj değerleri	85
Çizelge 4.5 Bobinlerde okunan akım ve voltaj değerlerinin isimlendirme ve kısaltmaları	88
Çizelge 4.6 Birincil ve ikincil taraftaki bobinlere ait değerler.....	111
Çizelge 4.7 3- fazlı 6 kVA'lık SHAS'ın birincil ve ikincil taraftaki bobinlerine ait değerler.....	119

1. GİRİŞ

Leiden Üniversitesi'nden Kamerlingh Onnes, 1911 yılında, 4,2 K'de civa (Hg) metali ile yaptığı bir çalışma sonucunda civa metalinin direncinin sıfıra düştüğünü gözlemlemiştir (Onnes 1911). Süperiletkenlik, sıcaklığın belli bir değerin altına düşmesi sonucunda direncin sıfır olması olarak tanımlanmıştır. Direncin gözlemlenmediği sıcaklık, kritik sıcaklık (T_c) olarak adlandırılmıştır. Şekil 1.1'de Hg'nin direnç-sıcaklık grafiği verilmektedir.



Şekil 1.1 Hg'nin direnç-sıcaklık grafiği (Ginzburg ve Andryushin 2004)

Bir malzemenin süperiletken olup olmadığını belirleyen iki önemli parametre vardır. Bunlar sıfır direnç özelliği ve diamanyetik özelliktir. Normal metallerde, safsızlıklar ve örgü kusurları gibi sebeplerden dolayı iletim elektronları bir dirençle karşılaşır. Süperiletken malzemelerde ise; elektronlar çiftler halinde herhangi bir dirençle karşılaşmadan yük taşırlar (Bardeen vd. 1957).

Süperiletkenlik keşfedildikten sonra bu alandaki çalışmalar gittikçe yoğunlaşmaya başlamıştır. Süperiletkenlik tarihindeki önemli gelişmeler çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1 Süperiletkenlik tarihindeki keşifler (Wesche 1998)

Yıl	Buluşlar
1908	Helyum'un (He) sıvılaştırılması
1911	4.2 K Civa (Hg) elementinde yapılan deneyler sonucunda H. Kammerlingh Onnes süperiletkenliği keşfi
1933	Süperiletken durum için, W. Meissner ve R. Ochsenfeld tarafından mükemmel diyamagnetizmanın bulunması
1935	Süperiletkenliğin teorik olarak açıklanması: London Teorisi
1950	Süperiletkenliğin kuantum teorisi ile açıklanması: Ginzburg-Landau Teorisi (Tinkham 1996)
1953	Kritik sıcaklığı 17, 1 K olan sahip V_3Si 'nin keşfi
1957	J. Bardeen, L. N. Cooper ve J. R. Schrieffer tarafından, süperiletkenliğin makroskopik teorisi "BCS Teorisi" olarak açıklanması
1961	Kuantumlanmış akı teorisinin deneysel olarak kanıtlanması.
1962	B. D. Josephson tarafından, Cooper Çiftleri'nin iki süperiletken malzeme arasından elektron tünellemesinin olacağının öngörülmesi.
1974	Nb_3Ge filmlerinin Püskürtme (Sputtering) yöntemi kullanılarak 23,2 K kritik sıcaklığa sahip olması
1986	Alex Müler ve Georg Bednorz'ün tarafından La-Ba-Cu-O sisteminde 30 K kritik sıcaklıkta süperiletken bileşiğinin yapılması
1987	92 K kritik sıcaklığa sahip $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ süperiletkenin keşfi
1993	135 K süperiletken özellik gösteren $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ süperiletkeninin keşfi
2001	J. Akimitsu ve arkadaşları tarafından Magnezyum Diboride (MgB_2) keşfi (Akimitsu vd. 2001)
2008	Hideo Hosono ve grubu, 26 K kritik sıcaklığa sahip La-O-F-Fe-As sisteminde süperiletkenlik özelliği gösterdiğini bulunması (Kamihara vd. 2008)
2010	Kritik sıcaklığı 56 K olan $Gd_{1-x}Th_xFeAsO$ malzemesinin keşfi

Süperiletken malzemeler elektrik enerjisi ve elektronik uygulamalarında kullanılan birçok geleneksel aygıtın özelliklerinin iyileştirilmesinde ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesinde kilit rol oynayabilecek üstün özelliklere sahiptir. Süperiletkenlerin sıfır DC direnç özelliği elektriğin kullanılmasında, dağıtılmasında ve üretiminde önemli verimlilik artışları sunmakla birlikte çok yüksek akım yoğunluklarının elde edilebilmesine de olanak sağlamaktadır. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ve MgB_2 tabanlı süperiletkenlerin özellikle uygulamada etkin olarak kullanılması süperiletken pazarını önemli derecede geliştirmektedir. Geniş bir uygulama alanına sahip olan bu süperiletkenler hatalı akım sınırlayıcılar, kryogenik elektromotorlar ve jeneratörler (uçaklar, gemiler, denizaltıların motor tahrik sistemlerinin geliştirilmesinde), sıvı gaz pompalama sistemlerinde, süperiletken manyetik enerji depolama sistemlerinde, rüzgar türbinlerinde prototip ve

Ar-Ge düzeyinde kullanılmaktadır (Prikhna vd. 2010, Meerovich ve Sokolovsky 2004, Hull ve Murakami 2004)

YBCO yüksek sıcaklık süperiletken ailesine çok büyük ilginin ana sebepleri; önemli yapısal zenginlikler göstermesi, süperiletkenlik üzerine değişik etkiler gösteren çok sayıda katkı elementlerinin olması, 92 K civarında T_c geçiş sıcaklığına sahip olması, güvenilir ve yeniden üretilebilir tek-faz bileşiğinin yapılabilmesidir. Ayrıca YBCO'nun çalışma sıvısı olan sıvı azot, sıvı helyuma göre çok daha ucuz ve belli bir dış sıcaklık ortamında sıvı helyumdan çok daha yavaş buharlaşmaktadır. Dolayısıyla çok daha ucuz ve daha az karmaşık sıcaklık sistemleri kullanılarak süperiletken uygulamaları yapılabilmesine olanak tanınması bakımından sıvı azot ortamı tercih edilmektedir.

Tüm dünyada elektrik iletimini ve kullanımını sağlayan güç/şebeke operatörleri kesintisiz ve güvenilir bir hizmet sunmalarını etkileyen bir dizi problemler ile karşılaşmaktadırlar. Her geçen gün artan talep, buna karşın eskiyen altyapı, yapısal reformların getirdiği belirsizlikler, kaçak kullanımın artması son yılların en önemli problemleri olarak görülmektedir. Bununla birlikte şebekelerde büyük hasara yol açabilecek en önemli problemlerden bir tanesi de akımın aniden beklenen değerlerden daha yüksek değerlere ulaşmasıdır. Günümüzde gelişen teknolojiyle talep edilen elektrik ihtiyacının artmasına bağlı olarak optimum koşullarda şebekenin ve buna bağlı cihazların aniden yükselebilecek akımlara karşı korunması için en etkili yol, bu anlık yüksek akımları sınırlandıran akım sınırlayıcı cihazların geliştirilmesidir. Bunlar arasında günümüzde en çok kullanılan cihazlar devre kesicilerdir. Devre kesicilerin birçok avantajı olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. En önemli dezavantajı şebekenin elektriğini tamamen kesmesidir. Bu da kullanıcıların istemediği bir durumdur. Günümüzde süperiletkenliğin de gelişimiyle birlikte süperiletken hatalı akım sınırlayıcılar, prototip olarak üretilmeye başlanmış ve dünyada belirli bölgelerde de test amaçlı kullanıma sunulmuşlardır. Bu sistemlerin en büyük avantajı; çok kısa sürede (birkaç periyot) hatalı akımı sınırlamayı başararak, şebekenin elektriğini kesmeden sürekliliği sağlayabilmeleridir. Ayrıca uzun süreli çok büyük hatalı akım durumlarında da devre kesicinin işini kolaylaştırmaktadırlar.

2. TEMEL KAVRAMLAR

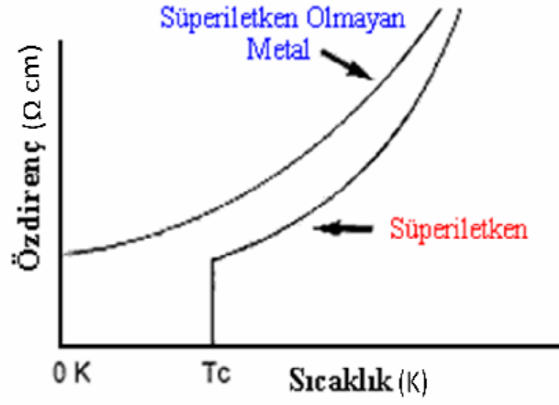
2.1 Süperiletkenlerde Sıfır Direnç Kavramı

Bir iletken içerisinde akan akım, iletkenlik elektronları aracılığıyla taşınır. Metallerde direncin oluşma sebepleri; elektronların termal titreşimler, kristal kusurları ve safsızlıklardan dolayı saçılmaya uğramasından kaynaklanmaktadır. İletim elektronları bu ortamlardan geçerlerken bir dirence maruz kalır. Sıcaklık azaldığında termal titreşimlerde azalacağı için iletkenlik elektronları daha az saçılmaya uğrarlar. Bir metalin sahip olduğu toplam direnç, Matthiessen kuralına göre; fononlardan gelen katkı ve örgü kusurlarından gelen katkının toplamından oluşur (Poole 1995).

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_f(T) \quad (2.1)$$

ρ_0 ; sıcaklıktan bağımsız olarak örgü kusurlarından gelen katkı, $\rho_f(T)$; fononlardan gelen ve sıcaklığa bağlı olan katkıyı ifade etmektedir. $\rho_f(T)$ terimi, düşük sıcaklıklarda T^5 ile orantılı olup, yüksek sıcaklıklarda T sıcaklığıyla orantılıdır (Poole 1995).

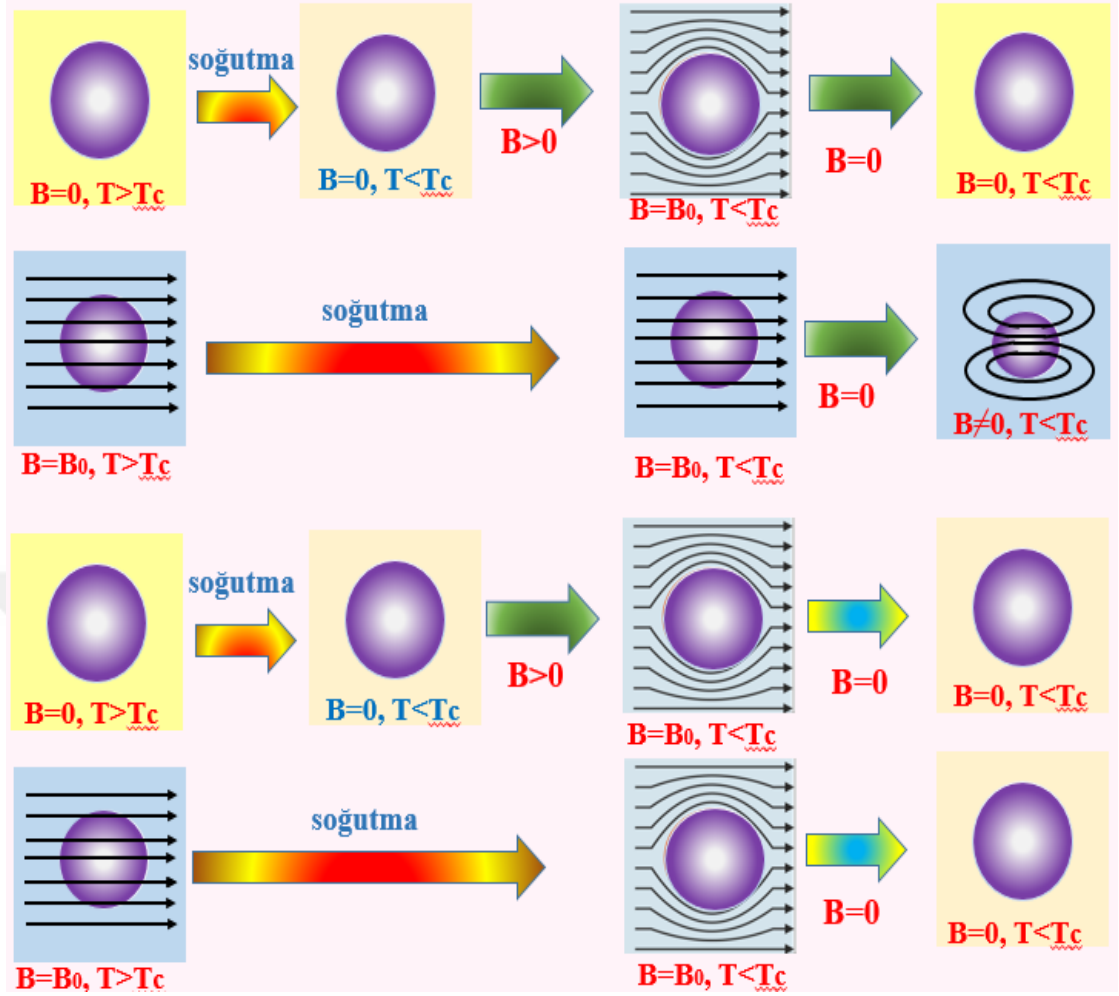
Süperiletkenlerde kritik sıcaklık T_c olarak adlandırılır. Belli bir sıcaklık değerinin altında elektriksel direnç sıfır olur ve süperiletken malzeme içerisinde akım çok uzun bir süre kayıpsız bir şekilde akmaya devam eder. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin tanecikli yapısından dolayı, bu tanecikler arası bağlantı kurulduğu zaman sıfır direnç değerine sahip olacaklardır. Bu durumda elektronlar, Cooper çiftlerini oluştururlar ve kristal yapı içerisinde hiçbir saçılmaya uğramadan hareket ederler. Şekil 2.1'de süperiletken malzeme ve süperiletken olmayan metalin öz direnç sıcaklık grafiği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Metal ve süperiletkenin özdirenç-sıcaklık grafiği

2.2 Meissner Etkisi

İdeal bir iletkeni dış manyetik alanın olmadığı bir ortamda kritik sıcaklığın altına kadar soğutup sonrasında bir manyetik alan uygulanırsa bu durumda süperiletkene nüfuz eden alan, uygulanan manyetik alanın tersi yönünde bir manyetik alan meydana getirerek süperiletkenin yüzeyinde bir akım indükler. Bu oluşan yüzey akımları, süperiletken malzemelerde Lenz yasası gereği zıt yönde bir mıknatıslanma oluşturur. Bu durumun oluşması malzemenin iç kısmında toplam manyetik alan değerini sıfır yapar. Şekil 2.2’de süperiletkenin dış manyetik alanını dışarladığı gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Süperiletkenin manyetik alandaki davranışı

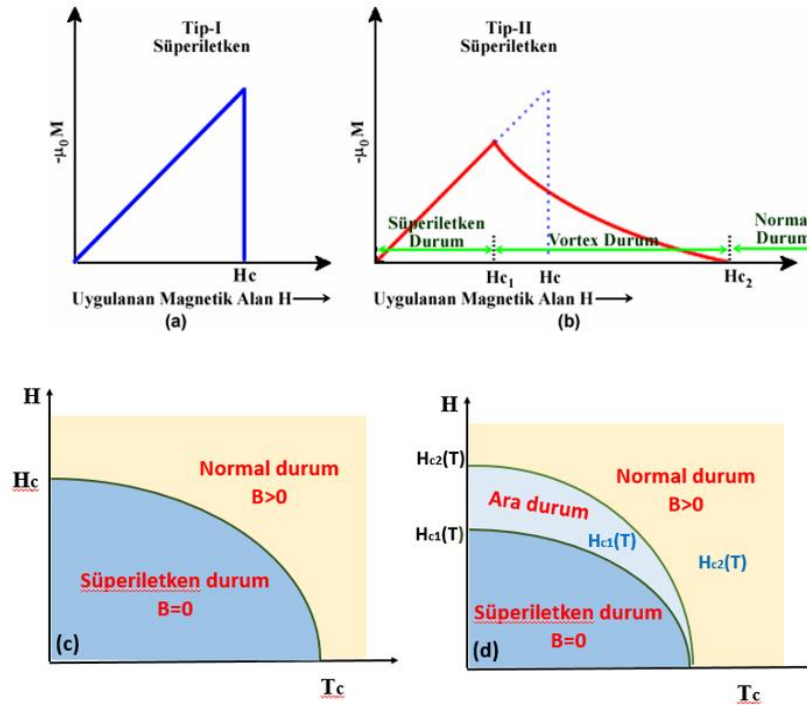
Eğer süperiletkenin sıcaklığı kritik sıcaklığın üstüne çıkarılarak ($T > T_c$) normal duruma dönüştürülürse, manyetik alan tamamen malzeme içerisine nüfuz eder. Yeniden malzeme kritik sıcaklık değerinin altına kadar soğutursa bu durumda manyetik alan, malzemenin içerisinde kalır.

W. Meissner ve R. Ochsenfeld, 1933 yılında, süperiletken malzemeye dışardan manyetik alan uygulandığında ve kritik sıcaklığın altına kadar soğutulduğunda, oluşan bu manyetik akıyı dışarlayarak, süperiletken malzemenin ideal bir diyamanyetik özellik gösterdiğini keşfetmişlerdir (Meissner ve Ochsenfeld 1933).

2.3 I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler

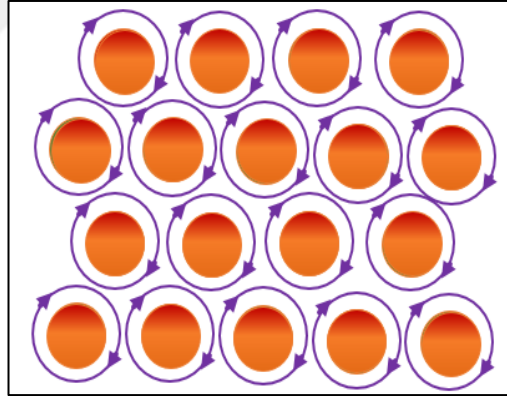
Süperiletkenler, I. tip süperiletkenler ve II. tip süperiletkenler olmak üzere manyetik alana göstermiş oldukları davranışlara göre iki gruba ayrılır. I. tip süperiletkenler, Niobiyum ve Vanadyum dışındaki bütün süperiletken elementlerden oluşurken, II. tip süperiletkenler, Nb_3Sn , $NbTi$ gibi alaşım ve geçiş metalleri ve yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS) olarak isimlendirilen grubun tamamını içerir.

I. tip süperiletken malzemeler, kritik manyetik alan (H_c) değerine kadar Meissner etkisi gösterirken, H_c değerinden daha büyük manyetik alan değerlerinde süperiletken durumun aniden ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. II. tip süperiletkenlerde ise; iki tane kritik manyetik alan değeri vardır. I. tip süperiletkenlerde, eş uyum uzunluğu (ξ) sızma derinliğinden (λ) daha büyüktür. Şekil 2.3’ de I. tip ve II. tip süperiletkenlerin uygulanan manyetik alandaki mıknatıslanma eğrileri ve faz diyagramları gösterilmektedir.



Şekil 2.3.a I. tip, b. II. tip bir süperiletkenin uygulanan manyetik alandaki mıknatıslanma eğrileri, c. I. tip, d. II. tip süperiletkenlerin faz diyagramı (Kittel 1996)

II. tip süperiletkenler alt kritik alan (H_{c1}) değerine ulaşınca kadar uygulanan manyetik alanın hepsini dışarlarlar. H_{c1} değerini geçtikten sonra uygulanan dış manyetik alanın, bir kısmı süperiletken tarafından dışarlanırken bir kısmı malzemenin içerisine girer. Uygulanan alan H_{c1} ile H_{c2} değerleri arasındaysa, manyetik alan süperiletkene akı çizgileri ve akı girdapları şeklinde girer. Uygulanan manyetik alan değerinin artmasıyla birlikte akı çizgilerinin sayıları giderek artar ve sonrasında oluşan girdaplar birleşerek süperiletken malzemenin normal duruma geçmesine sebep olurlar. Yani uygulanan manyetik alan değeri, üst kritik manyetik alanı (H_{c2}) geçtikten sonra girdap örgüsü artar ve komşu girdaplar arasındaki mesafe ξ 'nin boyutunda olur. Bu durumda malzeme süperiletken durumdan çıkar ve normal duruma dönüşür. Şekil 2.4'de renkli daireler şeklinde gösterilen girdap korları, süperiletken özellik göstermezlerken, üçgensel bir örgü oluşturan girdaplar ise; süperiletken özellik gösterirler. II. tip süperiletkenlerde H_{c1} değeri düşükken, H_{c2} değerleri yüksektir ve eş uyum uzunluğu sızma derinliğinden daha küçüktür (Yılmaz 2008).

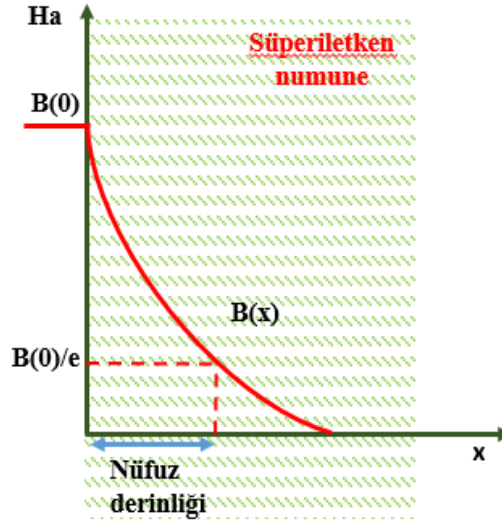


Şekil 2.4 II. tip bir süperiletkenin girdap durumu

2.4 Nüfuz (Sızma) Derinliği (λ)

London nüfuz derinliği (λ_L) ve koherens (eşuyum) uzunluğu (ξ), süperiletkenlikteki karakteristik uzunluklardır. Süperiletkenlerin diyamanyetik özelliğinden kaynaklı olarak, akımlar malzemenin yüzeyinden akarlar. Fakat gerçekte bu akımlar, yüzeyin bir kalınlığının olmamasından dolayı tam olarak yüzeyden akamazlar. Süperiletken malzemenin yüzeyinden akan akımlar yaklaşık olarak 10^{-5} cm kadarlık derinlikte

akırlar. Uygulanan bir manyetik alan, süperiletken bir malzemenin yüzeyinden içeri girer ve belli bir mesafe aldıktan sonra sıfırlanır. Alınan bu mesafe nüfuz etme derinliği olarak tanımlanır. Bu olay, 1935 yılında London kardeşler tarafından bulunmuştur (London ve London 1935). Şekil 2.5’de uygulanan manyetik alanın süperiletkene sızması gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Manyetik alanın numune içine nüfuz etmesi

Manyetik alan (B_0), numune yüzeyine paralel olacak şekilde uygulanırsa; malzeme yüzeyinden iç kısma olan uzaklık; x , sızma derinliği; λ ve son olarak malzemenin derinlerindeki manyetik alan değeri; B alınırsa;

$$B(x) = B_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (2.2)$$

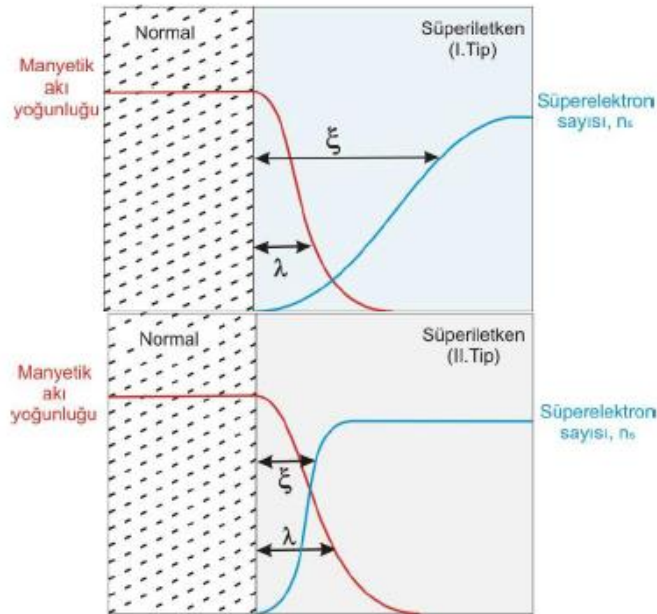
şeklinde değişir. Denklemden de görüldüğü üzere manyetik alan numune içerisinde üstel azalarak değişir.

$$\lambda(T) = \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de λ_0 ; sıfır Kelvin'deki nüfuz etme derinliğidir. Süperiletken bir malzemedeki sızma derinliği, süperiletkenin cinsine ve sıcaklığa bağlı bir parametre olarak değişkenlik göstermektedir. Kritik akım sıcaklığı olan T_c 'ye yaklaştığında nüfuz etme derinliği sonsuza gider. $T=T_c$ durumunda, malzeme süperiletken durumdan çıkar ve uygulanan manyetik alan malzeme içerisine kayıpsız bir şekilde girer.

2.5 Uyum (Koherens) Uzunluğu (ξ)

1953 yılında Pippard tarafından öne sürülen eş uyum uzunluğunu, Cooper çiftini oluşturan elektronların bir arada bulunabileceği uzunluk olarak tarif etmek mümkündür. Normal bölgedeki süperiletken elektronların sayısı sıfır iken, süperiletken bölgede bulunan süperiletkenlerin sayısı n_s kadardır ve süperiletken bölge ve normal bölge birbirinden keskin bir şekilde ayrılmaz. Bu durumda uyum uzunluğu, süperiletkenliğin oluşturulduğu ve yok edildiği en küçük boyuttur. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere, bir süperiletken malzemenin I. tip veya II. tip olduğunu eş uyum uzunluğu ve sızma derinliği arasındaki ilişkiye bakarak anlayabiliriz.



Şekil 2.6 I ve II. tip süperiletkenlerde uyum uzunluğu ve nüfuz etme derinliği(Rose-Innes ve Rhoderick 1994)

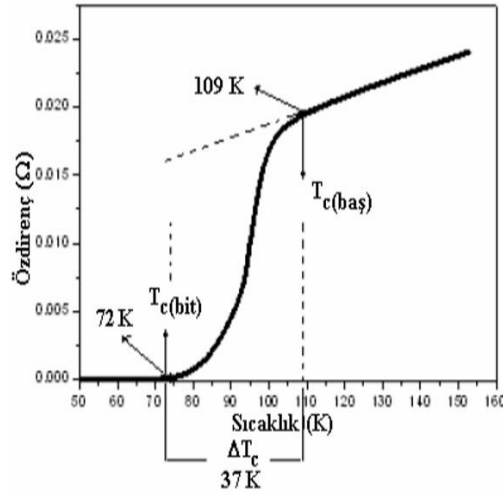
Eş uyum uzunluğu, metallerde bulunan safsızlıklardan ve örgü kusurlarından negatif bir şekilde etkilenir. Çünkü böyle bir durumla karşılaşan normal elektronlar için ortalama serbest yol kısalır ve eş uyum uzunluğunda bu duruma bağlı olarak azalır. Yani; eş uyum uzunluğu ne kadar büyükse malzemenin süperiletkenlik özellikleri de o kadar iyidir diyebiliriz. Nüfuz etme derinliği ile eş uyum uzunluğu ters orantılı olduğundan safsızlıklar ve örgü kusurları gibi durumlarda nüfuz etme derinliği artar (Rose Innes ve Rhoderick 1994).

2.6 Süperiletkenliğe Ait Parametreler

2.6.1 Kritik sıcaklık (T_c)

Kritik sıcaklık süperiletken bir malzemenin temel parametrelerinden bir tanesidir. Süperiletken bir malzemenin kritik sıcaklık değerinin altına kadar soğutulduğunda direncinin aniden sıfıra düştüğünü ve uygulanan manyetik alanı dışarladığı görülmüştür (Rose-Innes ve Rhoderick 1994).

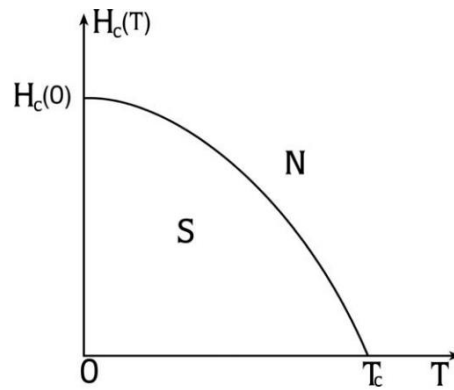
Süperiletkenlerin kritik sıcaklık değeri başlangıç sıcaklığı $T_{c(baş)}$ ve bitiş sıcaklığı $T_{c(bit)}$ olmak üzere iki şekilde isimlendirilir (Şekil 2.7). Direnç-sıcaklık grafiğinde doğrusallığın bozulduğu sıcaklık başlangıç sıcaklığı olarak belirlenirken, direncin sıfır olduğu sıcaklık bitiş sıcaklığı olarak tanımlanır. Başlangıç sıcaklığı ve bitiş sıcaklığı arasındaki fark, geçiş sıcaklık aralığı (ΔT_c) olarak isimlendirilir. Saf bir malzemede bu aralık dardır ve II. tip süperiletkenlerde bu aralık I. tip süperiletkenlere göre daha geniştir.



Şekil 2.7 Gümüşün öz direncinin sıcaklığa bağlı değişimi

2.6.2 Kritik alan (H_c)

Süperiletken bir malzemeye dışardan bir manyetik alan uygulandığında manyetik alanı dışarladığı görülmüştür. Fakat uygulanan manyetik alanın değeri artırılmaya başlandığında numune belli bir değere kadar süperiletkenlik özelliklerini korumaya devam eder, uygulanan manyetik alan değeri artırılarak kritik değeri aşması durumunda ise; malzeme süperiletken durumdan çıkarak dirençli duruma geçer. Bir süperiletkenin kritik manyetik alanının sıcaklığa bağlı grafiği şekil 2.8’de verilmektedir.



Şekil 2.8 Süperiletkenin kritik manyetik alanının-sıcaklık grafiği

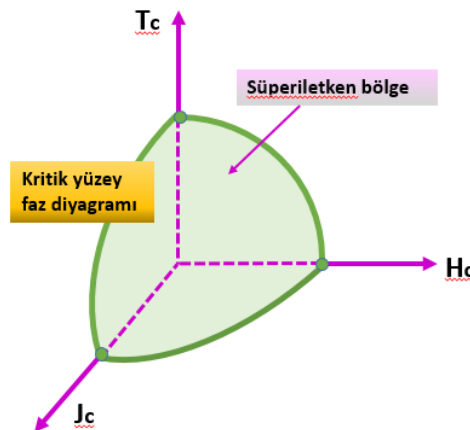
Süperiletkenliğin bozulduğu kritik alan değerine kritik manyetik alan (H_c) denir. Kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlı değişimi denklem (2.4)’ de verilmiştir.

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

Burada $H_c(0)$, mutlak sıfır sıcaklığı için, kritik manyetik alan değerini ifade ederken, sıcaklık kritik sıcaklık değeri olan T_c 'ye yaklaştıkça, kritik manyetik alan değerinin azaldığı denklemden görülmektedir. Sıcaklık T_c değerine eşit olduğunda $H_c(T)=0$ olduğu ve uygulanan manyetik alanın numunenin içerisine tamamen nüfuz ederek süperiletkenlik özelliğini bozduğu görülmektedir.

2.6.3 Kritik akım yoğunluğu (J_c)

Süperiletken bir malzeme için kritik akım yoğunluğu, dirençsiz olarak taşınabilecek elektrik akımının maksimum değeri olarak ifade edilir ve J_c ile gösterilir. Kritik akım yoğunluğu, perdeleme akımı ve geçiş akımlarının toplamına eşittir. Perdeleme akımları, manyetik alan uygulamasıyla oluşurken, geçiş akımları ise bir dış kaynak tarafından oluşturulur. Eğer süperiletken içerisinde Cooper çiftlerinde bozulmalar olursa, malzeme süperiletken durumdan çıkarak normal bir iletken gibi davranır. Kritik sıcaklık, kritik manyetik alan, kritik akım yoğunluğu birbirine bağımlı olan parametrelerdir. Şekil 2.9'da süperiletkenlik faz diyagramına bakıldığında zaman kritik akım yoğunluğunun sıcaklık yükseldiği zaman azaldığı görülür.



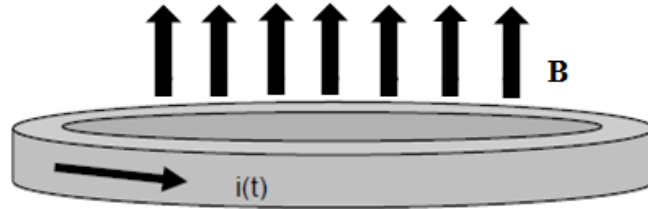
Şekil 2.9 Süperiletkenlik faz diyagramı

2.7 Süperiletken Halka Fiziği

Bu tez çalışması esnasında süperiletken halka kullanıldığı için süperiletken halka fiziği hakkında bilgiler verilecektir. Bir süperiletken halkaya, $T > T_c$ sıcaklığında iken, manyetik alan uygulanırsa, manyetik alan çizgileri halkanın içerisinden geçer. Eğer halka T_c sıcaklığına kadar soğutulup süperiletken faza geçmesi sağlanır ve sonrasında uygulanan dış manyetik alan ortadan kaldırılırsa azalan manyetik akıyı karşılamak için Faraday yasasına göre halkada bir akım indüklenir (Şekil 2.10). Süperiletken halka boyunca elektrik alanın çizgisel integrali (kapalı yol boyunca);

$$\oint E \cdot dl = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Eğer halka sonlu bir R direncine sahip olsaydı, halkanın sahip olduğu indüktans değeri L olmak üzere L/R mertebesinde bir süre içerisinde halkada oluşan manyetik akı sonlanacaktı. Süperiletken halkada direnç $R=0$ olduğundan akının sıfırlanması sonsuza kadar devam edecektir (Schmidt ve Campman 1997).



Şekil 2.10 Manyetik alan içerisinde süperiletken halka (Ertekin 2016)

Elektrik akımı gibi manyetik akı da kesikli değerler alabilmektedir. Süperiletken halkadan geçen manyetik akı $\phi = B \cdot A$ kadar kuantumlanmıştır. ϕ_0 temel akı kuantumu ve n tamsayı olmak üzere halkadan geçen manyetik akı $\phi = n\phi_0$ olarak ifade edilir ($\phi_0 = hc/2e$). Kritik manyetik akı ($\phi_c = B_c \cdot A$) değeri aşıldığında süperiletken durumdan normal duruma geçiş gerçekleşecektir.

2.8 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri (YSS)

1986 yılında, Alex Müller ve George Bednorz, 30 K'de kırılğan bir süperiletken seramik sentezlediler. Müller ve Bednorz'un ürettiği, La-Ba-Cu-O bileşiğinin keşfiyle birlikte; Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlik (YSS) dönemi başlamış oldu.

C.W.Chu, M.K.Wu ve bir grup araştırmacı, 1987 yılında, Lantanyum yerine Yttriyum koyarak kritik sıcaklığı 92 K olan, YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) bileşiğini elde ettiler. Böylece süperiletken malzemeleri, daha pahalı olan helyumla çalışan soğutucular yerine sıvı azotla çalışan soğutucularla çalışmak mümkün hale geldi.

Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerinin sahip olduğu bir takım özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Tixador 1995).

- Bu bileşiklerin, tanecikli veya seramik yapıya sahip olma özellikleri vardır.
- YSS'in tamamında bakır-oksijen tabakaları vardır ve kritik sıcaklıkları bu tabakaların konumlarıyla ilişkilidir. Bu tabakaların yerine başka atomlar konulursa süperiletkenlik tamamen yok olmaktadır.
- Bu süperiletkenlerin oda sıcaklığında sahip oldukları öz dirençleri bakırdan 100 kat daha büyüktür.
- Anizotropik özelliğe sahiptirler

Bednorz ve Müller'in, $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}$ süperiletkeninin buluşundan sonra YSS üzerinde çalışmalar devam etmiştir. Çizelge 2.1'de bazı yüksek sıcaklık süperiletkenleri, kritik sıcaklıkları ve kristal yapıları verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı yüksek sıcaklık süperiletkenleri, kritik sıcaklıkları ve kristal yapıları

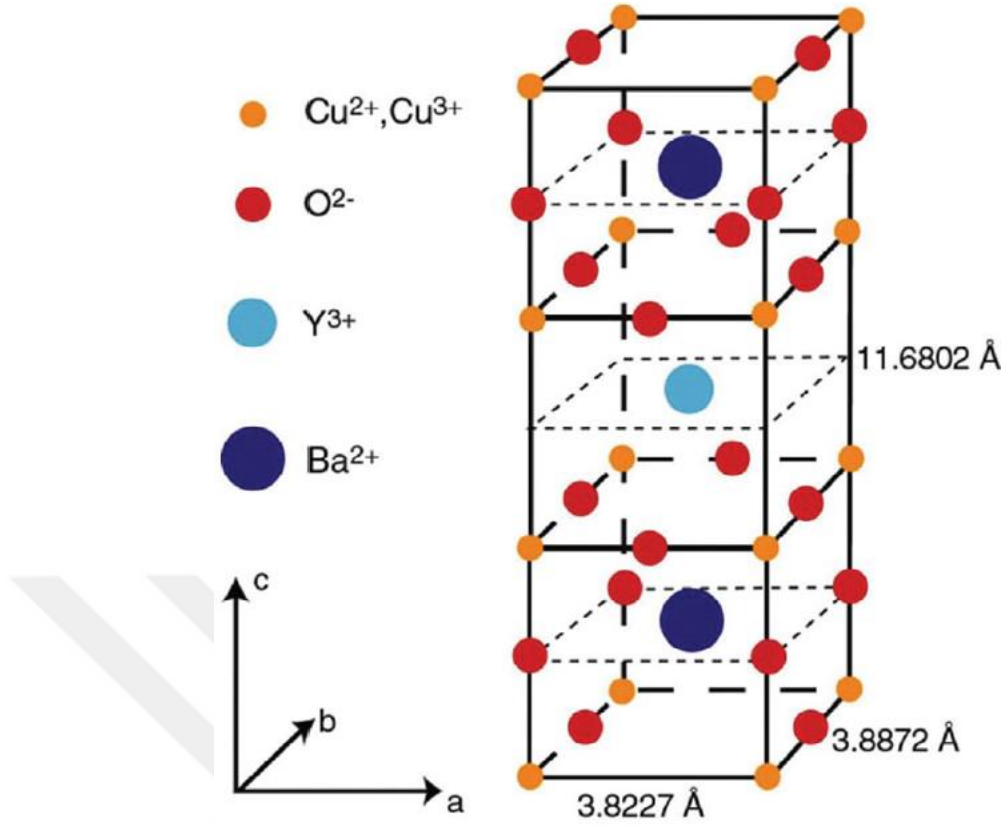
Bileşik	Formül	T _c (K)	Kristal yapısı
Y-bazlı	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92	Ortorombik
Bi-bazlı	Bi ₂ Sr ₂ CuO ₆	20	Tetragonal
	Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	85	Tetragonal
	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₆	110	Tetragonal
Tl-bazlı	Tl ₂ Ba ₂ CuO ₆	84	Tetragonal
	Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₈	108	Tetragonal
	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	Tetragonal
	TlBa ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₁₁	122	Tetragonal
Hg-bazlı	HgBa ₂ CuO ₄	94	Tetragonal
	HgBa ₂ CaCu ₂ O ₆	128	Tetragonal
	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	134	Tetragonal

2.8.1 YBCO Süperiletkeni

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO), 1987 yılında Wu tarafından keşfedilmiş Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri arasında ilk üretilen malzemelerden biri olup, hala üzerinde yoğun bir şekilde çalışmalara devam edilmektedir (Wu vd. 1987).

YBCO bileşiği, Y₂O₃, BaCO₃ ve CuO bileşiklerinin stokiometrik oranlarda karıştırıldıktan sonra bir dizi ısıtma işlemine tabi tutulmasıyla üretilen II. tip bir süperiletkenidir. Kritik akım sıcaklığı yaklaşık olarak 92 K'dir.

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere YBCO'nun yapısında CuO zincirleri ve CuO₂ düzlemleri bulunur. YBCO bileşiği, tetragonal (a=b≠c) ve ortorombik (a≠b≠c) olmak üzere iki yapıda üretilir. Eğer oksijen konsantrasyonu (δ≤1) düşükse bu durumda, oksijen atomları CuO düzlemlerindeki Cu atomları arasına rasgele bir şekilde dağılarak tetragonal yapının oluşmasını sağlarlar. δ'nın değeri sıfıra yakınsa yani, oksijen atomları CuO düzlemlerindeki Cu atomlarının arasına b ekseninde düzenli bir şekilde yerleşmişlerse ortorombik bir yapıyı oluştururlar. Şekil 2.11'de YBCO'nun kristal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.11 YBCO süperiletkeninin kristal yapısı (Çelik 2006)

YBCO nun birim hücre parametreleri, $a=b=3,88 \text{ Å}^0$, $c=11,79 \text{ Å}^0$ (Tetragonal), $a=3,82 \text{ Å}^0$, $b=3,89 \text{ Å}^0$, $c=11,68 \text{ Å}^0$ (ortorombik) , $c/a \approx c/b \approx 3,84$ olarak verilir. Üretilen YBCO malzemeleri, eğer oksijence fakir bir ortamda yapılmışsa tetragonal bir yapıya sahip olur. Ortorombik bir yapının oluşması için, oksijence zengin bir ortamda YBCO numunelerin üretilmesi gerekir. Örneğin boyutlarına göre değişen süre boyunca yaklaşık $400^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta numunelere oksijen verilmelidir ki optimum oksijen içeriğine sahip numuneleri elde etmek mümkün olsun (Çelik 2006). Eğer oluşan manyetik akı, ab düzleminde ve c- ekseninde farklılık gösterirse, üretilen YBCO yüksek anizotropiye sahip olur. YBCO'nun karakteristik özellikleri çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.2 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 'nun *ab*-düzlemi yönünde ve *c*-ekseni yönünde sıfır mutlak sıcaklıkta süperiletkenlik ana parametreleri (Singh 1989, Ginsberg 1994, Poole 2000)

Parametreler	Değerler
Kritik akım sıcaklığı	T _C =92K
Nüfuz etme derinliği	$\lambda_{ab}(0) \approx 120 \text{ nm}$ (ab-düzlemi) $\lambda_c(0) \sim 800 \text{ nm}$ (c eksen)
Koherens uzunluğu	$\xi_{ab}(0) = 2 \text{ nm}$ (ab-düzlemi) $\xi_c(0) = 0,4 \text{ nm}$ (c eksen)
Isı iletkenliği (300K)	$3.2 \times 10^{-2} \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Isı sığası	3.39 J/gK
Kritik akım yoğunluğu J _C (0)	J _C (0)= $3-12 \times 10^8 \text{ (A/cm}^2\text{)}$ (ab-düzlemi) J _C (0)= $5-25 \times 10^7 \text{ (A/cm}^2\text{)}$ (c eksen)
Kritik manyetik alan H _C (0)	$1-3(10^4 \text{ Oe})$ (ab-düzlemi ve c eksen)
Alt kritik manyetik alan H _{C1} (0)	$20-230(10^4 \text{ Oe})$ (ab-düzlemi) $80-90(10^4 \text{ Oe})$ (c eksen)
Üst kritik manyetik alan H _{C2} (0)	$230-624(10^4 \text{ Oe})$ (ab-düzlemi) $70-122(10^4 \text{ Oe})$ (c eksen)

YBCO'ya yapılan katkılama işlemlerinin temelde iki sebebi vardır. Bunlardan ilki; (Kritik Sıcaklık *T_C*, Kritik Alan *H_{C1,2}*, Kritik Akım Yoğunluğu *J_C* vb.) süperiletkene has özelliklerini değiştirmek ve böylece o malzemeye ait süperiletkenlik mekanizması ile ilgili olarak daha fazla bilgiye sahip olmak. İkincisi ise; malzemenin yoğunluk, tanecik yapısı ve kırılgenlik gibi fiziksel özelliklerini değiştirerek süperiletken malzemeyi incelemektir. YBCO-123 bileşimine hem anyonik hem de katyonik katkılamalar yapılmıştır (Bilgeç 2004)

YBCO süperiletkeni süperiletken durumdan normal duruma geçtiği zaman bir dirence sahip olur. Burada süperiletken durumdaki direnç denklem (2.6)'daki güç kanunuyla ifade edilmiştir (Seeber 1998).

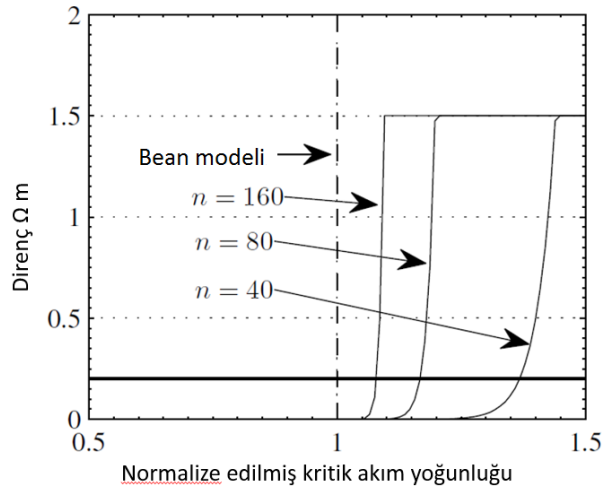
$$\rho_{si} = \frac{E_C}{J_C} \left(\frac{J}{J_C} \right)^{n-1} \quad (2.6)$$

Burada kritik elektrik alanın $E_C = 1 \mu\text{V/cm}$ olduğu durumda kritik akım yoğunluğu J_C olarak verilir. Burada n diklik parametresi olarak ifade edilir. DSS malzemelerinde n değerlerinin 40 aştığı ve hatta 130 olduğunu söyleyen kaynaklar vardır (Inoue vd. 1995, Paasi ve Korpela 1999). BSCCO şeritlerde ise; n değerinin 10-20 (Rabbers vd. 2004, Zhang vd. 2004). YBCO'da bu değer 30 üzeri olduğu bilinmektedir (Rupich vd. 2003, Schoop vd. 2005). Bu n - değeri, malzemeden malzemeye değişiklik gösteren bir sabittir (Warnes ve Larbalestier 1997). Bir iletkenin n -değeri, iletken boyunca homojen olmayan kısımlar varsa azalır (Stenvall vd. 2007).

YBCO uygulamalarında, kritik sıcaklık değeri olan T_C geçildiği zaman ρ_n direncine sahip olur. Diğer taraftan, yüksek kritik akım yoğunluğunda, güç kanunu normal direnç değerinden daha yüksek bir direnç değeri ortaya koyar. Bu yüzden YBCO'nun sahip olduğu bütün direnç denklem (2.7)'de gösterilmiştir.

$$\rho_{YBCO} = \min(\rho_n, \rho_{si}) \quad (2.7)$$

YBCO'nun nispeten yüksek n - değerinden dolayı, güç kanunu için bir alternatif olarak Bean modeli güvenli bir şekilde kullanılabilir (Bean 1964). Aslında Bean modeli, güç kanununun özel bir durumudur, burada $n \rightarrow \infty$ iken, J değeri, 0 veya J_C olarak iki değerde sınırlandırılır. Güç kanunu ve Bean modeli şekil 2.12'de karşılaştırılmaktadır.

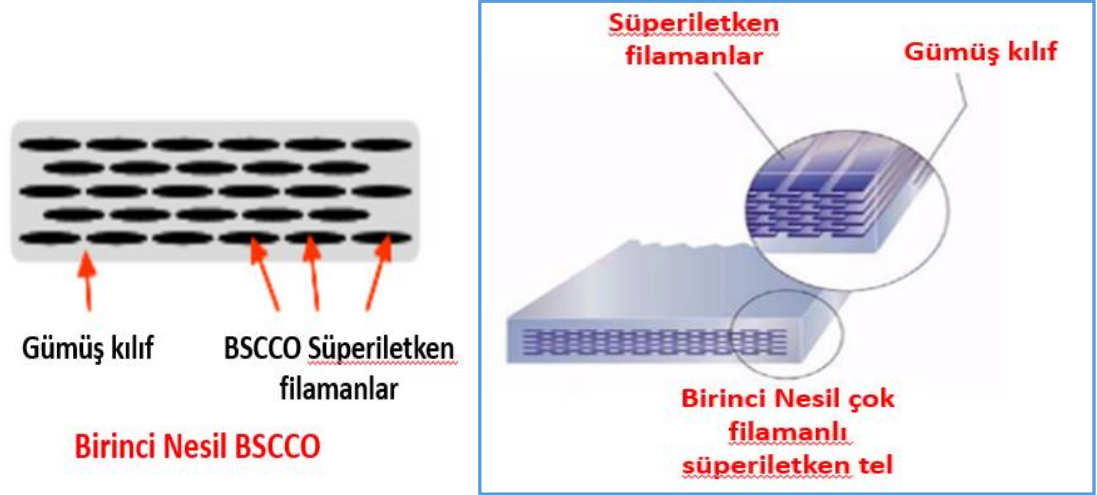


şekil 2.12 YBCO'nun normalize edilmiş kritik akım yoğunluğunun dirence bağlı grafiği (Iwasa 1994)

2.9 Birinci ve İkinci Nesil Teller

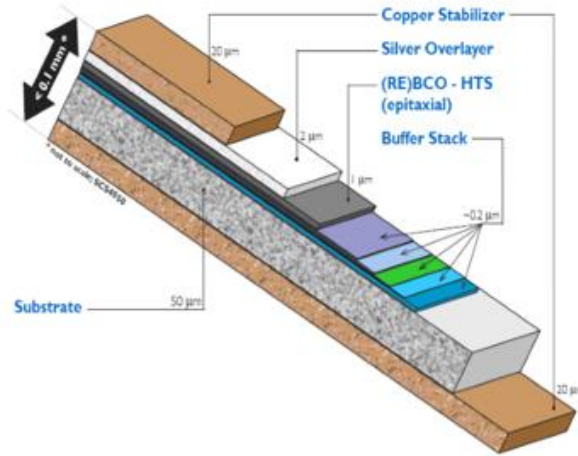
Birinci nesil süperiletken şeritler olarak isimlendirilen teller, tüp içinde toz metoduyla (PIT-powder-in-tube)  retilen ve yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip teller olarak piyasaya sürülmüştür. Bu teller, Ag tüpün içerisine kritik sıcaklıkları sırasıyla 90 K ve 110 K olan Bi-2212 veya $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ süperiletken tozları konularak üretilir. Bu teknikte tellere ardışık termomekanik işlemler yapılır. Her tekrarlamada bir haddemeleme artı BSSCO fazının yoğunlaştırılması ve tek eksenli yapısına katkıda bulunması için kullanılan bir dizi ısıtma işlem sıralamasından oluşur. BSSCO tel çok uzun boylarda üretilse bile süperiletkenlik özelliklerinin çok iyileştirilememesi ve ticari açıdan fiyatının çok maliyetli olması gibi dezavantajları vardır. (Wu vd. 2002, Kang vd. 2002). Ayrıca; NbTi ve Nb_3Sn gibi çok filamanlı formları yapılmıştır. Bu telleri oluşturmak için, birçok süperiletken filamanlar normal metal bir matris içine konulmuştur.

American Superconductor (AMSC)  rettiği birinci nesil süperiletken tel şekil 2.13'de gösterilmektedir.



Şekil 2.13 AMSC'nin ürettiği birinci nesil süperiletken tel

İkinci nesil şerit olarak isimlendirilen kaplamalı süperiletkenler, üç önemli parametreyle karakterize edilirler. Bu parametreler; kritik akım yoğunluğu olan J_c , birim genişlik başına kritik akım I_c , ve tersinmezlik manyetik alanı olan H_t dir. $4-7 \text{ MA/cm}^2$ yüksek J_c ' ye sahip ve birkaç yüz nanometre kalınlığında YBCO ince filmler yapmak için geliştirilmiş çok fazla sistem vardır. Yüksek akım yoğunluğuna sahip olan şeritler elde etmek için, kritik akım değerinin yaklaşık olarak $200-300 \text{ A/cm-genişlik}$ olması gerekir. $1 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlıktaki ince film formu, 77 K 'de, $H_{dış} = 0$ da ve 3 MA/cm^2 de yüksek kritik akımların taşınmasını sağlar. Ayrıca şerit üreten firmalar, 77 K de, kritik akım değeri $500-1000 \text{ A/cm-genişlik}$ aralığında bir değere sahip yeterli kalınlıkta ince filmleri üretmek istemektedir. Bu kritik değere sahip, büyük uzunluklarda, kabul edilebilir J_c değerinde, YBCO kaplamalı süperiletken üretmek için, J_c değerini negatif yönde etkileyecek olan büyük açılı tanecik sınırı sayısının azaltılması gerekir. American Superconductor (AMSC) ikinci nesil telleri metal- organik biriktirme yöntemini (metal-organic deposition (MOD)) kullanarak üretmişlerdir (Malozemoff vd. 2008, Rupich vd. 2007). Bu işlemde 4 cm genişliğinde şerit üretildikten sonra bu şerit $4,4 \text{ mm}$ veya $4,8 \text{ mm}$ genişliğinde kesilerek ikinci nesil teller üretilir. AMSC, 77 K de, $250 \text{ A/cm-genişlik}$ kritik akıma sahip, $80-100 \text{ m}$ arasında değişen uzunluklarda şeritler üretmektedir (Li vd. 2009). Ayrıca; AMSC aynı boyutlara sahip bakır telin elektrik akımından 100 katı akım taşıma yeteneğine sahip teller ürettiklerini bildirmişlerdir (<http://www.amsc.com/products/amperiumwire/> 2016b). Şekil 2.14'de SuperPower'ın ürettiği (SCS4050) YBCO şerit gösterilmektedir.



Şekil 2.14 SuperPower'ın ürettiği SCS4050 süperiletken tel (<http://www.superpower-inc.com> 2016c)

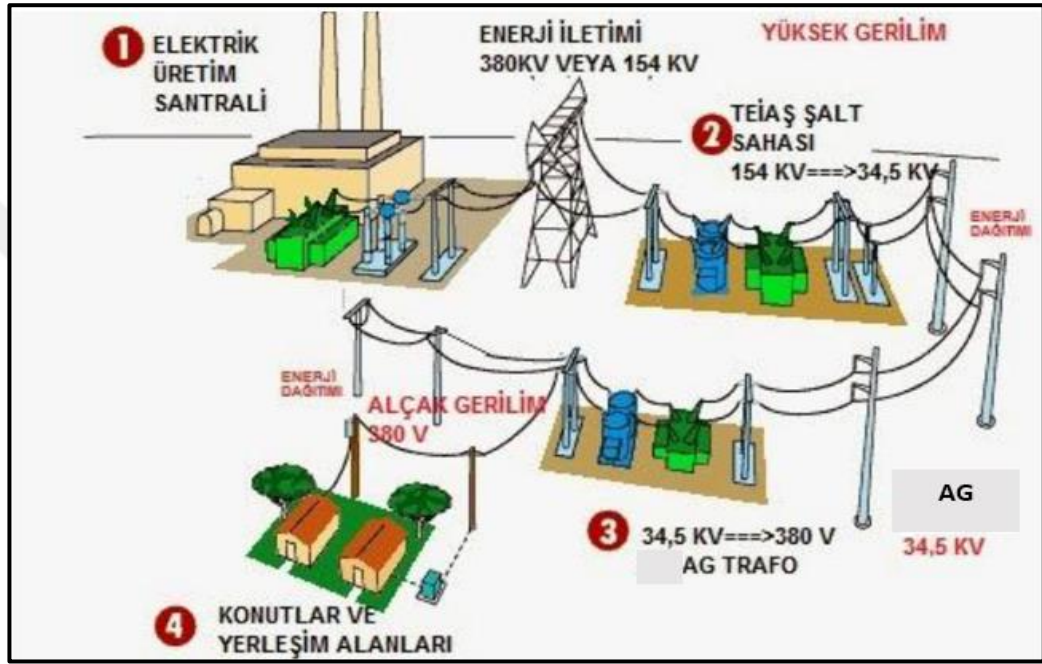
SuperPower kritik akım yoğunluğu 300 A/cm-genişlik değişen aralıklar da 100-300 m aralığında YBCO şerit üretmişlerdir (<http://www.superpower-inc.com> 2016c). YBCO'nun ucuz maliyetli olması, geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olması, manyetik alanda iyi bir performansa sahip olması gibi özellikleri vardır. Ek olarak; YBCO şeritin geniş yüzey alanı S-N geçişinden sonra çok hızlı bir şekilde soğumayı sağlar. Fakat üretim aşaması oldukça karmaşıktır. Bu şeritler bakır stabilizatör olmasından dolayı S-N geçişi olduğunda düşük dirence sahip olur. SHAS uygulamalarında istenen direnci sağlamak için büyük uzunluklara ihtiyaç duyulur (Pei 2012).

2.10 Hatalı Akım Sınırlayıcılar

2.10.1 Elektrik enerjisinin iletilmesi ve dağıtılması

Bir ülkenin veya bir bölgenin elektrik ihtiyacını kesintisiz bir şekilde karşılamak için o ülkenin veya bölgenin trafo merkezleri, elektrik santralleri ve tüketicileri arasında kurulmuş olan sisteme enterkonnekte sistem adı verilir. Elektrik üretim santralleriyle tüketim merkezleri arasındaki mesafe oldukça fazladır. Bu iki sistem arasındaki bağlantı iletim şebekesi ve enterkonnekte sistem aracılığıyla sağlanır. Güç santralleri tarafından üretilen elektrik enerjisi depolanamadığından zaman kaybetmeden kullanıcıya

ulaştırılması gerekmektedir. Bu sistemde herhangi bir arıza durumu meydana geldiğinde sadece arıza meydana gelen bölüm devre dışı bırakılarak enerji akışının sürekliliği sağlanır. Ülkemizin sahip olduğu bir tane enterkonnekte sistem vardır. Türkiye’de ve Avrupa’da elektrik akımının frekansı 50 Hz iken, Amerika’da 60 Hz’dir. Santrallerde üretilen elektriğin kullanıcılara ulaştırılması için kullanılan basit bir elektrik iletim ve dağıtım sistemi şekil 2.15’de gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Elektrik enerjisinin abonelere ulaştırılması

Ülkemizdeki enterkonnekte sistemin avantajlarının olduğu durumları sıralayacak olursak,

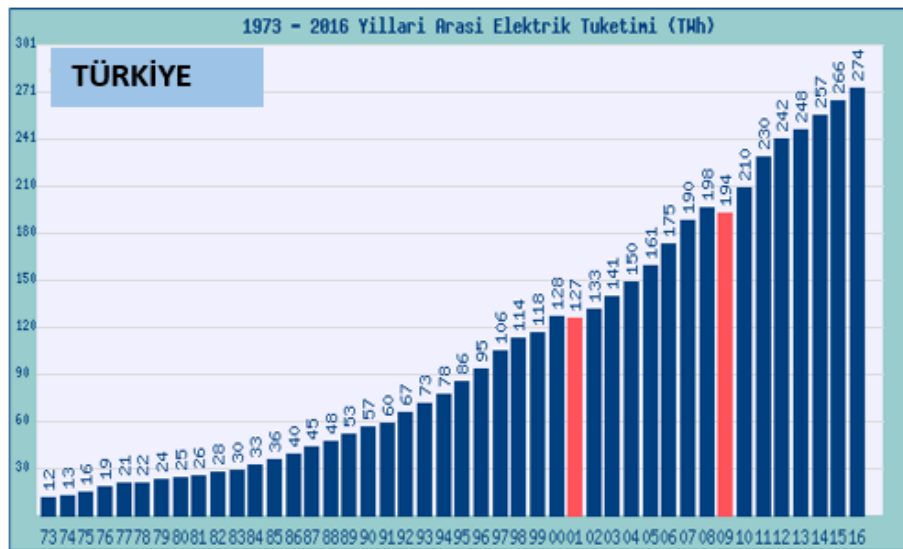
- İletimde, taşımada ve nakilde kârlılık ve güvenilirliği artırır.
- Enterkonnekte sistemde bir arıza meydana geldiğinde, sadece arızanın olduğu bölgenin enerjisi kesilerek diğer bölgelerde enerjinin sürekliliği sağlanır.
- Tüketim miktarı mevsimlere, bölgelere ve günün belirli saatlerine göre büyük farklılıklar göstermektedir. Elektrik kullanımının maksimum olduğu saatlerde elektrik santralleri maksimum kapasitede çalışmaktayken, tüketimin daha düşük olduğu saatlerde üretim kapasitesi düşürülür veya bazı elektrik santralleri devre dışı

bırakılır. Bu nedenle, enterkonnekte sistem elektrik üretim kaynağından ekonomi sağlamada yardımcı olur.

Bunun yanısıra, sistemin kararlılığının sağlanmasının zor olması ve kısa devre akımlarının yüksek olması ve gibi sakıncaları da vardır.

Bütün ülkelerin sahip olduğu bir enterkonnekte şebekesi vardır. Bununla birlikte bazı komşu ülkelerin enterkonnekte sistemleri birbirine bağlanabilir. Türkiye'deki enterkonnekte sistem; Rusya, Bulgaristan, Irak, Suriye ve Gürcistan ülkelerinin şebekelerine bağlıdır. Bu bağlantılar sayesinde ülkeler arası elektrik alışverişi sağlanmaktadır.

Türkiye'deki elektrik tüketimini artmasının başlıca sebepleri arasında teknolojinin gelişmeye başlaması ve buna bağlı olarak nüfusun artmasını gösterebiliriz. Artan elektrik enerjisi talebini karşılamak, enerji sürekliliğinin devamı ve iletimde sorun yaşamamak için elektrik şebekelerinin ekonomik ve aynı zamanda güvenli bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. 1973 yılından günümüze Türkiye'nin yıllık elektrik tüketiminin önceki yıllara göre yüzde olarak değişimi Şekil 2.16'daki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.16 1973 ve 2016 yılları arasında Türkiye'deki elektrik tüketimi (<http://www.enerjiatlası.com/elektrik-tuketimi/2017>)

Şekil 2.16’ da görüldüğü üzere artan ve artmaya devam eden enerji talebini karşılamak için elektrik iletim dağıtım sistemlerinin boyutları da buna bağlı olarak büyümektedir. Bu durum ise; sistemlerde beklenmedik hatalı akımların oluşmasını beraberinde getirir. Hatalı akım, bir güç sisteminde belirli bir yerde meydana gelen hatanın beklenen maksimum etkisi olarak ifade edilebilir. Bir sistemde hataların oluşmasını sağlayan bir takım sebepler vardır, bu sebepleri sıralayacak olursak (Powell 2001).

- Yıldırımların havai hatlara düşmesi,
- Elektriksel anahtarlama geçişlerinde oluşan aşırı voltaj,
- Generatörler, trafolar veya diğer ekipmanlar da izolasyonun bozulması, nem veya yaşlanmaya bağlı olarak meydana gelen arızalar,
- Ağaç dallarının, rüzgardan veya aşırı büyümeden dolayı havai hatlara dokunması,
- Yeraltı kablolarının inşaat çalışmaları veya başka sebeplerden dolayı zarar görmesi,
- Transformatör buşingleri gibi çeşitli ekipmanlara yabani hayvanların temas etmesi,
- Aşırı kar yağması ve fırtına gibi hava koşullarından dolayı gibi havai hatların zarar görmesi,

Şekil 2.17’de hatalı akımı oluşturan sebeplerin fotoğrafları gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Hatalı akımın oluştuğu durumların fotoğrafları (Martini 2016)

Hatalar, geçici hatalar (yıldırım düşmesi), kalıcı hatalar (yeraltı kablolarının zarar görmesi) ve yarı-kalıcı hatalar (ağaç dallarının havai hatlara dokunması) olmak üzere üç gruba ayrılır. Hataların yaklaşık olarak %80-90 havai hatlarda meydana gelen geçici hatalardan oluşmaktadır (Grid 2011). Şekil 2.18’de hatalı akım sınırlandırılmadığı

zaman trafolarla meydana gelen kalıcı hasarların boyutları daha açık bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.18 Trafolarla meydana gelen hasar

Oluşan hatalı akımlar, elektrik tesislerinde var olan oldukça maliyetli generatörler, trafolar ve hatlar gibi mevcut sistemin parçalarına geri dönüşümsüz hasarlar verdiğinden bu hatalı akımların sınırlandırılması gerekmektedir. Korumanın görevi, çeşitli sebeplerden dolayı meydana gelen hataları önceden tespit ederek sisteme verilecek arıza çok genişlemeden, hatanın sebebini ortadan kaldırmak veya etkisini minimuma indirmek olmalıdır. Ancak bu şekilde, elektrik iletilmesi ve dağıtılması güvenilir bir şekilde yapılabilir. Bir koruma sisteminin sahip olması gereken özellikler;

- Büyük duyarlılık,
- Hızlı çalışma,
- Yüksek güvenilirlik,
- Seçicilik,

olmalıdır. Bir sistemde oluşan hatalar farklıdır ve alınacak önlemlerde hata çeşitlerine göre farklılık gösterir. Alınacak önlemler tespit edildikten sonra, devreden çıkarma işlemi hatalı olan eleman için yapılması gerekir. Bu nedenle korumanın seçici olması gerekir (Öğüt 2002).

2.10.2 Hatalı Akım İçin Geleneksel Koruma Sistemleri

Türkiye’de kullanılan geleneksel devre koruma sistemlerini inceleyecek olursak, kesiciler yüksek gerilim şebekelerinde kullanılan yük ve kısa devre akımlarını keserek sistemi koruyan cihazlardır. Alternatif akım (AA) iletiminde devreyi tamamen kapamak için anahtarlar kullanılır, anahtarın kapalı olan kontakları açıldığı zaman alternatif akımın zamanla yönü ve şiddetinde değişimler meydana gelir ve olay kıvılcımların oluşmasına sebep olur. Oluşan bu kıvılcımlar ark olarak isimlendirilir. Bu kontak noktalarında oluşan arklar söndürülemediği zaman sisteme zarar verir. Yüksek gerilimle çalışan sistemlerde devre açma işlemi basit bir düzeneğe sahip olan şalterlerle yapılamaz çünkü yüksek akım kaynaklı oluşan arklar kontaklara zarar vererek kullanılamaz duruma getirirler. Bu nedenle yüksek akım değerleriyle çalışan şebekelerde kesiciler kullanılarak meydana gelen hatalı akımlardan sistem korunmuş olur. Kullanıldıkları yerlere göre kesiciler iki kısma ayrılır. Bunlar, bina içinde (dahil) ve bina dışında (harici) olarak imal edilirler. Bir kesicide olması gereken özellikleri sıralarsak;

- Açma esnasında meydana gelen ark kısa süre içerisinde söndürülmeli,
- Arka arkaya çok sayıda açma ve kapama işlemini arızasız bir şekilde yapmalı,
- Yapılan kontaklar nominal akım değerini ısınmadan ve kısa devre akımını ise; belli bir süre taşıyacak şekilde olmalıdır,
- Açma ve kapama süresi çok kısa bir zaman içerisinde olmalıdır,

Türkiye’de kullanılan kesicilerin çalışma zamanları şu şekildedir (Ürgüplü 2008)

Açma zamanı: Açma bobinine yardımcı gerilimin uygulandığı andan, ark kontaklarının ayrılmasına kadar 45-65 ms

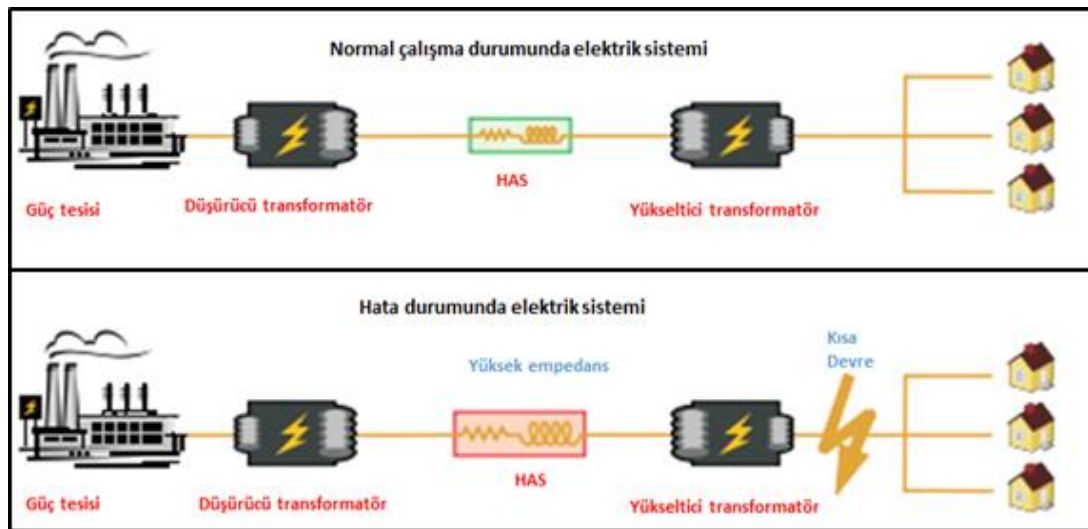
Kesme zamanı: Açma bobinine yardımcı gerilimin uygulandığı andan, arkın söndüğü ana kadar 60-80 ms

Kapama zamanı: Kapama bobinine yardımcı gerilimin uygulandığı andan, kontakların birbirine değdiği ana kadar 70-90 ms

Hatalı akımları sınırlandırmak için hava çekirdekli reaktörler, yüksek empedanslı trafolar gibi birçok sistem denenmiştir. Bu denenmiş sistemlerin yüksek maliyetli olması, kısa ömürlü olması ve normal çalışma koşullarında gerilim düşümü ve kayıplara sebep olması gibi bir takım sıkıntılar bulunmaktadır (Mukhopadhyay 2014). Geleneksel koruma yöntemlerinde yaşanan bu tür sıkıntılardan dolayı sistemleri hatalı akımlardan korumak için Hatalı Akım Sınırlayıcılar (HAS) kullanılmaktadır.

2.11 Hatalı Akım Sınırlayıcılar (HAS)

Sisteme yeni üretim merkezlerinin dahil edilmesi ve yeni iletim hatlarının eklenmesiyle birlikte hatalı akım seviyelerinde artışlar olmaktadır. Akım seviyelerindeki artışların sebebi; kaynak voltajına, kaynak empedansına, hata faz açısına bağlıdır. Bu hatalı akım değerlerindeki artış, sistemde var olan kesicilerin ve sigortaların kapasitelerinin üstünde hatalı akımlara maruz kalmalarına yol açar. Sistemde hatalı akımları sınırlandırmak için seri reaktörler kullanılabilir. Fakat seri reaktör kullanımı, gerilim düşümü, yüksek reaktif güç kaybı gibi bir takım problemleri de beraberinde getirir. Ayrıca, hatalı akım seviyesinin yükselmesi sistemdeki diğer ekipmanlarında daha büyük boyutlu olanlarla yer değiştirmesine sebep olacağından bu durum mali açıdan daha pahalı ekipmanların kullanımına yol açar. Şekil 2.19’da HAS’lı bir elektrik sisteminin şematik gösterimi yer almaktadır.



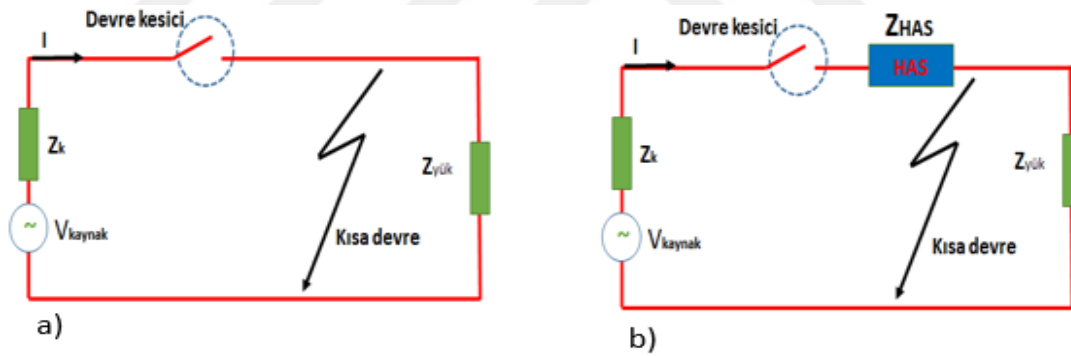
Şekil 2.19 HAS’lı bir elektrik sistemi (http://energy.gov 2016a)

HAS'lar, bir sistemde meydana gelen aşırı ve zarar verici akımları sınırlamak ve kontrol edilebilir bir seviyede tutarak, sistemin zarar görmesini engelleyen cihazlardır. HAS'lar normal çalışma durumunda çok düşük empedans değerine sahip olup, hata meydana geldiği zaman yüksek empedans değerine sahip olarak hatalı akımı sınırlarlar. Ayrıca, bir HAS'ın satın alınması ve kurulumu var olan ekipmanın yeniden yapılandırılmasından daha uygun bir maliyete sahip olacaktır (Pei 2012).

Bir HAS tasarlarken dikkat edilmesi gereken bazı parametreler vardır;

- Hata meydana geldiğinde ve normal çalışma koşullarındaki empedans değeri,
- HAS'ın devreye gireceği süre,
- HAS'ın ilk çalışma durumuna geri dönme süresi,

Şekil 2.20'de basit bir elektrik sisteminin HAS kullanarak ve kullanmadan şematik olarak gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.20.a Elektrik sisteminin HAS'sız şematik gösterimi, b. HAS'lı sistemin şematik gösterimi

Basit bir elektrik devresini inceleyek olursak, kaynak gerilimi; V_k , iç empedansı; Z_k , yük empedansı $Z_{yük}$ ve hata empedansı Z_h olarak tanımlayabiliriz (Rowley 1995).

Kısa devre durumundan önce sistemin akım değeri,

$$I = \frac{V_k}{Z_k + Z_{yük}} \quad (2.8)$$

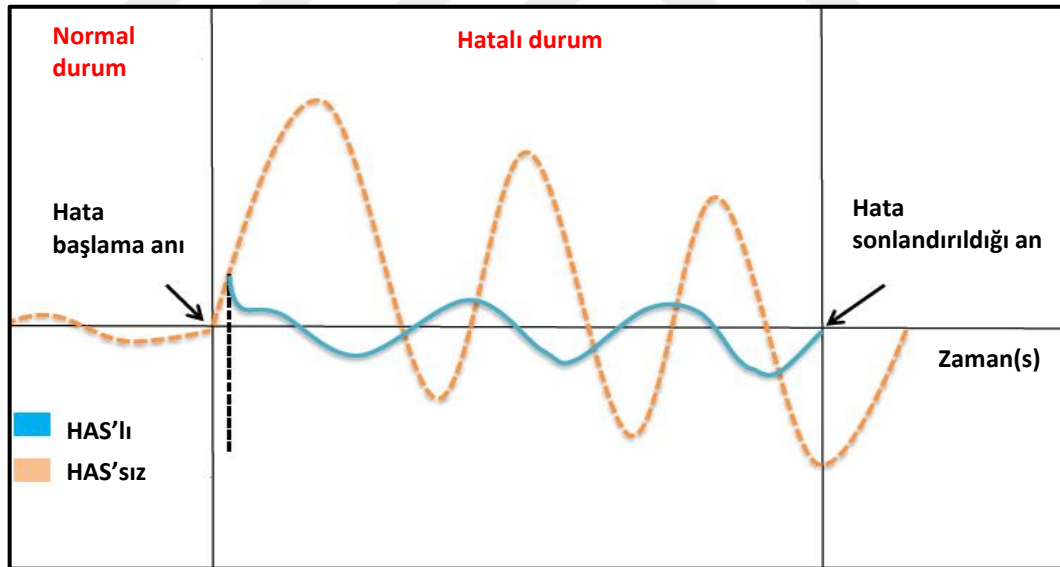
Kısa devre oluşuktan sonra sistemin akım değeri,

$$I_{hata} = \frac{V_k}{Z_k + Z_{hata}} , eğer Z_{hata} \ll Z_{yük} \quad (2.9)$$

Eğer kaynağın empedans değeri, yükün empedans değerinden daha küçük olursa denklem 2.9'daki eşitlik elde edilir. Sisteme bir tane HAS seri olarak bağlanırsa denklem 2.10 elde edilmektedir.

$$I_{hata} = \frac{V_k}{Z_k + Z_{hata} + Z_{HAS}} \quad (2.10)$$

Şekil 2.21'de ise HAS kullanıldığında ve kullanılmadığında akım değerinin nasıl değiştiği gösterilmektedir.



Şekil 2.21 HAS kullanılarak ve kullanılmadan elde edilen akımın genel gösterimi (Dutta 2014)

Eğer hatalı akımın ilk pik değeri güç şebekesindeki cihazın anma değerinden büyükse, hatalı akım sınırlandırılmadığı takdirde sistemin zarar göreceği aşıkardır. Hata akımını azaltmanın en basit yöntemi kaynak empedansını artırmaktır. Şekil 2.21' de gösterildiği

gibi eğer sistemde HAS kullanılmazsa akımın beklenen değerler limitinden çok yüksek değerler aldığı görülmektedir. Eğer sistemde HAS kullanılırsa akımın belli bir değerde sınırlandırıldığı görülmektedir. HAS’da olması gereken özellikler aşağıdaki şekilde listelenmiştir (Eckroad 2005, Noe ve Steurer 2007);

- Normal çalışma durumunda minimum empedansa sahip olmalı,
- Hiçbir müdahale olmadan önceki durumuna otomatik geçebilme durumunda olmalı,
- Ergonomik boyutta, düşük maliyetli ve hafif olmalı,
- Yüksek güvenilirlikli ve kullanım ömrünün uzun olmalı,
- Röle ve güç kesicilerin normal çalışmalarını etkilememeli,
- Normal çalışma durumunda düşük güç kaybına sahip olmamalı, hatalı akımın ilk çevriminde (60 Hz için 16.667 ms ve 50 Hz için 20 ms’den daha kısa bir sürede) hatalı akımı tespit ederek, sonraki birkaç çevrimde istenen oranda hatalı akımı sınırlamalı (Sokolovsky vd. 2004)
- İş sağlığını ve güvenliğini artırmalı,
- Enerjiyi kesintisiz ve güvenilir bir şekilde iletmeli,
- Kısa devre akımının maksimum değere ulaşmasını engellememeli,

Çizelge 2.3’de diğer akım sınırlama yöntemlerinin birbirleriyle kıyaslaması verilmektedir.

Çizelge 2.3 Diğer akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması (Malhi 2007, Çakal 2012)

Cihaz modeli	Avantaj	Dezavantaj
Devre kesici	Güvenilir Denenmiş	Hatalı akımı kesmek için başka akıma ihtiyaç duymaması Yüksek maliyetli Kısa ömürlü Hatalı akımı sınırlandırmaz akımı keserek sistemi enerjisiz bırakması

Çizelge 2.3 Diğer akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması (Malhi 2007, Çakal 2012) (devam)

Yüksek empedanslı transformatör	İletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılması Denenmiş Güvenilir	Sistemin verimliliğinin düşük olması
Sigorta	Basit bir tasarım Düşük maliyet	Sık sık atma ihtimalinin olması Tekrar kapama işleminin elle yapılmak zorunda kalınması
Hava çekirdekli reaktör	Kanıtlanmış ve geleneksel kullanım	Yüksek voltaj düşümüne yol açması Normal çalışma sırasında güç kayıplarına sebep olması

Yüksek empedanslı trafolar , sisteme ekstra empedans vererek hatalı akımı sınırlarlar, fakat bu durum bu cihazlar üzerindeki voltaj düşümünü artırarak sistemin güç kalitesini azaltır ve sistem üzerinde negatif bir etki yaratır. HAS'ların geleneksel koruma cihazlarına göre hata meydana geldiğinde hataya hızlı cevap verme, otomatik olarak devreye girip hatayı sınırlandırma ve yüksek voltaj sağlama gibi bir takım üstünlüklere sahip olmasından dolayı diğer koruma yöntemlerinin yerine tercih edilmelidir (Pei 2012).

2.12 Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcılar (SHAS)

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfinden sonra çeşitli Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcılar (SHAS) yapılmıştır. SHAS'ın avantajlarını sıralarsak;

- SHAS'lar malzeme süperiletken durumdayken mükemmel iletkenlik göstererek kayıplara neden olmaz,
- Hatalı akıma karşı gösterdikleri tepki süreleri çok kısadır,
- Normal çalışma durumunda gerilim düşümüne neden olmazlar,

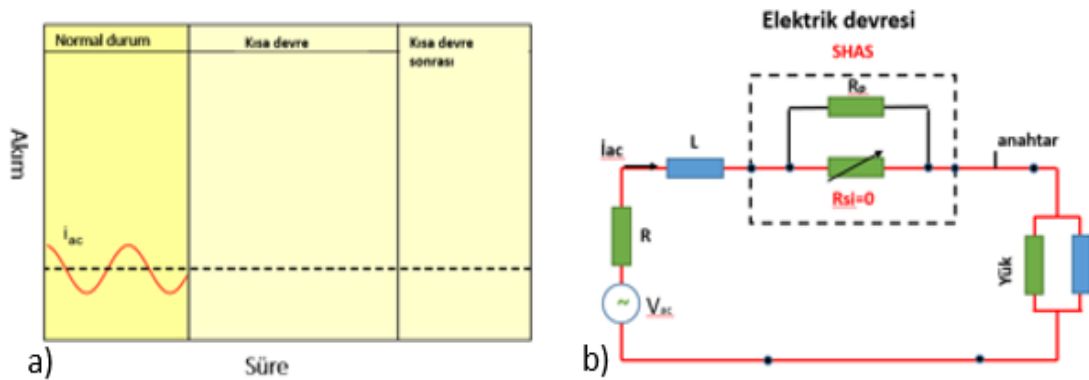
SHAS'ların dezavantajlarını sıralarsak;

- Kritik sıcaklık değerine kadar soğutulmaları soğutma sıvılarıyla mümkün olacağından maliyeti yükseltirler ayrıca; soğutma sistemleri arızaya sebebiyet vererek sistem üzerinde olumsuz etkiler yaratır,
- Süperiletken bobinler doyuma ulaşarak harmoniklerin oluşmasına neden olurlar,

HAS'ların; daha uzun süre kullanılması, daha çok denenmiş devreye entegre edilmesi ve soğutma sıvısı kullanılmaması gibi avantajları vardır. SHAS'larda görülen problemleri, süperiletken durumdan ani bir şekilde çıkış ve sonrasında hemen süperiletken duruma dönememe, süperiletkendeki AA kayıpları, sıcak bölge problemleri şeklinde sıralayabiliriz. Sistemleri korumak için bu tür problemlerin üstesinden gelinmesi gerekir. SHAS'lar çeşitlerine göre birkaç kısımda ele alabiliriz;

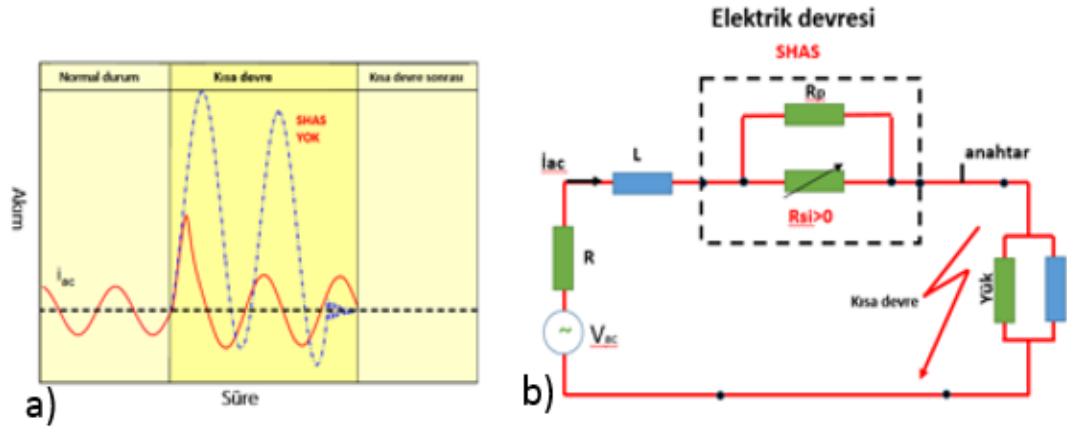
2.12.1 Rezistif SHAS

SHAS uygulamalarından en iyi bilineni rezistif tiptir. Rezistif SHAS'da süperiletken malzeme kullanılır ve korunması planlanan devreye seri bir şekilde bağlanır. Şekil 2.22'de normal çalışma durumunda olan sistemdeki akımın zamanla değişimi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.22.a Normal çalışma durumunda olan sistemin akım değeri b. Sistemin şematik gösterimi (Noe 2008)

Şekilde görüldüğü gibi akım sinüsoidal dalga formunu hiç bozmadan kırmızı yol boyunca ilerlemektedir. Normal çalışma durumunda süperiletken malzeme hiçbir dirence maruz kalmadan bütün akımı taşır. Şekil 2.23'de hata meydana geldiğinde sistemin akım değerini ve sistemin şematik gösterimi verilmektedir.

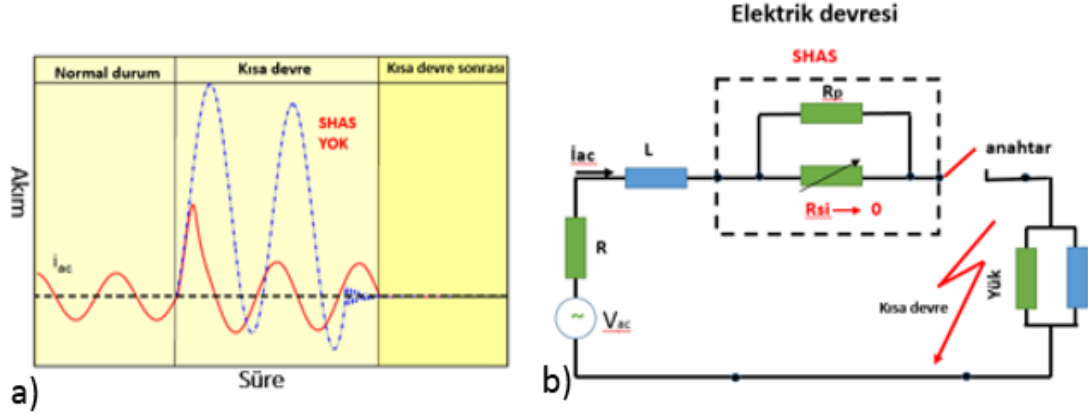


Şekil 2.23.a Kısa devre durumunda olan sistemin akım değeri, b. Sistemin şematik gösterimi (Noe 2008)

Hata meydana geldiğinde; süperiletkenin üzerindeki akım ani bir şekilde artmaya başlar. Eğer bu akım değeri, süperiletkenin taşıyabileceği maksimum akım değeri olan (I_c) aşarsa süperiletken malzeme, süperiletken durumdan çıkarak normal duruma dönüşür (S-N geçişi) ve elektriksel bir dirence sahip olur. Akım süperiletkene paralel olan şöntünde de üzerinden geçerek kırmızı yol boyunca ilerler ve iki kola ayrılarak sınırlandırılmış olur. Eğer SHAS kullanılırsa akımın belli bir değer limitinde sınırlandırıldığı grafikte gösterilmektedir. Burada şöntün en önemli görevi ise; hatalı akımın bir kısmını üzerinden geçirerek süperiletkenin korunmasına yardımcı olmaktır. Ayrıca; şöntün süperiletkene paralel bağlanmasıyla birlikte S-N geçişi durumunda aşırı ısınmanın önüne geçerek süperiletkenin yeniden süperiletken faza geçmesine yardımcı olmaktır. Ek olarak bu paralel direnç sınırlandırılmış akımı düzenler ve eğer süperiletkenin direnci aniden çok yüksek bir değere ulaşırsa aşırı voltajdan korur (Noe ve Steurer 2006).

Şekil 2.24'de kısa devreden hemen sonra rezistif bir sistemin akım değerini ve sistemin şematik gösterimi gösterilmektedir. Kısa devre olduktan sonra sistemdeki anahtar

devreyi açarak akımın devreden geçmesini engeller ve sistem hatalı akımın zarar verici etkisinden kurtulmuş olur.



Şekil 2.24.a Kısa devre durumundan sonra sistemin akım değeri, b. Sistemin şematik gösterim (Noe 2008)

Sistemin yeniden eski çalışır durumuna geri dönmesi için zamana ihtiyacı vardır bu zamana toparlanma süresi (recovery time) denir. Toparlanma süresi süperiletken malzemeye ve cihazın tasarımına bağlıdır. Rezistif SHAS'ın avantajlarını ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

Avantajları;

- Basit dizayna sahip olması ve hafif olması
- Bir hata meydana geldiğinde, tetikleyici mekanizmaya gerek duymadan süperiletkenin yeniden eski durumuna dönmesi (Pei 2012).

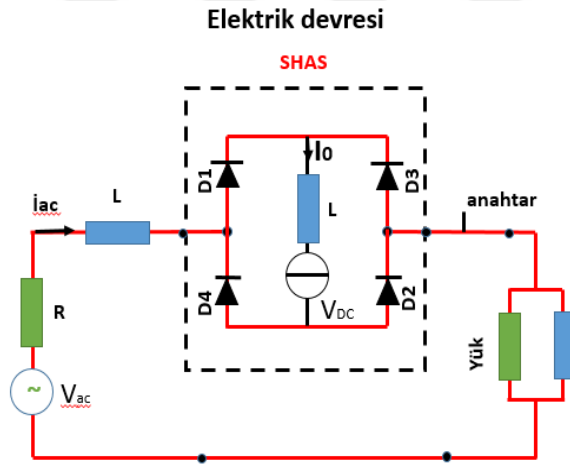
Dezavantajları;

- Süperiletkenlerde dağılan ısı nedeniyle süperiletken durumdan normal duruma geçişin olması ve birkaç saniyeden bir kaç dakikaya kadar süren uzun toparlanma süresine sahip olması,
- Normal çalışma durumunda süperiletkende AA kayıpların meydana gelmesi, S-N geçişi sonrasında joule kaybının olması

- Soğutma sistemi ve dış ortam koşulları arasındaki bağlantıyı sağlamak için buşinglere ihtiyaç vardır. Bu ayrıca; extra kayıpların olmasına ve termal yalıtımın sağlanmasına sebep olur (Pei 2012).

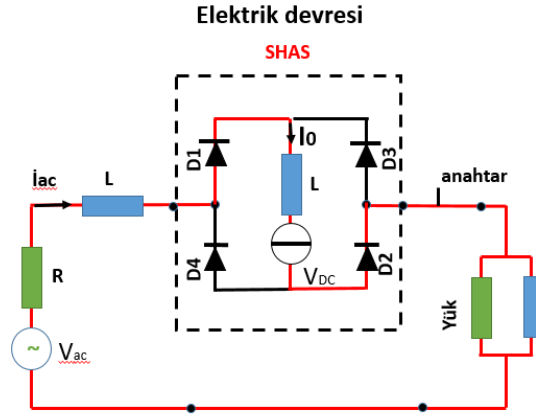
2.12.2 Köprü tipi SHAS

Köprü tipi SHAS, bir akım doğrultucu (Graetz bridge), bir doğru akım voltaj kaynağı ve bir sınırlama bobininden oluşur. Doğru akım (DA) voltaj kaynağı tarafından sağlanan sınırlayıcı bobindeki DA seviyesi, güç sisteminin nominal akım değerinden daha yüksek olacak şekilde tasarlanmıştır. Normal çalışma durumunda DA voltaj kaynağı, dört diyotun hepsini ileri ön besleme bölgesinde tutar. DA voltaj kaynağından gözlenen akım değeri I_0 iken, AA voltaj kaynağından gözlenen akım değeri i_{ac} 'dir. Normal çalışma durumunda sistemin şematik gösterimi şekil 2.25'de gösterilmektedir.



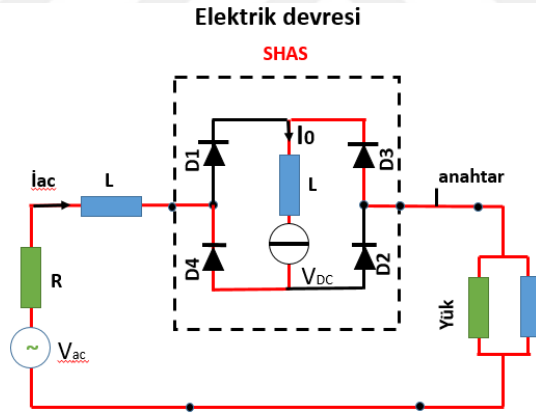
Şekil 2.25 Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)

Eğer AA, DA'dan yüksek olursa, D3 ve D4 diyotları veya D1 ve D2 diyotları pozitif veya negatif yarım çevrimde geri besleme bölgesinde olacaktır. Şekil 2.26'da hata durumunda pozitif yarım çevrimde elektrik devresi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.26 Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)

Şekilden de görüldüğü gibi pozitif yarım çevrimde, i_{ac} değerinin I_0 değerinden büyük olduğu durumda D1 ve D2 iletimdeyken D3 ve D4 akımı geçirmediği gözlemlenmiştir. Şekil 2.27’de ise hata durumunda negatif yarım çevrimde elektrik devresi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.27 Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)

Şekilden de görüldüğü üzere negatif yarım çevrimde akım D3 ve D4’ün üzerinden geçerken D1 ve D2 ‘nin akımı ilemediği gözlemleniyor. Bu sayede akım süperiletkenin indüktansı (L) ile sınırlandırılmış olur.

İndüktör süperiletken malzemeden yapılmak zorunda değildir, fakat süperiletken malzeme kullanımı, kayıpları minimize edeceğinden tercih edilmektedir. Ek olarak; normal çalışma koşullarında indüktör sadece DA taşır bu durum ise; süperiletken

malzemeyi ideal bir seçenek haline dönüştürür. Diyotların yerine tristörler kullanılabilir, bu sayede tristörlerden hata meydana geldikten sonra ilk yarım çevrimde akımı kesmesi beklenir (Noe ve Steurer 2006, Pei 2012).

Avantajları;

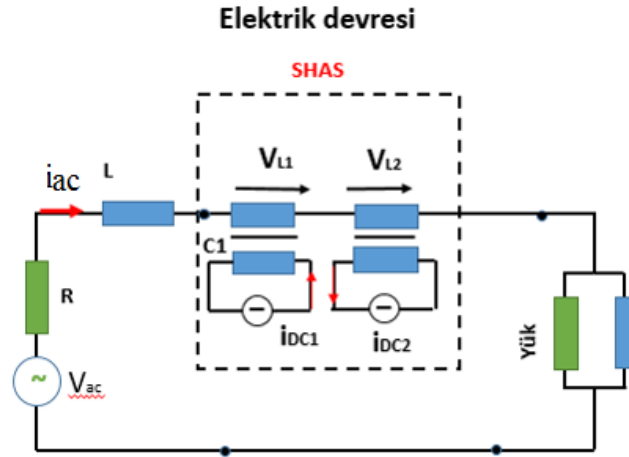
- Süperiletken bobinde DA'la çalışmasından dolayı AA kayıplarının olmaması
- Hata durumunda bobin süperiletken durumda kalacağı için hızlı toparlanma süresi olması,
- Tetikleyici akım seviyesi DA kaynağıyla ayarlanabilir olması
- Güç hattında, kroyojenik arayüzü gerektirmemesi

Dezavantajları;

- Diyotlardaki yarı iletken malzemeden kaynaklı AA kayıplarının yüksek olması,
- Yarıiletkenden kaynaklı bir hata meydana gelirse SHAS hatalı akımı sınırlayamayabilir bu nedenle çok güvenilir olmaması

2.12.3 DC eğilimli (doymuş) demir çekirdekli SHAS

DC eğilimli demir çekirdekli SHAS, bir DA güç kaynağı tarafından doyurulan iki adet demir çekirdekten oluşmaktadır (Şekil 2.28). Bu iki adet demir çekirdek i_{DC1} ve i_{DC2} doğru akımları tarafından doyurulurlar ve bu akımlar demir çekirdekler etraflarında sırasıyla H_{DC1} ve H_{DC2} manyetik alanlarının oluşmasına sebep olur. Süperiletken bobinlerde oluşan L_1 ve L_2 indüktansı oldukça küçüktür.



Şekil 2.28 Sistemin elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)

Başlangıçta sinüsoidal dalga formunda olan i_{ac} , hata meydana geldikten sonra yani AA DA'dan daha yüksek olduğunda dalga formunda bozulmalar meydana gelecektir. Hatalı durum meydana geldikten sonra başlangıçta küçük olan indüktans değerleri (L_1 ve L_2) hatadan sonra artış gösterecek ve hatalı akımın sınırlandırılmasına sebep olacaklardır.

Avantajları;

- Arıza güvenlik denetiminin olması
- Hata durumu boyunca bobinin süperiletken durumda kalmasında dolayı kısa toparlanma süresinin olması
- DA'la çalışmasından dolayı süperiletken bobinde AA kaybın olmaması.

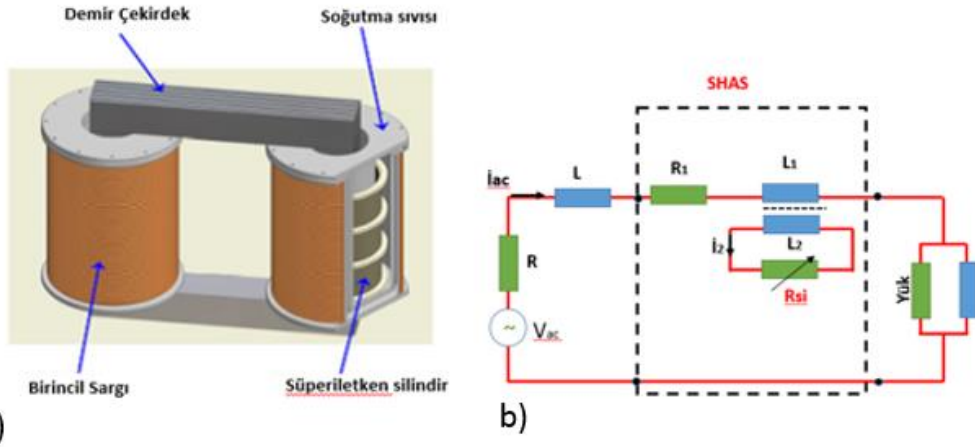
Dezavantajları;

- Demir çekirdeklerden dolayı çok ağır olması
- Birincil sarımda ve demir çekirdekte AA kayıpların olması

2.12.4 Korumalı demir çekirdekli (İndüktif tip) SHAS

Bu SHAS tipi birincil sarım, demir çekirdek ve süperiletken silindirden oluşmaktadır. Şekil 2.29.a'da görüldüğü üzere süperiletken silindir birincil sarım ve demir çekirdeğin arasına yerleştirilmiştir. Bu SHAS çeşidine indüktif tip SHAS' da denilmektedir. Bunun

sebebi ise; ikincil sarımda bir kısa devre durumu gözleendiğinde transformatörün özelliklerine benzer özellikler göstermesinden dolayıdır.



Şekil 2.29.a İndüktif tip SHAS'ın şematik gösterimi (Mumford ve Usoskin 2009), b. Elektrik devresinin şematik gösterimi (Noe 2008)

Şekil 2.29.b'de görüldüğü üzere demir çekirdeklerin indüktansları L_1 ve L_2 , süperiletkenin sahip olduğu direnç R_{si} , süperiletken silindir üzerinden geçen akım i_2 olarak verilmektedir. Normal çalışma durumunda süperiletken silindirin içerisindeki akım süperiletkenin kritik akım değerinden (I_c) daha düşüktür. Hata meydana geldiğinde süperiletken silindirin içerisindeki akım kritik akım değerini aşar ve süperiletken silindir elektriksel bir dirence sahip olur. Manyetik akı demir çekirdeğin içerisine nüfuz eder böylece birincil sarımın indüktansını artırır. Meydana gelen hatalı akım indüktansın artmasıyla sınırlandırılmış olur (Pei 2012).

Avantajı

- Buşinglere ihtiyaç olmaması,
- Süperiletken boyunca düşük voltaj düşümünün olması,
- Kendi kendini tetikleme,
- Fiziksel olarak kroyojenik ve normal kısım olarak ayrışma,

Dezavantajı

- Kullanılan demir nüvelerden dolayı ağır olması,
- Uzun geri dönüşüm süresinin olması,

2.13 SHAS Tiplerinin Kıyaslaması

Çeşitli tipte SHAS'ların avantajlarının, dezavantajlarının ve karakteristik özelliklerinin kıyaslanması hakkında yayınlanmış bir takım çalışmalar bulunmaktadır (Hassenzahl ve Tsukamoto 2011, Lei vd. 2011, Sokolovsky vd. 2004).

Doymuş demir çekirdekli (İndüktif Tip) SHAS'ın dezavantajları birincil devrede voltaj düşümlerinin ve direnç kaybının olmasıdır. Bu SHAS tipi resistif SHAS'la kıyaslandığı zaman voltaj düşümü ve direnç kaybı daha azdır. Doymuş demir çekirdekli SHAS'ın önemli bir avantajı ise; sistem devresinin trafoya benzemesidir. Bu sayede bu SHAS tipinde iletim gerilimini taşımak için çok iyi kurulmuş bir trafo teknolojisi kullanılabilir fakat bunu resistif SHAS'da yapmak oldukça zordur (Kraemer vd. 2012).

Rezistif tip SHAS'ın doymuş demir çekirdekli SHAS'a göre avantajlı olduğu durumlar basit bir dizayna sahip olması ve hata durumundaki performansının daha iyi olmasıdır. Rezistif tip SHAS sistemi korumak için devreye seri bir şekilde bağlı olmasından dolayı oluşan AA kayıpları ve buşinglerde oluşan ısı, rezistif tip SHAS'da oluşacak içsel problemlerinin başında gelir. Dahası, hata meydana geldiğinde eğer süperiletkene paralel olan direnç (şönt) akımı sınırlamazsa normal direnç hata akımı sınırlarlamak zorunda kalır. Rezistif SHAS yapımında kullanılan süperiletken malzeme homojen olmayan S-N geçişi, ısınma ve toparlanma süresi gibi problemlerin üstesinden gelmesi gerekir. Rezistif SHAS'ın indüktif SHAS'a göre avantajı düşük ağırlığının olması ve manyetik çiftlenmiş hava bobinleri ihtiyaç duymamasıdır. İndüktif SHAS'da kullanılan süperiletken malzeme ince film, külçe veya tel kullanılarak üretilir (Paul vd. 1997, Sokolovsky vd. 2004, 2003, Hassenzahl ve Tsukamoto 2011, Lei vd. 2011, Usoskin vd. 2011). İndüktif SHAS rezistif SHAS'a göre daha düşük voltajda çalışır. Bu özellik bütün süperiletken boyunca eş zamanlı olarak S-N geçişini kolaylaştırır. İndüktif SHAS'ın bir diğer avantajı ise; soğutma sisteminin ve cihazın normal parçalarının fiziksel olarak ayrı olmasıdır. Bu durum, soğutma sisteminin içerisinde ısı kaybına sebep olan buşinglerin olmaması sebebiyle büyük bir avantaj sağlar. İndüktif yaklaşımın görülen avantajlarının olmasına rağmen, çoğu SHAS projesi sonlandırılmıştır ve bu noktada en büyük ticari yatırımlar rezistif SHAS'ın uygulaması için yapılmaktadır.

Süperiletkenin DA ile çalıştığı doymuş demir çekirdekli SHAS ve köprü tipi SHAS'da, normal çalışma koşullarında, süperiletkendeki kayıplar devrenin hem nominal hem de hata durumu rejimlerine göre daha düşüktür. MgB_2 ve Düşük Sıcaklık Süperiletkenleri (DSS) diğer Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerine (YSS) göre daha düşük maliyete sahip olması SHAS uygulamalarında bu malzemelerin kullanılmasına yol açan sebeplerden birisidir. Elektronik sistemlerinin çalışma hızıyla belirlenen toparlanma süresi DSS'lerinde YSS'lerine göre düşüktür. Çizelge 2.4'de SHAS çeşitlerinin birbiriyle kıyaslaması verilmektedir.

Çizelge 2.4 Farklı SHAS tiplerinin kıyaslanması

SHAS tipi	Kayıplar	Arıza Güvenlik denetimi	Süperiletken kullanım miktarı	Büyükölç	Toparlama süresi
Rezistif	-Süperiletken AA kaybı -Buşing kaybı	Var	Orta	Küçük	Birkaç saniye
Köprü	-Yarıiletken AA kaybı -Buşing kaybı	Yok	Süperiletken kullanılmadan da yapılabilir	Orta büyüktükte	Hemen
DC eğimli Demir Çekirdek	-Demir çekirdekteki kayıplar -Birincil bobindeki AA kaybı	Var	Orta	Büyük ve ağır	Hemen
İndüktif	-Süperiletken AA kaybı -Birincil bobindeki AA kaybı	Var	Fazla miktarda	Büyük ve ağır	Birkaç saniye
Hatalı Akım Denetleyici	-Yarıiletken AA kaybı -Sınırlayıcı bobinde AA kaybı	Yok	Süperiletken kullanılmadan da yapılabilir	Orta büyüktükte	Hemen

2.14 SHAS Üretilmesinde Kullanılan Malzemeler

Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerinin keşfinden önce ilk SHAS yapımı DSS'i yapılmaktaydı. İlk üretilen SHAS'lar, birinci tip süperiletkenlerinin kullanılmasıyla geliştirilmiştir (Neklepaev 1978). Sonraki dönemlerde geliştirilen çeşitli tiplerdeki SHAS'lar DSS'nin kullanılmasıyla üretilmiştir ve test edilmiştir (Ulbricht, 1979, Raju vd. 1982, Vershinin vd. 1989, Ito vd. 1992, Verhaege vd. 1993). Çok yüksek güçteki cihazlar Nb-Ti telinin kullanılmasıyla üretilmiştir (Ito vd. 1992, Raju vd 1982, Ulbricht 1979, Verhaege vd. 1993). NbTi, MRI magnet yapımında kendisine geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Fakat çalışma sıcaklığının 4 K olması ve sıvı helyumun çok pahalı olmasından dolayı SHAS uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmamıştır.

SHAS uygulama malzemelerinden bir diğeri ise MgB_2 ' dir. Sıfır manyetik alanda kritik sıcaklık değeri 39 K olmasına rağmen en iyi performansı 25 K de göstermektedir. SHAS uygulamalarında (Prikhna vd. 2011) külçe MgB_2 ve (Morandi vd. 2013, Smith vd. 2012) tel şeklinde MgB_2 süperiletkenini kullanmışlardır. Fakat MgB_2 süperiletkenin soğutma sıvısının pahalı olması, AA kayıplarının olması, verim katsayısının düşük olması gibi negatif etkilerinden dolayı hatalı akım sınırlamada geniş bir uygulama alanı bulamamıştır. MgB_2 büyük ölçekli uygulamalar için umut verici ve hızlı gelişen bir malzeme olmasına rağmen şu ana kadar dünyada çok az grup SHAS uygulamalarında bu materyali kullanmışlardır. Fakat dezavantajlarının olmasına rağmen MgB_2 üzerinde çalışmalar hala devam etmektedir. İngiltere'de bir grup araştırmacı rezistif tip SHAS'da MgB_2 'nin kullanılmasını araştırmak için değişik MgB_2 teller hazırlamışlardır. Süperiletkenin DA koşulları altında çalıştığı köprü tipi SHAS ve doymuş demir çekirdekli SHAS'da, MgB_2 'ye dair cesaret verici beklentiler vardır (Dalessandro vd. 2007).

YSS'nin keşfiyle birlikte SHAS uygulamalarında YSS'leri kullanılmaya başlanmıştır. Sıvı azot sıcaklığının (77 K) olması YSS kullanılmasını SHAS üretiminde avantajlı bir duruma sokmuştur. SHAS uygulamalarında sıvı azot kullanımının sıvı helyum kullanımına göre avantajlı durumları sıralayacak olursak;

- Daha düşük maliyetli olması,
- Soğutma sıvısı daha yüksek ısı kapasitesine sahip olması,
- Dielektrik özelliğinin daha iyi olması,
- Dinamik sıcaklığın daha yüksek olması ve baloncuk oluşumunun daha az olması,

İlk YSS'leri ile yapılan SHAS indüktif tip olup Eritme-Döküm Yöntemi (Melt-Cast Processed) ile üretilen BSCCO süperiletkeni kullanılmasıyla yapılmıştır (Meerovich vd. 1995a, 1995b, Paul vd. 1997).

Birinci nesil (1G) YSS tel, SHAS uygulamalarında son on yılda kullanılmıştır (Oda vd. 2011). 1G YSS ile yapılan tel gümüş ve Ag-Au alaşımlı matrislerin içine yerleştirilen BSSCO filamanlardan oluşmaktadır. Bu malzemenin maliyeti gümüş ve/veya altından dolayı çok yüksek olmasının yanı sıra bu malzemeyi kullanmak hem AA kayıplarından hem de yüksek işletim maliyetinden dolayı çok fazla probleme sebep olmaktadır. İkinci nesil (2G) YSS tellerin üretilmesi dünya çapında henüz gelişim aşamasında olan YBCO kaplamalı iletken (coated conductor) malzemesine dayanmaktadır (Malozemoff vd. 2008). Son birkaç yıl boyunca birçok uygulama alanında birinci nesil tellerin yerini alan ikinci nesil YSS tellerinin gelişmesi çok hızlı olmuştur. Hata durumunda, S-N geçişi esnasında yüksek direnç sağlamak ve aynı zamanda sıcaklık artışını sınırlamak için önemli ısı kapasitesi sağlayabilmesi gibi özelliklerinden dolayı piyasada hızlı bir şekilde ticari olarak yerini almaktadır. Şirketler, şebeke projeleri için dünya çapında yüzlerce kilometre teli hazırda bulundurmışlardır. Özellikle dikkat çeken uygulamalardan birisi, özel olarak üretilen ikinci nesil YSS tellerinin hatalı akım sınırlamasında kullanılmasıdır.

2.15 SHAS'ın Tarihi Gelişim Süreci

Süperiletken malzemelerin SHAS üretiminde ilk olarak kullanılması 1970' li yıllara dayanmaktadır. Bu tarihlerde DSS materyaller ile SHAS'lar üretilmiştir. Yüksek dirençli CuNi matriksi içinde ultra-ince NbTi filamentler içeren şeritler kullanılarak rezistif tip SHAS geliştirilmiştir (Verhaege 1996). Başka DSS'li SHAS araştırmaları da

yapılmıştır (Ulbricht 1979). Ancak soğutma problemlerinden dolayı, DSS'leri ile üretilen SHAS'ların ticari ve endüstriyel boyuta taşınması çok zor ve ekonomik değildir.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin, 1986'da keşfedilmesinden sonra, soğutma maliyetlerinin azaltılması ve işletim açısından olumlu bir şekilde gelişmiştir. YBCO ve BSCCO gibi malzemelerden yüksek kalitede külçe, şerit ve filmlerin üretiminde sağlanan ilerlemeler, bu materyallerin yüksek elektrik gücünde çalışan aletlere entegrasyonuna izin vermektedir. YSS'inden imal edilmiş BSCCO-2223 şeritler genellikle indüktif tip SHAS'ların geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

1996 yılında YSS'li SHAS'lar için bir dönüm noktası olmuştur. Bu tarihte 10 kV-70 A özellikli rezistif tip SHAS'ın ilk alan testi yapılmıştır (Paul vd. 1997). Kangallar halinde hazırlanmış BSCCO-2212 tüpleri kullanarak rezistif tip SHAS'lar geliştirilmiştir (Elschner 2002). 2003 yılında üç- fazlı 10 kV-10 MV SHAS prototipi üretilmiş ve CURL10 olarak isimlendirilmiştir. Yapılan bu SHAS Almanya'da bir yıl test edilmiştir (Kreutz 2005). 110 kV-1,8 kA özellikli SHAS 2005 yılında geliştirilmiş ve şu an güç sistemleri üzerindeki entegrasyon çalışmaları devam etmektedir (Elschner 2006).

İlk köprü tipi SHAS protipi, 2.4 kV/150 A özelliğinde BSCCO 2223 şeritinden 1993 yılında yapılmıştır (Leung vd. 1997). Bu ilk başarılı protipinin ardından diğer prototip 15 kV/1.2 kA özelliğinde diyot yerine tristör kullanılarak üretilmiştir. Southern California Edison Centre Substation' da yapılan testler esnasında yardımcı ekipman parçalarında ve üç-faz testinde oluşan bir voltaj yalıtım hatasının olmadığı görülmüştür (Leung vd. 2000).

BSCCO-2223'den yapılmış süperiletken kangallar kullanılarak üretilen 2.4 kV'luk SHAS üzerine yapılan testlerin başarılı olması 15 kV-1.2 kA'lık bir prototip yapılmasına neden olmuştur. (Leung 2000). Japonya'da tek fazlı 6.6 kV-36 A lik SHAS üretilmiş ve test edilmiştir (Yazawa vd. 2001). Soğutma, aşırı voltaj, nominal akım ve hatalı akım testlerini de içine alan bir dizi deneyler yapılmıştır ve bu deneylerde materyal üzerinde hiçbir bozulma gözlenmemiştir. Daha sonra ise her biri 125 A'lık

akım taşıma kapasitesine sahip 6 tane BSCCO-2223 kangaldan oluşan 66 kV-750 A özelliklerine sahip SHAS üretilmiştir (Ootani vd. 2004). Tamamen akım sınırlayıcı olarak davranmamasına rağmen yüksek voltajlar ve akım artışları için süperiletken kangalların kullanılabileceğini göstermiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) Depermant of Energy's (DOE) Superconductivity Partnership Initiative (SPI) programı tarafından sürdürülen bir araştırma kapsamında BSSCO-2212 külçe malzemesi kullanılarak 138 kV' luk SHAS 2003 yılında yapılmıştır (Yuan vd. 2005). 8 kV-800 A'lık tek fazlı SHAS ile başarılı test çalışmaları 2001 yılında yapılmıştır (Paul vd. 2001). Bu SHAS modelinde, kıvrımlar halinde kesilmiş 100 adet BSCCO-2212 plakaları kullanılmıştır. Safir altlık üzerine hazırlanan ince film kullanılarak rezistif tip SHAS üretilmiştir (Kinder vd. 1997).

YBCO kullanılarak yapılan SHAS'ın ilk testleri Siemens tarafından 2000 yılında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 100 kVA olan modeli yapılmış ve bir tanede üç fazlı 1 MVA özelliklerine sahip SHAS üretilmiş ve test edilmiştir (Fischer ve Povh 1999, Kraemer vd. 2003). Safir altlığın yüksek maliyetli olmasından dolayı araştırmalara bir süre ara verilmiştir.

SHAS üzerine yapılan araştırma sonucunda Japonya'da iki tip rezistif SHAS yapılmıştır; bunlar, 6.6 kV -100 A yüksek voltaj tipi SHAS ve 200 V-1 kV yüksek akım tipi SHAS'dır (Noe ve Steurer 2007, Shimohata 2003). Halen Japonya'da SHAS'lar üzerine araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Kore'de Kim ve Hyun 6.6 kV-200A'lık bir rezistif tip SHAS'ı YBCO ince filmleri kullanarak üretmişler ve başarılı bir şekilde test etmişlerdir (Hyun vd. 2005).

Rezistif tip SHAS'lar için ilgi çekici bir materyal kaplanmış iletkenlerdir ve daha ziyade ikinci nesil (2G) şerit olarak adlandırılmaktadır. Bu şeritler ile yapılan araştırma-geliştirme çalışmaları bu malzemenin SHAS uygulamaları için en iyi potansiyel olduğunu ortaya çıkarmıştır. (Wilson 1983).

2006 yılında Cambridge Üniversitesi'nde MgB_2 kullanılarak 220 V -1 kV özellikli SHAS prototipini geliştirmişlerdir (Ye vd. 2007, Majoros vd. 2007). Bu araştırmaların sonucunda güç sistemlerinde kullanılmak üzere üç fazlı 6.6 kV-4 MW MgB_2 bazlı SHAS üretimi yapılmıştır. İtalyan araştırma grubu çok filamanlı MgB_2 şeritler kullanarak 27 K'de rezistif tip SHAS yapmışlardır (Dalessandro vd. 2007). MgB_2 şeritlerden hazırlanmış 500 kVA'lık SHAS prototipleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu prototip üzerinde yapılan testler neticesinde SHAS'da MgB_2 kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır ve MgB_2 şeritlerin atmalar halindeki yüksek akımlarda sınırlama özelliği sergilediği bulunmuştur. Diğer bir çalışmada ise; üç farklı kılıf ile hazırlanmış tek filamanlı ve çok filamanlı MgB_2 'nin S-N geçiş davranışı incelenmiştir (Ye vd. 2007). Deney sonuçları açıkça kılıf matris materyalinin, MgB_2 'nin S-N geçiş davranışı üzerinde önemli rol oynadığını göstermiştir. Ayrıca nano yapıda SiC katkılanmasıyla ve Mg eklemesinin akım taşıma özelliği üzerinde pozitif bir etki yaptığı bulunmuştur. Tek filamanlı MgB_2 şeritlerinden olumlu sonuçlar alındığı görülürken Cu/CuNi kaplı çok filamanlı MgB_2 şeritlerinin zayıf akım sınırlama özelliği sergilediği görülmüştür.

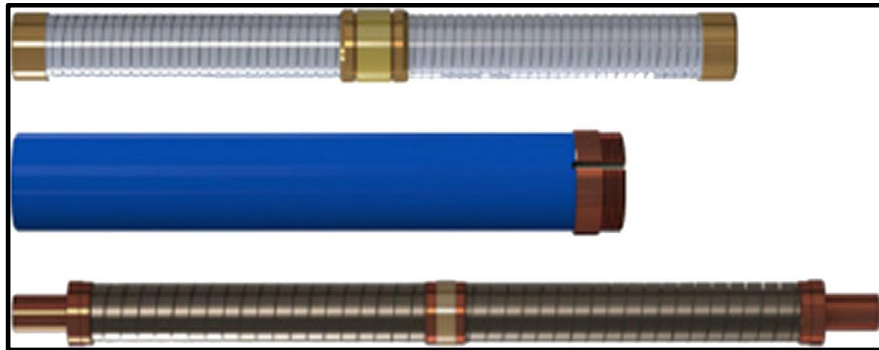
Siemens, YBCO ince filmler kullanarak rezistif tip SHAS yapmıştır (Gromoll vd. 1999). 2005 yılında Siemens ve AMSC firmaları rezistif SHAS için kaplamalı iletken olan YBCO ile ilgili çalışmaları geliştirmişlerdir (Schmidt vd. 2007). Tek-fazlı 7.5 kV/300A özellikli rezistif SHAS'ı YBCO kaplamalı iletken kullanarak yapmışlar ve test etmişlerdir. Bu SHAS tipinde manyetik alanı yok etmek için dizayn edilen bifilar bobin kullanılmıştır (Malozemoff vd. 2008).

Innopower şirketi sırasıyla 2004 ve 2005 yıllarında tek fazlı ve üç fazlı 380V prototip DC –Doymuş Demir çekirdekli SHAS yapmıştır (Xin vd. 2006). Innopower sonraki yıllarda 35 kV/90 MVA özellikli DC –Doymuş Demir çekirdekli SHAS'ı geliştirmiştir (Xin vd. 2007, Yin vd. 2009).

Kore'de, Hyundai ve Yonsei Üniversitesi'nde, bir grup araştırmacı YBCO kaplamalı iletken (coated conductor) kullanarak 13.2 kV/630A özelliklerine sahip rezistif tip SHAS üretmişlerdir. Süperiletken bobin kısa devre durumunda hatalı akımı devreye

hiçbir zarar vermeden sınırlamıştır (Kang vd. 2008). The Korea Electric Power Research Institute (KEPRI) ve LS Industrial Systems (LSIS) firmaları 22.9 kV/630A özelliklerine sahip hidrid rezistif SHAS yapmıştır. (Lee vd. 2008). Hibrid rezistif SHAS, bir tane süperiletken bobin, bir tane sürücü bobin, akım sınırlama reaktörü, hızlı çalışabilen anahtardan oluşmaktadır (Lee vd. 2009). Üretilen SHAS tipinde, hata meydana geldiğinde, YSS’i bir direnç kazanır, akım hızlı bir şekilde anahtarı açmak için güç üreten sürücü bobinden geçer ve sonrasında bu akım, hatalı akımı sınırlaması için reaktöre aktarılır. Bu araştırma grubu yaptıkları çalışmalar sonucunda, hibrid rezistif SHAS’larda kullanılacak olan süperiletken miktarını, SHAS’ın maliyetini ve hacmini de azaltmışlardır. Kasım 2009 yılında rezistif SHAS yapmışlar ve sahada yerini almadan önce Gochang Power Testing Centre of Korea Electric Power Corporation (KEPCO)’da bir takım testlere tabi tutmuşlardır (Yim vd. 2010).

Nexans firmasının tasarladığı ve ürettiği birkaç tane rezistif tip SHAS farklı güç şebekelerinde monte edilmiştir (Hobl vd. 2012, Tixador 2010). Nexans kendi süperiletken malzemelerini iki farklı teknolojiye adapte etmiştir. Bunlardan bir tanesi bobin teknolojisidir. Şekil 2.30’da görüldüğü gibi bu bobinleri Eritme-Döküm Yöntemi (Melt-Cast-Process “MCP”) kullanarak üretmiştir. BSCCO-2212 tüpler, 50-mm-dış, 42-mm-iç çap, 370 mm uzunluğa sahiptir. 73 K’de 470 A akım taşıma kapasitesine sahip bu tüpler, 3,6 m uzunluğunda dairesel bobin geometrisinin içerisine yerleştirilmiştir. Sonrasında Bi-2212 üzerine bir şönt lehimlenmiştir. Şekil 2.31’de görüldüğü üzere bu tüpler modüllerin içerisine paralel bağlanmış bir şekilde yerleştirilir.



Şekil 2.30 Nexans’a ait üç tane SHAS: 12 kV/100 A, 12 kV/400 A, 12 kV/800 A (Bock vd. 2011, <http://www.nexans.de>, 2016d).



Şekil 2.31 Bi-2212 elementleri (Tixador 2010, <http://www.nexans.de>, 2016d)

Zenergy Power 15 kV/1.2 kA özellikli DA eğilimli demir çekirdekli SHAS'ı BSCCO kullanarak 2009 Mart ayında yapmış ve test etmiştir (Moriconi vd. 2010). Yapılan SHAS, başarılı test çalışmalarının sonrasında Scunthorpe yakınlarında CE Electric U.K. trafo merkezinde kurulumu yapılmıştır (Moriconi vd. 2011, Eckroad 2011). Şekil 2.32'de farklı ülkelerdeki SHAS'ların kurulum yerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.32. a Boxberg, Almanya, b. Shandin, ABD, c. Tianjin, Çin (Nagarathna vd. 2015)

Çizelge 2.5'de 2004-2016 arası verilen SHAS projeleri hakkında detaylar verilmektedir.

Çizelge 2.5 2004-2016 arası verilen SHAS projeleri (Pei 2012, Goodhand 2013, Martini 2016)

Ülke	Şirketler	SHAS tipi	Malzeme	Faz	Test	Yıl
Almanya	ACCEL/Nexans	Rezistif	BSCCO 2212 Külçe	3- Faz	12kV, 600A	2004
Almanya/A BD	Nexans/ASL	Rezistif	BSCCO 2212 Külçe	3- Faz	12kV, 100A	2009
Almanya	Nexans	Rezistif	BSCCO 2212 Külçe	3- Faz	12kV, 800A	2009
Almanya/A BD	Nexans/ASL	Rezistif	BSCCO 2212 Külçe	3- Faz	12kV, 400A	2011
Almanya	Nexans	Rezistif	YBCO Şerit	3- Faz	12kV, 400A	2011
AB	Nexans	Rezistif	YBCO Şerit	3- Faz	24kV, 1005A	2012
Almanya/A BD	Siemens/ AMSC	Rezistif	YBCO Şerit	Tek-Faz	7,5kV, 300A	2007
Almanya/A BD	Siemens/ AMSC	Hibrid-Rezistif	YBCO Şerit	Tek-Faz	138kV, 1.2 kA	2011
İtalya	CESI Ricerca	Rezistif	BSCCO 2223 Şerit	3- Faz	3.2kV, 220A	2007
İtalya	CESI Ricerca	Rezistif	MgB2 tape	Tek-Faz	397V, 96A	2006
İtalya	ERSE	Rezistif	BSCCO 2223 Şerit	3- Faz	9kV, 250A	2010
İtalya	ERSE	Rezistif	YBCO Şerit	3- Faz	9kV, 1kA	2012
ABD	SuperPower	Rezistif	BSCCO 2212 Külçe	Tek-Faz	8.6kV, 800A	2004
ABD	Zenergy	DC eğilimli demir çekirdek	BSCCO 2223 Şerit	3- Faz	12kV, 1.2kA	2009
ABD	Zenergy	DC eğilimli demir çekirdek	BSCCO 2223 Şerit	3- Faz	12kV, 1.2kA	2011
Çin	CAS	Köprü tipi	BSCCO 2223 Şerit	3- Faz	10.5kV, 1.5kA	2005
Çin	Innopower	DC eğilimli demir çekirdek	BSCCO 2223 Şerit	3- Faz	35kV, 90MVA	2007

Çizelge 2.5 2004-2016 arası verilen SHAS projeleri (Pei 2012, Goodhand 2013, Martini 2016) (devam)

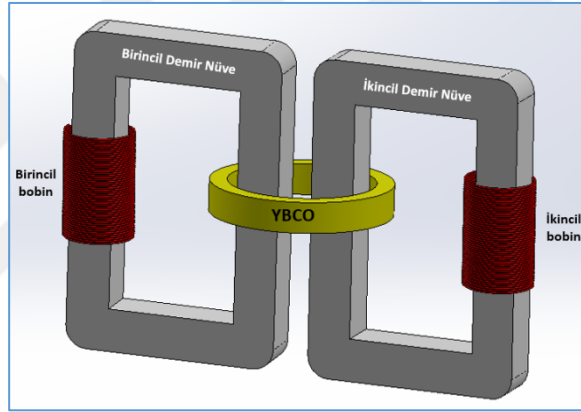
Çin	Innopower	DC eğilimli demir çekirdek	BSCCO 2223 Şerit	3- Faz	220kV, 300MVA	2010
Kore	Hyundai	Rezistif	YBCO Şerit	Tek-Faz	13.2kV, 630A	2007
Kore	KEPRI/LSIS	Hibrit Rezistif	YBCO ince film	3- Faz	22.9kV, 630A	2007
Japonya	Toshiba	Rezistif	YBCO Şerit	3- Faz	6.6kV, 72A	2008
ABD	AMSC ve Siemens/Nexans	Rezistif	2G şeritler	-	138 kV/1 kA	2013
ABD	Superpower	-	2G şeritler	-	115/14.4v V	2014
Almanya	Siemens/ AMSC	-	2G şeritler	-	10 kV/817 A	2016

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, hazırlanan deney düzenekleri yer alacaktır.

3.1 SHAS Tasarımları

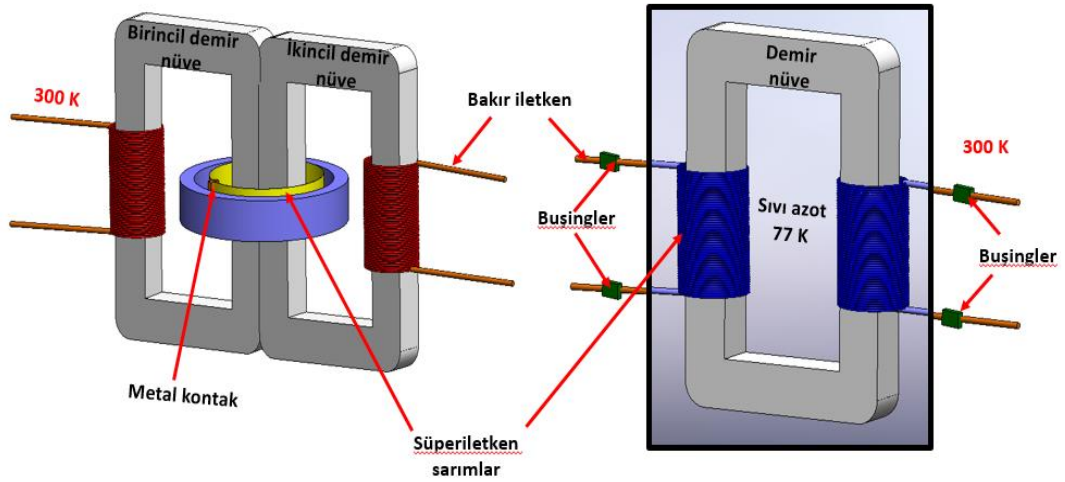
Bu tez çalışmasında aynı kesit alanına sahip iki tane birbirinden bağımsız demir nüve kullanılarak 2,5 kVA tek fazlı trafo, farklı kesit alanlarında iki tane demir nüve kullanılarak yapılan 2,5 kVA tek fazlı trafo ve 3-fazlı 6 kVA'lık trafo yapılmıştır.



Şekil 3.1 SHAS'ın şematik gösterimi

Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen sistem, birbirinden bağımsız iki tane demir nüve, birincil ve ikincil bobinler ve süperiletken halkadan oluşmaktadır. Birincil ve ikincil bobinler bakır tel kullanılarak yapılmıştır. Süperiletken halkanın görevi; birbirinden bağımsız iki tane demir nüveyi manyetik akı transferi aracılığıyla birbirine bağlayarak ikincil demir nüveye kayıpsız bir şekilde enerji transferi yapmaktır. Eğer akım süperiletken halkanın taşıyabileceği akım değerinden çok yüksek bir değerde olursa; süperiletken halka süperiletken durumdan çıkarak normal duruma dönüşür ve çiftlenmiş durumda olan birincil ve ikincil demir nüveler birbirinden ayrışır. Bu sayede ikincil taraftaki voltaj değeri aniden düşerek, meydana gelen hatalı akım sınırlandırılır. Böylece üretilen manyetik akı transfer tipi trafo SHAS olarak kullanılabilir. Daha önce yapılan çalışmalarda süperiletken veya bakır malzeme kullanılarak yapılmış trafo çeşitleri vardır

ve yapılan bu trafo çeşitlerinin birbirlerine göre avantajlarının ve dezavantajlarının olduğu durumlar bulunmaktadır. Üretilen bu trafo, manyetik akı transfer tipi trafo olarak isimlendirilmiştir. Manyetik akı transferi tipi trafonun süperiletken trafolarla göre avantajlarının olduğu bazı özellikleri vardır. Her iki trafo modelinde süperiletken kullanıldığından soğutma sıvısına ve kroyastata ihtiyaç duyulur. Üretilen manyetik akı transfer tipi trafoda, YBCO halkanın uç kısımlarını birleştirmek için metal kontak kullanılmıştır fakat bu metal kontak sıvı azotun içerisinde olduğundan direnci çok küçüktür ve ihmal edilebilir bir kayıp söz konusudur. Şekil 3.2’de manyetik akı transfer tipi trafo ile süperiletken trafo şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Manyetik akı transfer tipi ve süperiletken trafonun şematik olarak kıyaslanması

Bu iki trafo çeşitini karşılaştırmak istersek;

- Süperiletken trafoların bobinleri için süperiletken tel kullanıldığından çok fazla tel gerekmektedir. Manyetik akı transfer tipi trafoda ise; birbirinden bağımsız iki tane demir nüvenin orta kısmında kullanıldığından kullanılan süperiletken malzeme miktarı daha azdır.
- Süperiletken trafonun tamamı soğutma sıvısının içerisine daldırılarak soğutma işlemi gerçekleştirilir ve çok fazla soğutma sıvısı gerekir. Manyetik akı transferi tipi trafoda ise süperiletkeni soğutmak için sistemin tamamını soğutma sıvısına daldırmak gerekmeyeceğinden daha az soğutma sıvısı kullanılır.

- Manyetik akı transfer tipi trafoda soğutulacak olan alan daha az olduğundan kroyastat yapımı daha az maliyetli ve kroyastat enerji tüketimi daha az olur.
- Geleneksel trafo modellerinde elektrik şebekesiyle trafo birbirlerine buşingler aracılığıyla bağlanır ve bu durum ısı transferinden kaynaklı olarak kayıplar meydana getirir. Bizim ürettiğimiz trafoda ise; dış ortam bağlantısı olmadığından böyle bir kayıptan bahsedilemez. Bu durumun avantajı ise; kayıpların azalması ve verimliliğin artmasının sağlamasıdır.

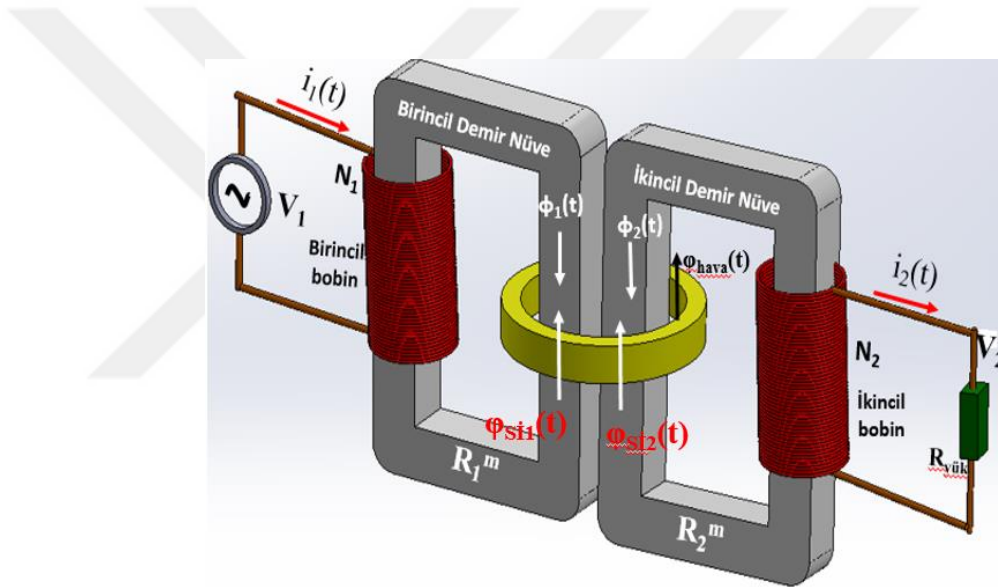
Çizelge 3.1’de yapılan SHAS’a ait detaylar verilmektedir. Birincil bobine alternatif akım verilmesinden kaynaklı birincil demir nüvede oluşan manyetik akı süperiletken halkada akım indüklenmesine sebep olur. Burada birincil demir nüvede oluşan akıya karşı süperiletken halkada oluşan ters yönde manyetik akı vardır (Şekil 3.3). Süperiletken halka, içerisinde indüklenen akıya ters yönde bir akı oluşturarak içerisindeki manyetik akıyı sıfırlamak ister. Şekil 3.4’de görüldüğü üzere mavi ok; kaynak tarafından oluşturulan manyetik akıyı, yeşil ok ise; Lenz kanununa dayanan bu akı değişimine tepki olarak süperiletken tarafından oluşturulan ters yönlü manyetik akıyı göstermektedir. Daha öncesinde manyetik akı transferi yöntemi kullanılarak yapılmış SHAS’lar vardır (Ertekin 2016, Gecer vd. 2016).

Çizelge 3.1 Manyetik akı transfer tipi SHAS’a ait detaylar

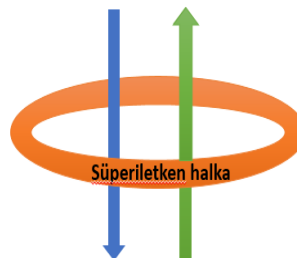
Kısaltmalar	Açıklamalar
N_1	Birincil bobinin sarım sayısı
N_2	İkincil bobinin sarım sayısı
V_1	Birincil bobine uygulanan voltaj
V_2	İkincil bobinde okunan voltaj
$\phi_1(t)$	Birincil demir nüvedeki manyetik akı
$\phi_2(t)$	İkincil demir nüvedeki manyetik akı
$\phi_{hava}(t)$	Havaya sızan manyetik akı
$\phi_{SII}(t)$	Birincil demir nüvede oluşan akıya karşı süperiletken halkada oluşan ters yöndeki manyetik akı

Çizelge 3.1 Manyetik akı transfer tipi SHAS’a ait detaylar (devam)

$\phi_{sl2}(t)$	İkincil demir nüvede oluşan akıya karşı süperiletken halkada oluşan ters yöndeki manyetik akı
R_1^m	Birincil demir nüvenin relüktansı
R_2^m	İkincil demir nüvenin relüktansı
$R_{yük}$	Yükteki direnç
$i_1(t)$	Birincil bobindeki akım
$i_2(t)$	İkincil bobindeki akım



Şekil 3.3 Manyetik akı transfer tipi SHAS’ın tek fazı için şematik gösterim



Şekil 3.4 Süperiletken halkadaki akı değişimleri

Başlangıçta birbirinden bağımsız olan iki tane demir nüve süperiletken halkadan dolayı birbirleriyle çiftlenerek ikincil taraftaki bobinde bir voltaj oluşmasını sağlar. Bu oluşan voltaj değeri sarım sayısı ile doğru orantılı bir şekilde değişkenlik gösterir. Buna ilişkin hesaplamalar aşağıda verilmektedir.

$$\varphi_1(t) + \varphi_2(t) = \varphi_{Si1}(t) + \varphi_{Si2}(t) + \varphi_{hava}(t) \quad (3.1)$$

$$\frac{N_1 i_1(t)}{R_1^m} + \frac{N_2 i_2(t)}{R_2^m} = \frac{i_{Si}(t)}{R_1^m} + \frac{i_{Si}(t)}{R_2^m} + \frac{i_{Si}(t)}{R_{hava}^m} = i_{Si}(t) \left[\frac{1}{R_1^m} + \frac{1}{R_2^m} + \frac{1}{R_{hava}^m} \right] \quad (3.2)$$

$$i_{Si}(t) = \frac{N_1 i_1(t)}{R_1^m \left(\frac{1}{R_1^m} + \frac{1}{R_2^m} + \frac{1}{R_{hava}^m} \right)} + \frac{N_2 i_2(t)}{R_2^m \left(\frac{1}{R_1^m} + \frac{1}{R_2^m} + \frac{1}{R_{hava}^m} \right)} \quad (3.3)$$

$$i_{Si}(t) = \frac{N_1 i_1(t)}{\left(1 + \frac{R_1^m}{R_2^m} + \frac{R_1^m}{R_{hava}^m} \right)} + \frac{N_2 i_2(t)}{\left(1 + \frac{R_2^m}{R_1^m} + \frac{R_2^m}{R_{hava}^m} \right)} \quad (3.4)$$

$$i_{Si}(t) = \frac{N_1 i_1(t)}{\left(\frac{R_2^m R_{hava}^m + R_1^m R_{hava}^m + R_1^m R_2^m}{R_2^m R_{hava}^m} \right)} + \frac{N_2 i_2(t)}{\left(\frac{R_2^m R_{hava}^m + R_1^m R_{hava}^m + R_1^m R_2^m}{R_1^m R_{hava}^m} \right)} \quad (3.5)$$

$$i_{Si}(t) = \frac{N_1 i_1(t) R_2^m R_{hava}^m}{R_2^m R_{hava}^m + R_1^m R_{hava}^m + R_1^m R_2^m} + \frac{N_2 i_2(t) R_1^m R_{hava}^m}{R_2^m R_{hava}^m + R_1^m R_{hava}^m + R_1^m R_2^m} \quad (3.6)$$

Eğer, $R_{hava}^m \rightarrow \infty$

$$i_{Si}(t) = \frac{N_1 i_1(t) R_2^m}{R_1^m + R_2^m} + \frac{N_2 i_2(t) R_1^m}{R_1^m + R_2^m} \quad (3.7)$$

1. İkincil bobine bağlı yük yok iken;

$$i_{si}(t) = \frac{N_1 i_1(t).R_2^m}{R_1^m + R_2^m} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de görüldüğü üzere süperiletken halkadaki akımın değeri demir nüvelerin geometrilerine bağlı olarak değişir.

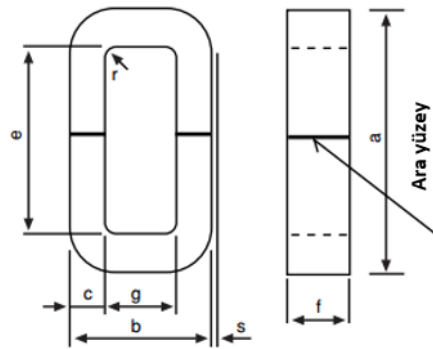
2. İkincil bobine bağlı yük var iken;

$$i_{si}(t) = \frac{N_1 i_1(t).R_2^m}{R_1^m + R_2^m} + \frac{N_2 i_2(t).R_1^m}{R_1^m + R_2^m} = N_2 i_2(t) \quad (3.9)$$

Bu durumda süperiletken halkadaki akımın değeri, ikincil bobinin sarım sayısı ve akım değerine bağlı fakat demir nüvelerin geometrilerinden bağımsızdır.

3.1.1 Aynı geometriye sahip demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS

Yapılan bu çalışmada aynı kesit alanına sahip iki tane demir nüve kullanılmıştır. Kullanılan bu demir nüvenin şematik olarak gösterimi şekil 3.5’de verilmiştir. Çizelge 3.2- 3.3’de demir nüveye ait parametreler verilmektedir.



Şekil 3.5 Demir nüvenin dikey gösterimi

Çizelge 3.2 Demir nüveye ait ölçü parametreleri

Kısaltmalar	a	b	c (-tolerans)	e	f (-tolerans)	g	r	s
Değerler(cm)	30,72	18,13	5,97 -0,18	18,4	9,2-0,2	6	0,3	0,06

Çizelge 3.3 Demir nüveye ait değerler

Kısaltmalar	Açıklamalar	Değerler
$Y_{S_{nüve}}$	Yığılma sabiti	0,95
$\gamma_{nüve}$	Yoğunluğu	7650 kg/m ³
$\mu_{nüve}$	Geçirgenlik sabiti	4350
C_{lam}	Levha kalınlığı	0,0003m
B_{max}	Maksimum akı yoğunluğu	1,7 T
P_{loss}	Toplam güç kaybı	2 (W/kg)
$m_{nüve}$	Ağırlığı	26,98 kg

Nüvenin kesit alanı;

$$A_{nüve} = c_{min} \times f_{min} \times Y_{S_{nüve}} \quad (3.10)$$

$$A_{nüve} = (5,97 - 0,18) \times (9,2 - 0,2) \times 0,95 = 49,5 \text{ cm}^2 = 49,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Denklem 3.11’de f; frekans, V voltaj değeri, N_1 ; birincil bobinin sarım sayısı, $B_{nüve}$; maksimum akı yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$B_{nüve} = \frac{V}{4,44 f N_1 A_{nüve}} \quad (3.11)$$

$$N_1 \cong 117 \text{ sarım}$$

SHAS’a yapımında birincil bobin 115 sarım yapılarak hazırlanmıştır.

$l_{n\ddot{u}ve}$; demir n\ddot{u}ve \u00fczerindeki manyetik akının dolandığı yolu ifade etmektedir. Bu değer fabrika verilerine g\u00f6re $0,676\ m$ olarak alınmıştır. Bu durumda demir n\ddot{u}venin rel\ddot{u}ktansı ($\mathcal{R}_{n\ddot{u}ve}$) denklem 3.12 ile ifade edilir.

$$\mathcal{R}_{n\ddot{u}ve} = \frac{l_{n\ddot{u}ve}}{A_{n\ddot{u}ve} \mu_0 \mu_{n\ddot{u}ve}} \quad (3.12)$$

$$\mathcal{R}_{n\ddot{u}ve} = 24982,87\ 1/H$$

$$\mu_0 \text{ (serbest uzayın ge\c{c}irgenlik sabiti)} = 4\pi \times 10^{-7}\ H \cdot m^{-1} \approx 1,2566 \times 10^{-6}\ H \cdot m^{-1}$$

Demir n\ddot{u}venin reaktansı;

$$V_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.13)$$

Maksimum akı yoğunluğu; $B_{n\ddot{u}ve}$, manyetik alan g\ddot{u}c\ddot{u}; $H_{n\ddot{u}ve}$ olarak verilirse;

$$\varphi = B_{n\ddot{u}ve} A_{n\ddot{u}ve} \quad (3.14)$$

L_m ; demir n\ddot{u}venin ind\ddot{u}ktans değerini vermek \u00fczere birincil taraftaki voltaj ifadesi denklem (3.15)'de verilmektedir.

$$V_1 = \frac{N_1^2 A_{n\ddot{u}ve} \mu_0 \mu_{n\ddot{u}ve}}{l_{n\ddot{u}ve}} \frac{di_1}{dt} \quad (3.15)$$

$$V_1 = L_m \frac{di_1}{dt} \quad (3.16)$$

$$L_m = N_1^2 \frac{\mu_0 \mu_{n\ddot{u}ve} A_{n\ddot{u}ve}}{l_{n\ddot{u}ve}} \quad (3.17)$$

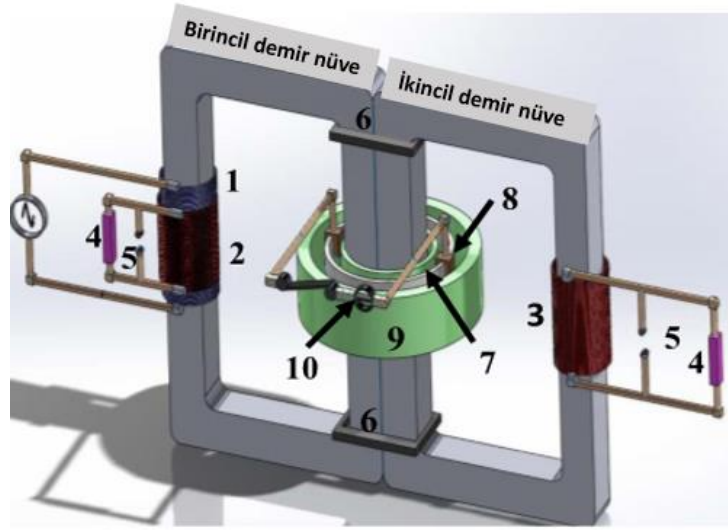
$$X_m = \omega L_m \quad (3.18)$$

Bu durumda manyetik reaktans;

$$X_m = \frac{\omega N_1^2 A_{n\ddot{u}ve} \mu_0 \mu_{n\ddot{u}ve}}{l_{n\ddot{u}ve}} \quad (3.19)$$

166,304 *ohm* olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalardan görüldüğü üzere manyetik reaktans ve relüktans yapılan bobinlerin dirençlerinden çok büyük olduğu görülmektedir. Deneyler esnasında kullanılan demir nüvenin kesit alanı 49,5 cm² olarak hesaplanmıştır. Bu durumda tasarlanan trafonun gücü; $P \approx A^2$ idafe edilir. Bu denklemde P, trafonun gücünü ve A ise kullanılacak demir nüvenin kesit alanını ifade etmektedir. Hesaplanan güç değeri yaklaşık olarak 2450 W'dır ve sistem için nominal akım değeri; yaklaşık olarak 11,13 A olarak belirlenmiştir. 1 mm² kesit alanına sahip bakır telin taşıyabileceği maksimum akım değeri 2,5 A olduğu varsayılarak, bakır telin çapı yaklaşık olarak 2,38 mm olarak hesaplanır. Bu durumda sisteme maksimum voltaj verildiğinde bakır telin akımı taşıması için sahip olması gereken çap değeri 2,5 mm olmalıdır. Bobinlerin sarım sayıları birincil bobin için 115, ikincil bobin için 125 sarım olarak belirlendi. İkincil bobinin sarım sayısının fazla olma sebebi; kayıplardan kaynaklıdır.

Bu çalışmada süperiletken halkaya kontrol edilebilir ekstra DA ve indüklenmiş AA verilerek 2,5 kVA tek- fazlı manyetik akı transfer tipi trafo yapılmıştır. Şekil 3.6'da sistem şematik olarak gösterilmektedir. Çizelge 3.4'de sisteme ait detaylar verilmektedir.



Şekil 3.6 2,5 kVA tek- fazlı trafo

Çizelge 3.4 SHAS'a ait detaylar

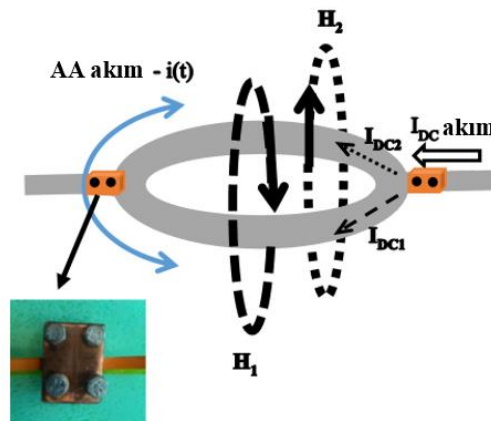
İfadeler	Açıklamalar
1	Birincil taraftaki birincil bobin
2	Birincil taraftaki ikincil bobin
3	İkincil taraftaki ikincil bobin
4	Yük
5	Kısa-devre bağlantı noktası
6	Kelepçe
7	YBCO halka/sargı
8	Mekanik kontak
9	Soğutma kabı
10	Doğru akım güç kaynağı

Sisteme kontrol edilebilir ekstra DA verilmesinin amacı, YBCO halkanın süperiletken durumdan normal duruma geçişini kolaylaştırarak birincil ve ikincil bobinler arasındaki enerji transferi ve akı bağlantısını kapatarak ek bir işlevsellik getirmektir. Kısacası, hata durumunu oluşturmak için devreye bir DA verilmektedir. Süperiletken halka, birincil ve ikincil demir nüvelerin orta kısmındaki soğutma kabının içerisine yerleştirilmiştir. Burada süperiletken halka birincil taraftaki birincil bobinden ikincil taraftaki ikincil bobine akı transfer işlemini gerçekleştirmektedir. Süperiletken halka/sarım içerisindeki akım birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler; birincil bobin ve ikincil bobindeki akım değerleri, demir nüvelerin relüktansları, birincil ve ikincil bobinlerin sarım

sayıları, çalışma sıcaklığı vb. değerlere bağlıdır. Süperiletken halka birbirinden bağımsız iki tane demir nüvenin kanatlarını ve aynı zamanda ikincil taraftaki ikincil bobinle birincil taraftaki birincil bobini eşleştirerek önemli bir avantaj sağlar. Bu özelliği sayesinde meydana gelen hatalı akımlardan sistemi korur. Başlangıçta sisteme ek DA verilmezken yani, sistem ikincil bobin nominal voltaj değerinde iken, akı transferi yöntemiyle kendi kendini sınırlayan bir trafo görevi görmektedir. Bu durum denklem 3.20 ile ifade edilebilir.

$$V_2 \cong \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (3.20)$$

Burada V_2 ikincil voltaj, N_2 ikincil bobinin sarım sayısı, V_1 birincil bobinin voltajı, N_1 birincil bobinin sarım sayısıdır. Şekil 3.7'den görüldüğü üzere süperiletken halkanın orta kısımlarına metal kontak bağlanarak DA verildiğinde, yükselen akım değeri süperiletken halkanın taşıyabileceği maksimum akım değerini aşar ve halka normal duruma geçerek bir direnç kazanır. Bu durumda her iki bobin arasındaki eşleşme bozulur ve ikincil taraftaki voltaj değeri bu sayede azaltılmış olur. Şekil 3.7'de süperiletken halka/sarım doğru akım güç kaynağına mekanik kontaklarla bağlanması şematik olarak ve alt sol kısımda ise, oksijen içermeyen yüksek iletken (OFHC) mekanik kontağın fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Süperiletken halka/sarım doğru akım güç kaynağına mekanik kontaklarla bağlanması

Sisteme verilen ekstra DA halkadaki akının sürekliliğini etkilemez. Halkanın içerisindeki doğru akım öz- manyetik alan üreten eşit iki kola ayrılır. Bu iki tane doğru akım kolu aynı indüktans ve akı akış direnci özelliklerine sahip olduğundan bu akımların manyetik alanı birbirine ters yöndedir ve üretilen bu manyetik alanlar birbirini yok eder. Bu nedenle halkanın içerisindeki manyetik akı değişmez. DA'ın AA enerji transferini etkilemesi beklenmez. Birinci taraf ve ikinci taraf arasındaki eşleşme bozulduğunda bu durum aşağıdaki denklemlerle açıklanabilir.

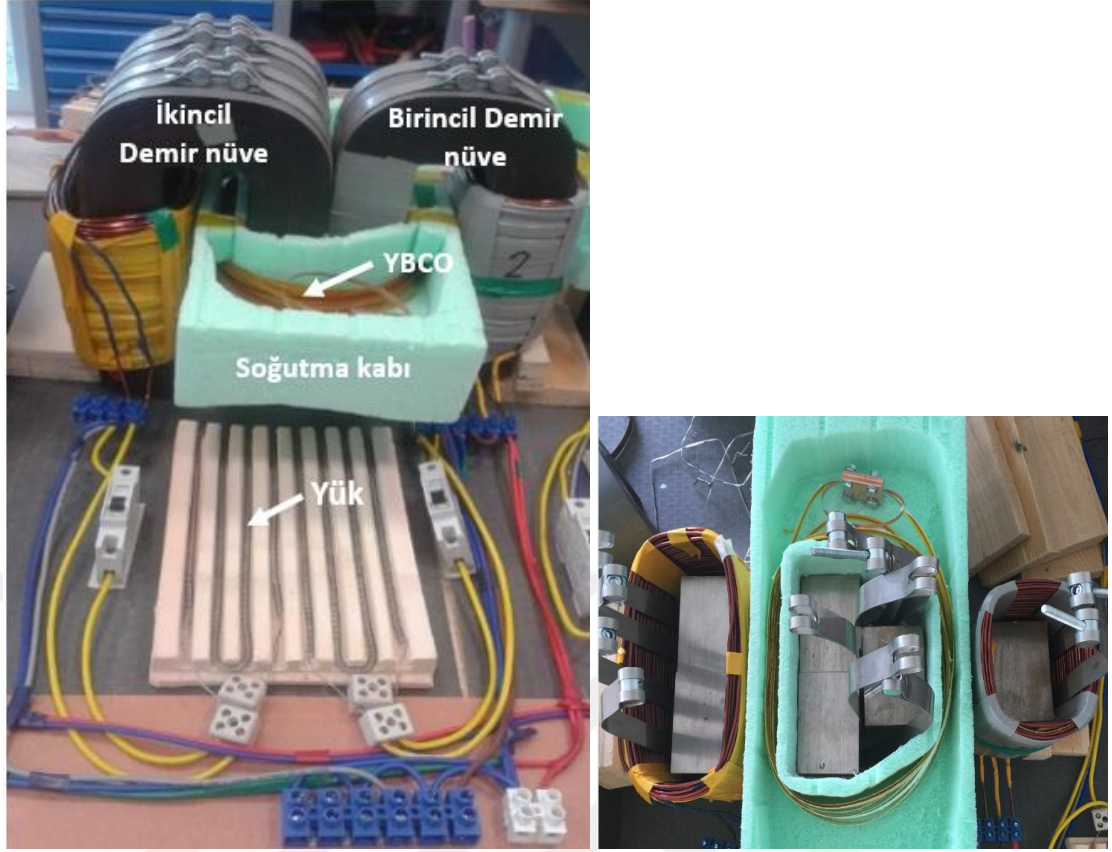
$$I_{DC} = I_{DC1} + I_{DC2} \quad (3.21)$$

$$I_{DC1} + I_{tepe} > I_{şok} \quad (3.22)$$

$$I_{DC2} + I_{tepe} > I_{şok} \quad (3.23)$$

3.1.2 Farklı geometriye sahip demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS

Farklı geometriye sahip demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS'a ait deney düzeneğini hazırlamak için 49,5 cm² kesit alanına sahip iki tane demir nüve yan yana konularak kesit alanı büyütülmüş karşı tarafa ise; yine aynı kesit alanına sahip bir tane daha demir nüve konularak şekil 3.8'deki düzenek hazırlanmıştır.

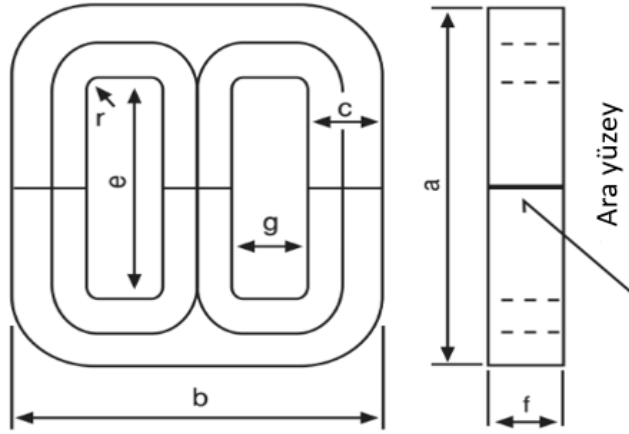


Şekil 3.8 Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS'a ait görseller

İkincil tarafta iki tane demir nüve yanyana konularak kesit alanı iki katına çıkarılmıştır. Manyetik akının dolandığı yol değişmediği için relüktans değeri kesit alanıyla ters orantılı olacak şekilde değişmektedir. Bu durumda demir nüvenin relüktans değeri yarıya düşmektedir. Süperiletken halkadaki akımın değeri demir nüvelerin relüktans değerlerine bağlı olarak değişir. Manyetik reaktans değeri, kesit alanıyla doğru orantılı olacak şekilde değişmektedir. Bu durumda ikincil taraf için manyetik reaktans iki katına çıkmaktadır.

3.1.3 3-fazlı 6 kVA SHAS

Şekil 3.9'da 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS yapımında kullanılan demir nüve şematik olarak gösterilmektedir. Aynı zamanda çizelge 3.5'de bu nüveye ait detaylar verilmektedir.



Şekil 3.9 SHAS yapımında kullanılan demir nüve

Çizelge 3.5 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'da kullanılan demir nüveye ait değerler

Kısaltmalar	a	b	c-tolerans	e	f- tolerans	g	r
Değerler(cm)	30,72	30,1	5,97 -0,18	18.4	7,7-0,2	6	0,3

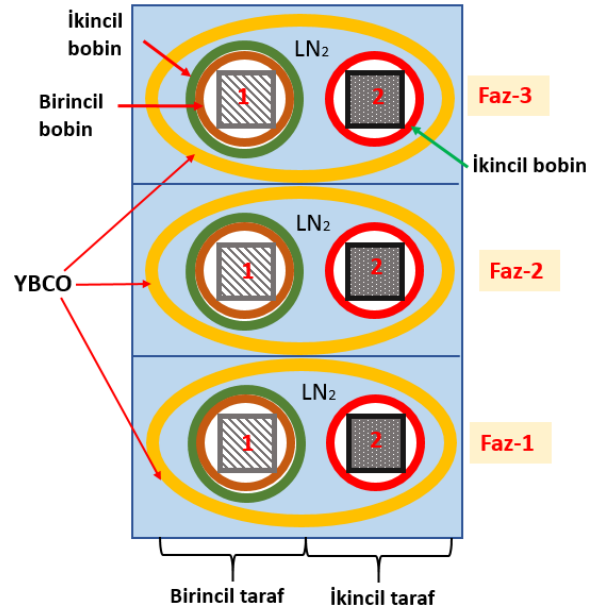
3-fazlı SHAS'ın yapımında kullanılan demir nüveye ait hesaplamalar aşağıda verilmektedir.

Nüvenin kesit alanı denklem (3.10) ifadesinden yaklaşık olarak $41,3 \times 10^{-4} m^2$ olarak bulunmuştur. Birincil bobin için sarım yaklaşık olarak 141 sarım bulunmuştur. Fakat yapmış olduğumuz SHAS çeşidinde kayıplarda gözönünde alınarak birincil bobindeki sarım sayısını 150 sarım olarak oluşturulmuştur. Demir nüvenin relüktansı ifadesinden yaklaşık olarak $47838,17 \text{ } 1/H$ olarak bulunmuştur. Burada $l_{nüve}$ değeri fabrika verilerine göre 1,08 m alınmıştır. Bu durumda nüvenin manyetik reaktansı $147,76 \Omega$ olarak hesaplanmıştır.

3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'ın tek fazı için kullanılması gereken yükün direnç değeri hesaplaması verilmektedir. Birincil voltaj değerini 220 V olarak aldığımızda ikincil voltaj değeri 117,3 V olarak hesaplanmıştır. Yapılan 3-fazlı sistemin % 70 verimle çalışması durumunda, sistemin tek fazının gücü 1400 W olacaktır. Bu durumda tek faz

için kullanılacak yükün direnç değeri; ($P=V^2/R$) ifadesinden yaklaşık olarak 10Ω bulunmuştur.

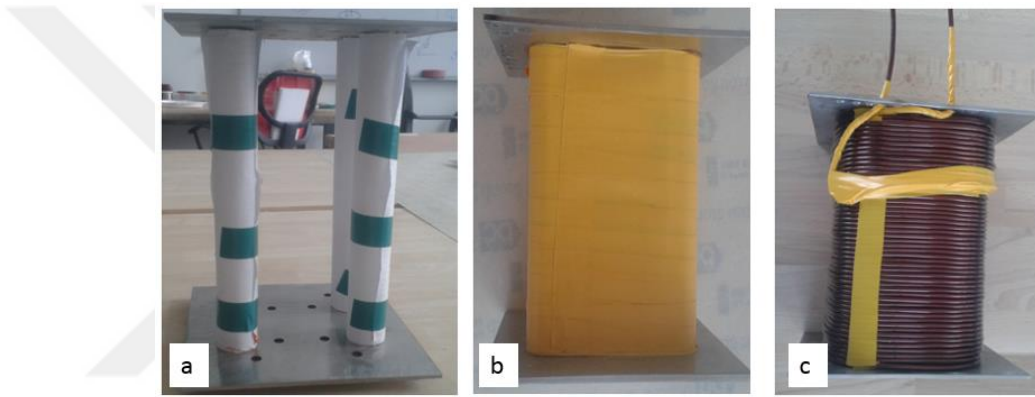
3- fazlı sistem yapımı için kullanılan demir nüvenin kesit alanı yapılan hesaplamalara göre $41,3 \text{ cm}^2$ olarak bulunmuştur. Trafonun güç hesabı kullanılan demir nüvenin kesit alanına göre hesaplandığında; $P \approx A^2$ şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemde P, trafonun gücünü ve A ise kullanılacak demir nüvenin kesit alanıdır. Bu durumda tek faz için hesaplanan güç değeri 1,7 kVA'dır. Sistem için nominal akım değeri; yaklaşık olarak 9,1 A olarak belirlenmiştir. Bu durumda yapılan hesaplamalar sonucu telin çapı yaklaşık olarak 2,15 mm bulunmuştur. Fakat sisteme maksimum voltaj verildiğinde bakır telin akımı taşıması için sahip olması gereken çap değeri 2,5 mm, ikincil bobin içinse 3 mm çapında olması gerektiğine karar verilmiştir. Nominal akım değeri deneysel olarak belirlendikten sonra tasarlanan trafonun tek bir fazı için güç hesabını $P = V.I$ ifadesinden 2 kVA olarak hesaplanmıştır. Bu durumda 3- faz için trafonun gücü 6 kVA olarak belirlenmiştir. Şekil 3.10'da 3- fazlı SHAS şematik olarak gösterilmektedir. 1 ve 2 numarayla gösterilen sırasıyla birincil ve ikincil demir nüvedir. Birincil bobin için 150, ikincil bobin içinse 80 sarım yapılmıştır.



Şekil 3.10 3- fazlı SHAS'ın üstten şematik gösterimi

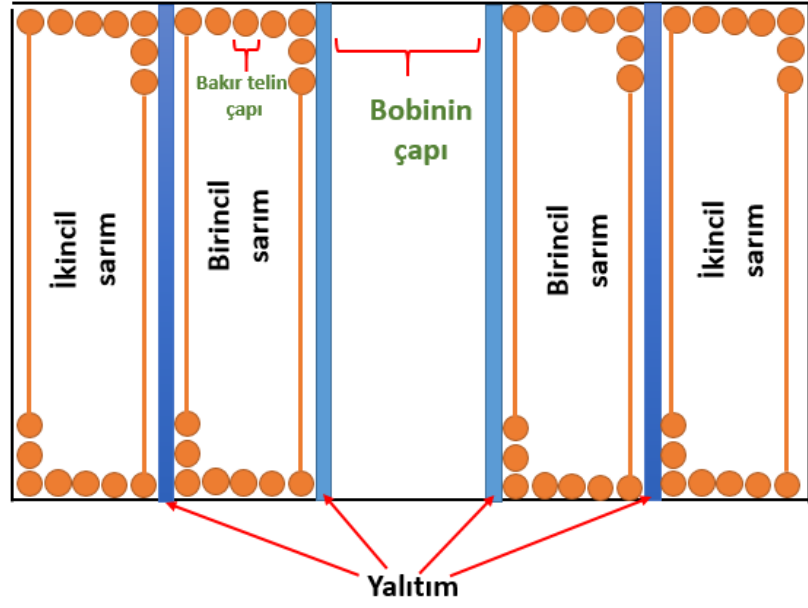
3.2 Deney Düzenegi İçin Hazırlıklar

Bu tez çalışmasında öncelikle bobinlerin sarım işlemleri tamamlanmış ve bobinlerin oluşturulmasında uygun çaplarda teller seçilmiştir. Demir nüvelerin kanat kısımları bobinlerin kısa devre durumunu ortadan kaldırmak için elektrik bandıyla kaplanmış ve demir nüvelerin yarıçaplarına uygun olacak şekilde şekil 3.11.a'da görüldüğü gibi demirden kalıp yapılarak ve demir bacakların üzeri yalıtım malzemesiyle kaplanmıştır. Bu işlemin yapılma sebebi; bakır tel sarımını kolaylaştırmak ve bobin sarımı bittikten sonra kalıptan bobini daha kolay bir şekilde çıkarmaktır.



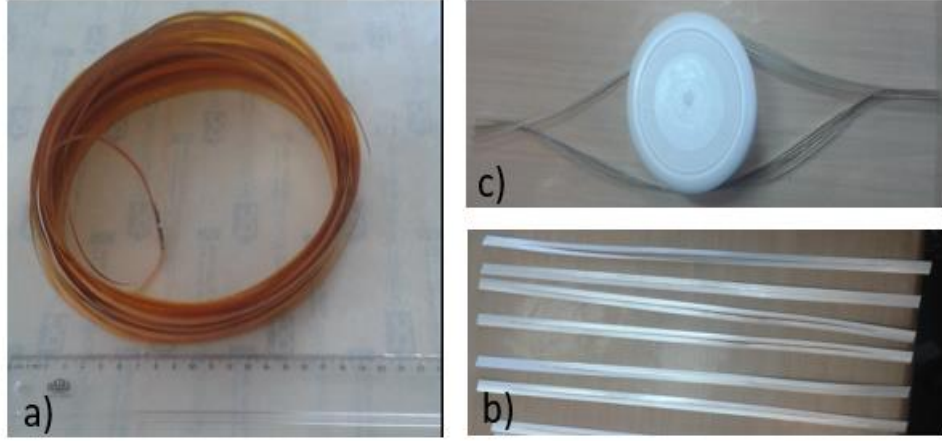
Şekil 3.11.a Bobinler için demir kalıp, b. Demir kalıbın yalıtım malzemesi ile kaplanması, c. Bobinlerin sarımı

Bu yalıtım malzemesinin etrafına bakır tel mümkün olduğunca aralarında boşluk kalmayacak şekilde sarılmıştır. Sarma işlemi tamamlandıktan sonra bobinin etrafı elektrik bandıyla sıkı bir şekilde dağılmaması için sarılmıştır. Şekil 3.12'de bobinin dikey olarak şematik gösterimi verilmektedir.



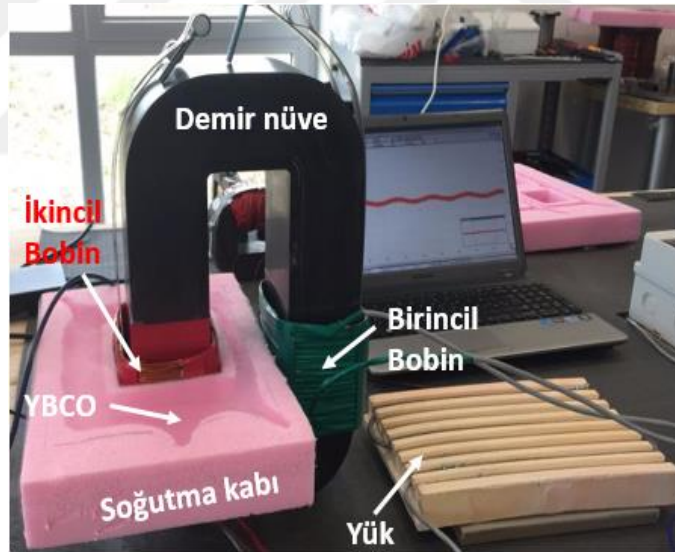
Şekil 3.12 Bobinin dikey olarak gösterimi

Bakır bobinler sarıldıktan sonra süperiletken telleri sıvı azot ortamında soğutmak için, strafor demir nüvenin yarıçapını saracak şekilde kesilmiş ve matkap ile oyularak süperiletken teller bu soğutma kabının içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlem her üç sistemdeki demir nüvelerin yarıçaplarına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Süperiletken tellerin birbiyle bağlanma işlemi oda sıcaklığında direnci $0,4 \mu\Omega$ olan oksijen içermeyen yüksek iletken (OFHC) metal kontak yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler esnasında SuperPower firmasının üretmiş olduğu SCS4050 ve SF12050 ikinci nesil kaplanmış süperiletken teller, bakır tel ve konstantan tel kullanılmıştır. Süperiletken teller seri ve paralel olacak şekilde demir nüvelerin çaplarına uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Seri olarak hazırlanan teller değişik sarım sayılarında sarılarak süperiletken halkalar oluşturulmuş ve bu süperiletken tellerin yalıtımını sağlamak için kapton bant ve kağıt peçete kullanılmıştır. Paralel olarak hazırlanan teller, No. 13610 Inox, Martor-Solingen marka endüstriyel bıçak yardımıyla ortadan ikiye kesilmiştir. Şekil 3.13’de seri ve paralel olarak hazırlanan süperiletken teller gösterilmektedir.



Şekil 3.13.a Seri hazırlanan SCS4050 süperiletken tel b,c. Paralel hazırlanan SF12050 süperiletken tel

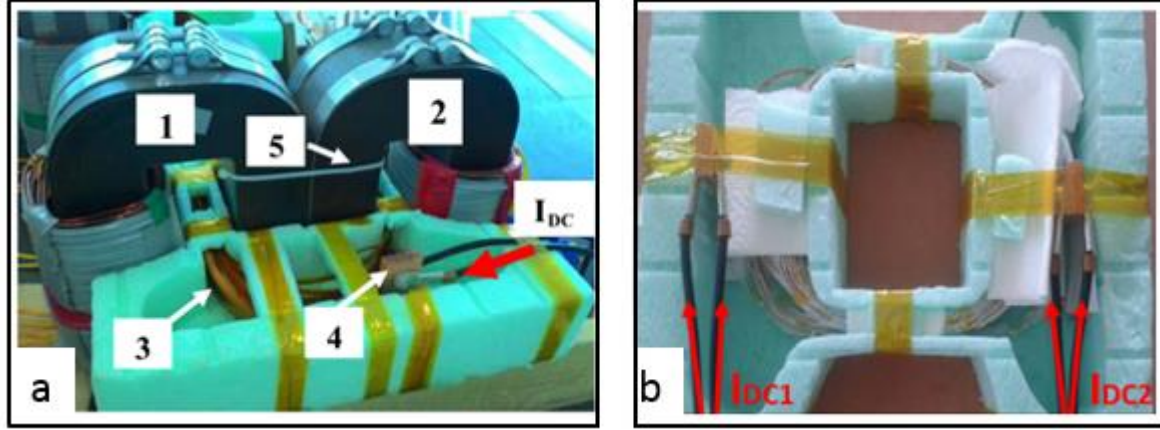
Ortadan ikiye kesilerek hazırlanan tellerin kesim sırasında zarar görüp görmediğini ve kritik akım değerini belirlemek için Şekil 3.14’deki sistem oluşturulmuştur.



Şekil 3.14 Telleri denemek için hazırlanan düzenek

Hazırlanan deney düzeneğindeki demir nüvenin kesit alanı fabrika verilerine göre $67,24 \text{ cm}^2$ olarak alınmıştır. Birincil bobindeki sarım sayısı 70, ikincil bobindeki sarım sayısı 140 olarak belirlenmiştir. Kritik akım değeri 308 A olan SF12050 YBCO süperiletkeninden 37 cm kesilerek her iki kenarından 3 cm kadar kesilmeden bırakılmıştır. Diğer 31 cm’lik kısmı ortadan ikiye endüstriyel bıçak yardımıyla kesilmiştir. Bu şekilde toplamda 51 tane YBCO halka oluşturulmuştur. Hazırlanan her

bir YBCO halka ayrı ayrı soğutma kabına konularak sıvı azot ortamında soğumaya bırakılmıştır ve soğutma kabının içerisine sürekli sıvı azot takviyesi yapılmıştır. Hazırlanan bu deney düzeneği sayesinde halkaların kritik akım değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.15’de 2,5 kVA’lık trafonun fotoğrafı ve halkaya doğru akım verilmesi gösterilmiştir. Çizelge 3.6’da ise; yapılan bu SHAS’a ait detaylar verilmektedir.

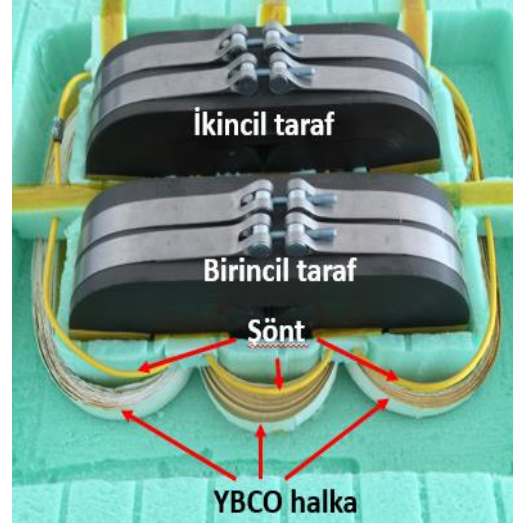
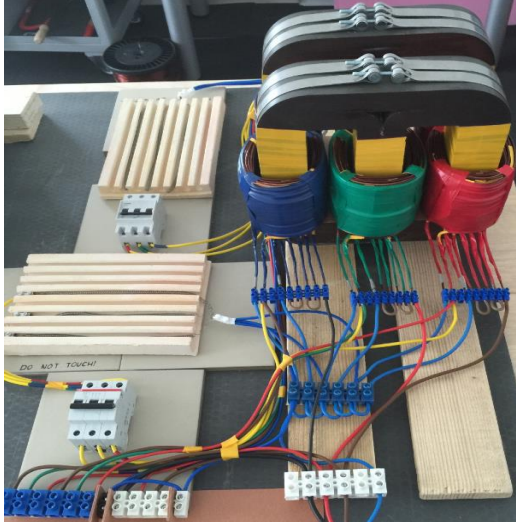


Şekil 3.15.a 2,5 kVA’lık trafonun fotoğrafı, b. Halkaya doğru akım verilmesi

Çizelge 3.6 2,5 kVA’lık trafoya ait detaylar

Gösterim	Açıklama
1	Birincil taraf
2	İkincil taraf
3	Süperiletken halka
4	Metal kontak
5	Klamp

Şekil 3.16’da 3-fazlı 6 kVA’lık SHAS’a ait deney düzeneği verilmiştir.

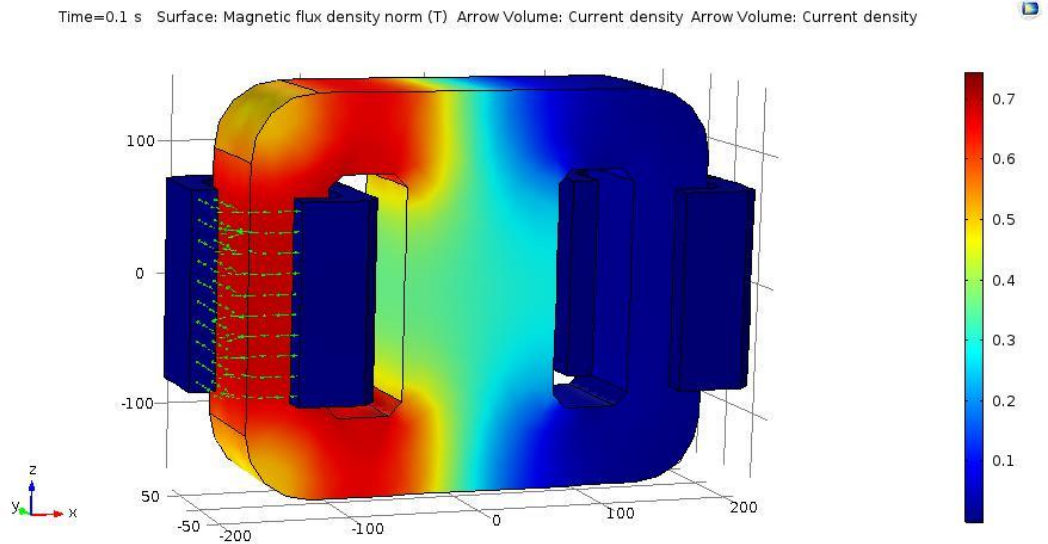


Şekil 3.16 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'a ait fotoğraflar

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 SHAS'lara Ait Simülasyon Çalışmaları

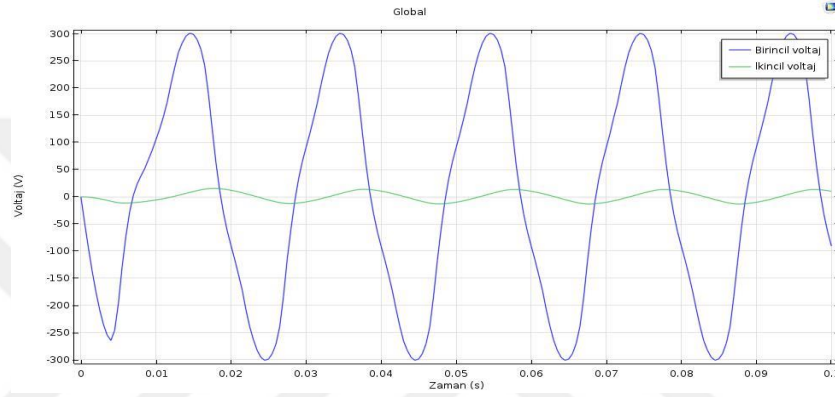
Yapılan SHAS'lara ait simülasyon çalışmaları deneysel ölçümlerden önce yapılarak deneysel aşamaların daha kolay olmasına olanak sağlamıştır. Simülasyon çalışmaları için COMSOL MP programı kullanılmıştır ve manyetik akının demir nüve üzerindeki değişimine, yüklü durumlar için bakılmıştır. Bu program kullanılarak 6 kVA üç fazlı trafonun tek fazı ve 2,5 kVA'lık trafo tasarımları yapılmıştır. Bu tasarımlarda kullanılan demir nüvelerin boyutları fabrika verileri esas alınarak programa girilmiştir. Bobinlerin sarım sayıları denklemler doğrultusunda hesaplanarak 2,5 kVA'lık tek fazlı trafo için 115 sarım alınmıştır. İki tane demir nüve birbiriyle birleştirilerek tek bir demir nüve gibi düşünülmüştür. Tek fazlı sistem için kullanılan varyağın direnci $8,5 \Omega$ olarak alınmıştır. İkincil taraf için kullanılan direnç değeri yapılan hesaplamalar doğrultusunda 20Ω olarak alınmıştır. Şekil 4.1'de 2,5 kVA'lık tek fazlı trafonun simülasyon çalışmasına yer verilmiştir.



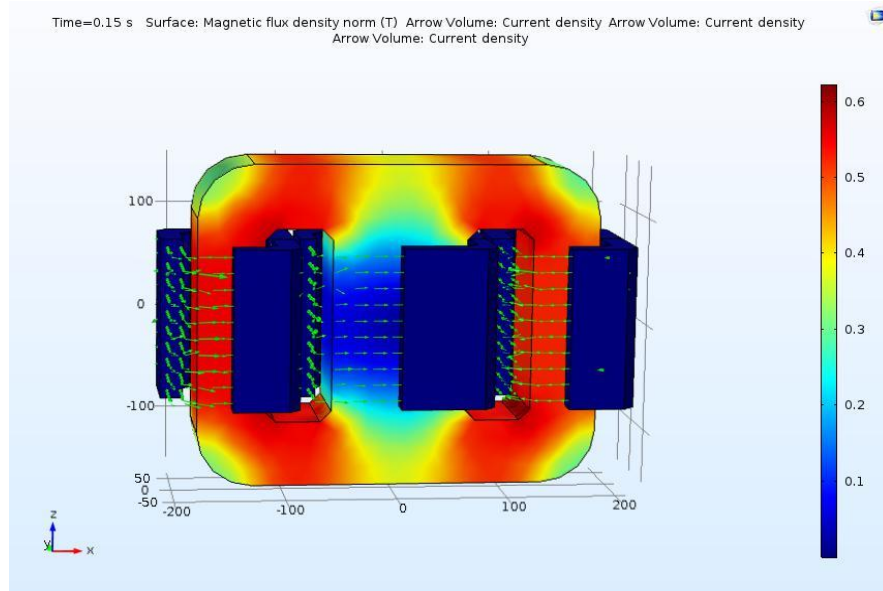
Şekil 4.1 2,5 kVA'lık trafoya ait demir nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğu normu

Şekilde görülen yeşil oklar bobinlerde dolaşan akımların yönünü göstermektedir. Demir nüvede oluşan manyetik akı yoğunluğu, şekillerin sağ kenarında verilen renk skalasıyla

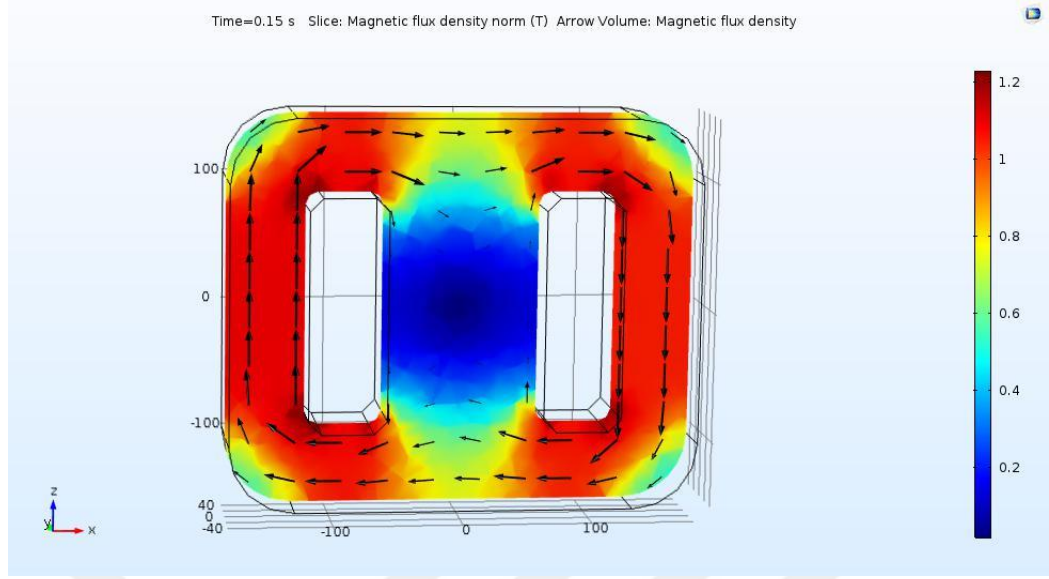
açık bir şekilde gösterilmektedir. Birincil tarafta demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu 0,7 T iken ikincil tarafa manyetik akı transferinin yapılamadığı görülmektedir. Şekil 4.2’deki voltaj grafiğinden de açıkça görüldüğü gibi birincil voltaj değeri 220 V iken ikincil tarafa çok küçük bir voltaj değeri görülmektedir. Birincil voltajın sinüsoidal dalga formunda bozulmalar olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi, demir nüvenin doyuma ulaşmasıdır. Orta kısımda halka yokken ikincil tarafa manyetik akı transferi yapılamamıştır.



Şekil 4.2 2,5 kVA’lık tek fazlı trafodaki voltaj değerleri

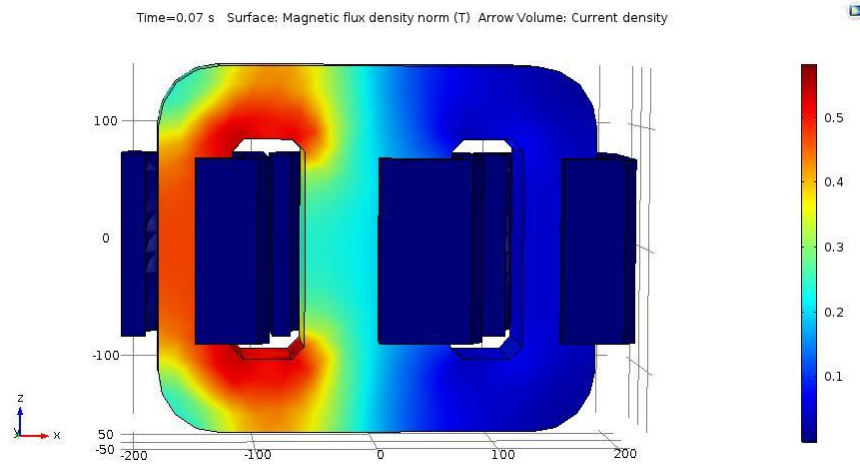


Şekil 4.3 2,5 kVA’lık trafoya ait demir nüveler üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu



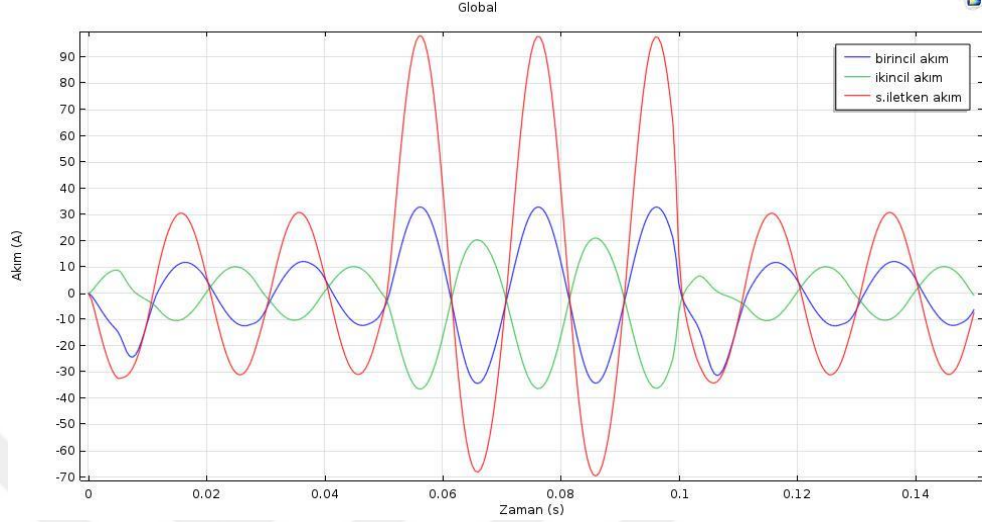
Şekil 4.4 Demir nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dolanımının dikey kesit görünümü

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'den açık bir şekilde görüldüğü demir nüvenin orta kısmına 40 sarımlı süperiletken halka konularak manyetik akı transferi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyona ait görüntülerdeki siyah oklar demir nüve üzerinde oluşan manyetik akının yönünü göstermektedir (Şekil 4.4). Bobinlerde oluşan akımın yönünü yeşil oklarla gösterilmektedir (Şekil 4.3). Demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu 1,2 Tesla'dan yüksek olduğu ve demir nüvenin doyuma ulaşmadığı görülmektedir.

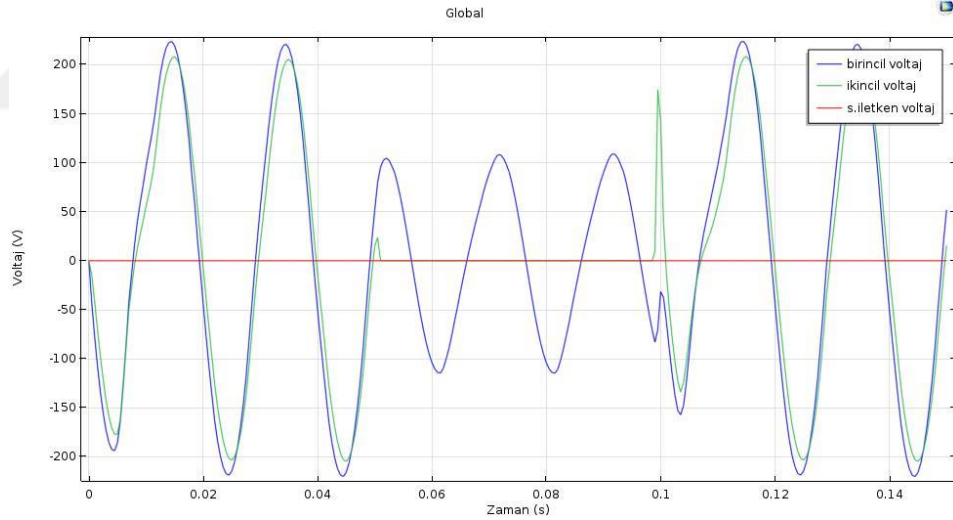


Şekil 4.5 2,5 kVA'lık trafoya ait kısa devre olma anı

İkincil taraf kısa devre yapıldığı zaman süperiletken halka dirençli duruma dönüşmekte ve ikincil tarafa manyetik akı transferi yapılamadığı görülmektedir (Şekil 4.5).

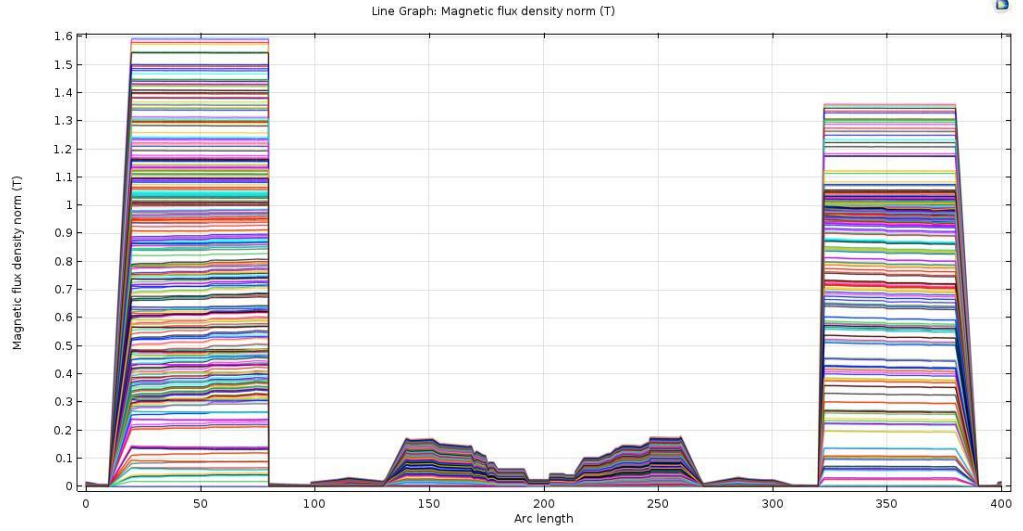


Şekil 4.6 2,5 kVA'lık trafoya ait akım değerleri



Şekil 4.7 2,5 kVA'lık trafoya ait voltaj değerleri

Sistem 0,05 s ve 0,1 s süresince kısa devre yapılmaktadır. Birincil voltaj değerlerinin ikincil voltaj değerinden neredeyse 20 V kadar fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin demir nüvenin relüktansından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.7). Kısa devre durumu esnasında süperiletken halkadaki akım değerinin arttığı (Şekil 4.6) görülmektedir. Birincil ve ikincil akım değerlerinin 10 A olduğu ve deneysel verilerle simülasyon çalışmalarının uyum içinde olduğu görülmektedir.

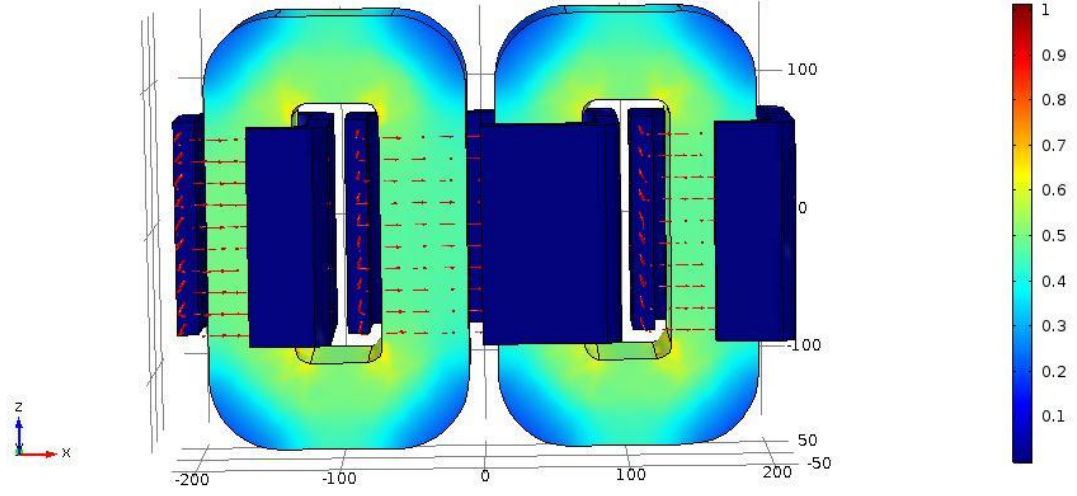


Şekil 4.8 2,5 kVA'lık trafoya ait demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu

Birincil tarafta oluşan manyetik akı yoğunluğu 1,6 T iken ikincil tarafta oluşan manyetik akı yoğunluğunun 1,3 T civarlarında olduğu Şekil 4.8'de açıkça görülmektedir. Birincil bacak ve ikincil bacak üzerinde oluşan bu farkın sebebinin demir nüvenin relüktansından ve kaçak akılardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

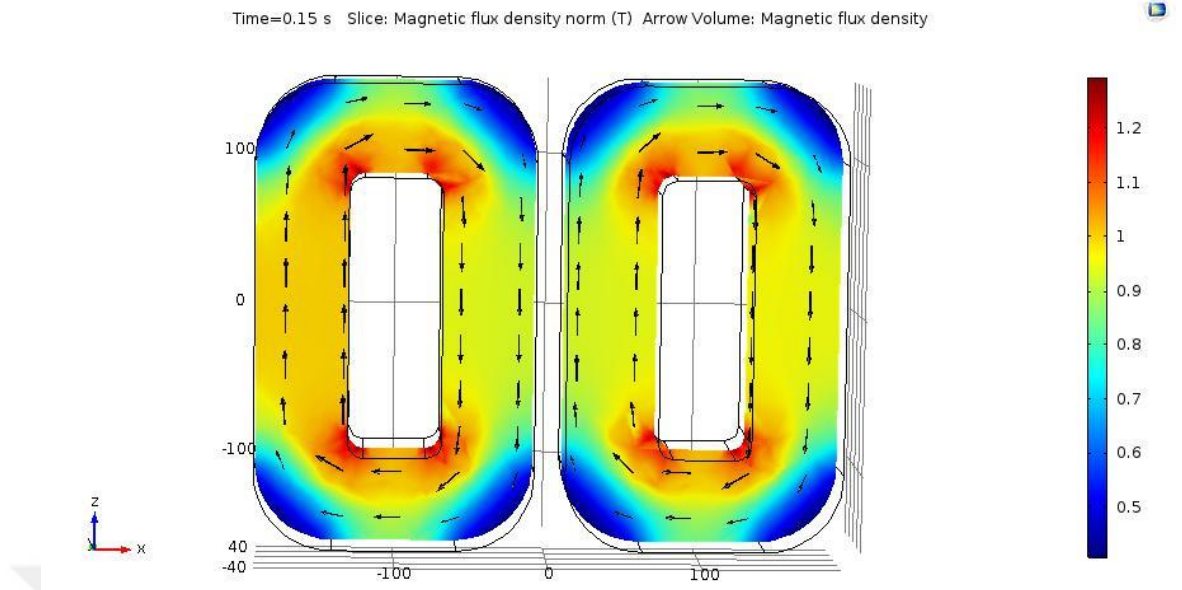
3-fazlı trafonun tek-fazı için yapılan simülasyon çalışmalarında kullanılan varyağın direnci 15Ω olarak alınmış ve birincil taraftaki yük değeri olarak kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda ikincil taraf için yük değeri 10Ω olarak alınmıştır. Süperiletken halkanın sarım sayısı 40, iki demir nüve arasındaki mesafe 20 mm olarak ayarlanmıştır. Birincil bobinin sarım sayısı 150, ikincil bobinin sarım sayısı 80 olarak alınmıştır. Şekil 4.9'da tasarlanan sistemdeki demir nüveler üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu gösterilmektedir.

Time=0.15 s Surface: Magnetic flux density norm (T) Arrow Volume: Current density Arrow Volume: Current density
Arrow Volume: Current density



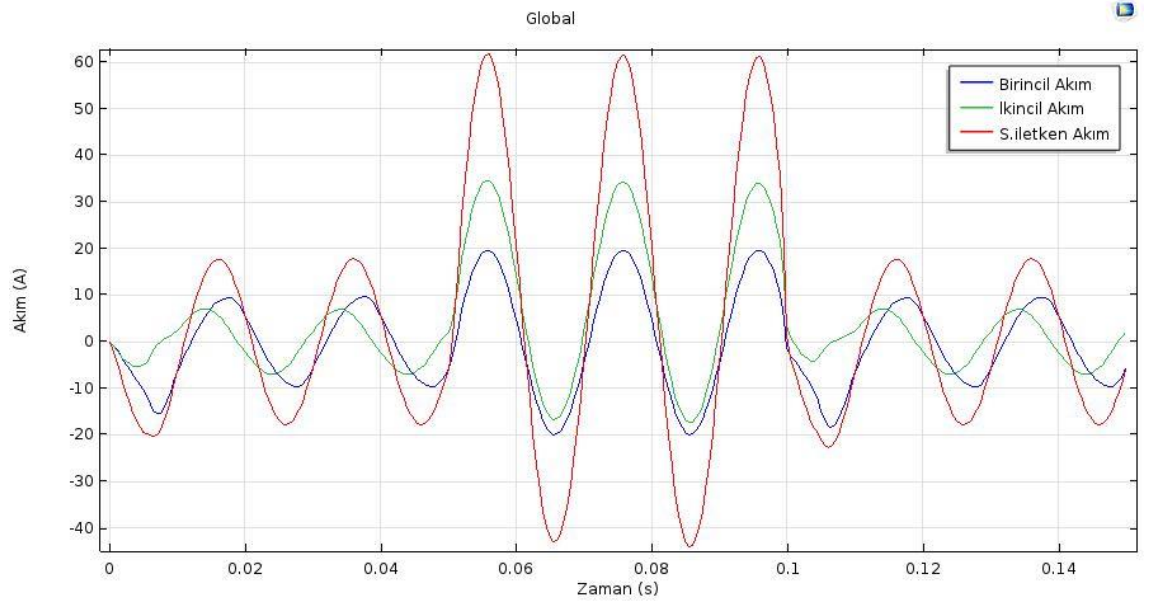
Şekil 4.9 2 kVA'lık trafoya ait demir nüveler üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu

Yapılan çalışmada açık bir şekilde görüldüğü üzere manyetik akı transferinin süperiletken halka aracılığı ile ikincil tarafa aktarıldığı görülmektedir. Birincil tarafta oluşan manyetik akı yoğunluğu 0,6 T iken ikincil tarafta oluşan manyetik akı yoğunluğunun da 0,6 T civarında olduğu görülmektedir. Şekil 4.10' da siyah oklar, demir nüveler üzerindeki manyetik akı dolanımını göstermektedir. Birincil demir nüvede oluşan manyetik akıya karşı süperiletken halkada ters yönde bir manyetik akı oluştuğu ve halkanın içerisinde oluşan manyetik akının sıfır olduğu yapılan simülasyon çalışmasında açık bir şekilde görülmektedir.

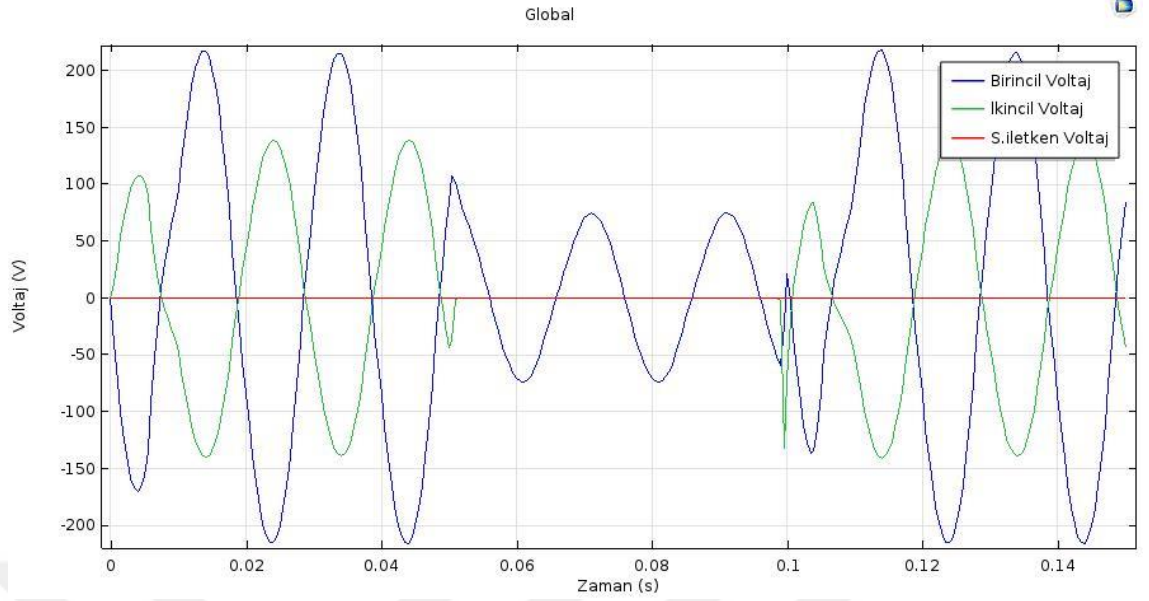


Şekil 4.10 Demir nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dolanımının dikey kesit görünümü

Şekil 4.11’de tasarlanan sisteme ait akım değerleri ve şekil 4.12’de voltaj değeri gösterilmektedir.

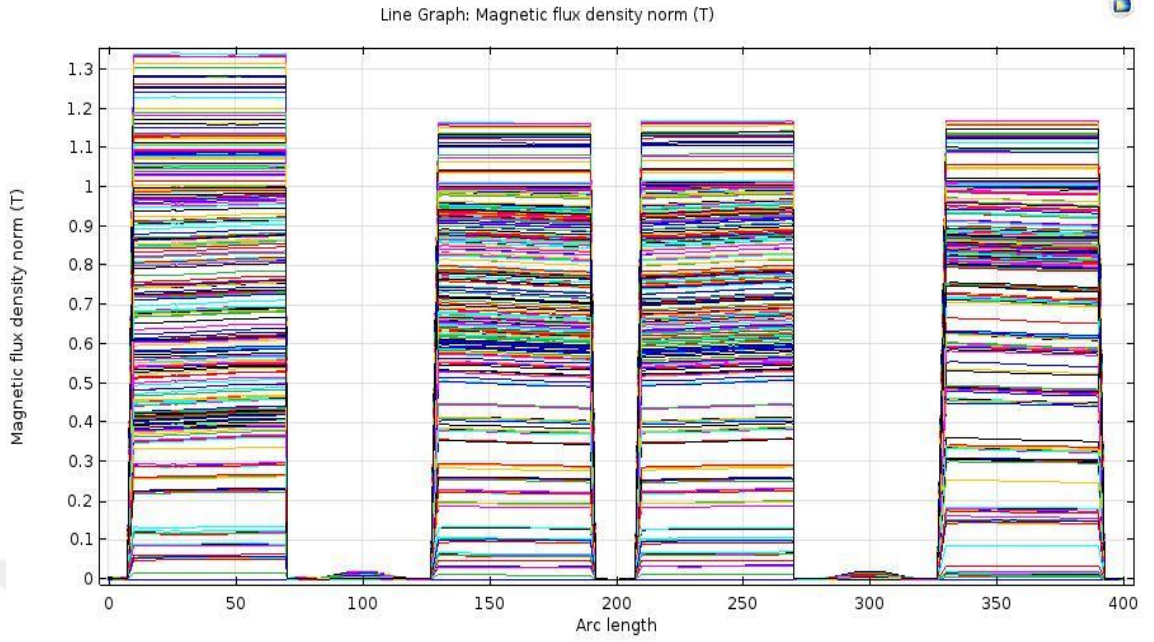


Şekil 4.11 2 kVA’lık trafoya ait akım değerleri



Şekil 4.12 2 kVA'lık trafoya ait voltaj değerleri

Trafo 0,05 s ve 0,1 s süresince kısa devre yapılmaktadır. Birincil voltaj değeri yaklaşık 220 V, ikincil voltaj değeri 110 V'dur. Bu durumun sebebi, birincil bobin 150 sarım iken, ikincil bobinin 80 sarım olmasıdır. Voltaj değerleri sarım sayılarıyla doğru orantılı bir şekilde değiştiğinden birincil voltaj değeri yüksek olduğu görülmektedir. Süperiletken halka üzerindeki voltaj değerinin sıfır olduğu görülmektedir (Şekil 4.12). Birincil akım değeri 9,5 A, ikincil voltaj değeri 6,5 A, süperiletken halkadaki akım yaklaşık 18 A değerindedir. Kısa devre durumunda birincil akım 20 A, ikincil akım 35 A, süperiletken halka üzerindeki akım 62 A değerindedir. Kısa devre süresince süperiletken halka üzerindeki akım değerinin arttığı ve süperiletken halkanın dirençli duruma geçerek manyetik akı transferini ikincil tarafa yapamadığı görülmektedir (Şekil 4.11).



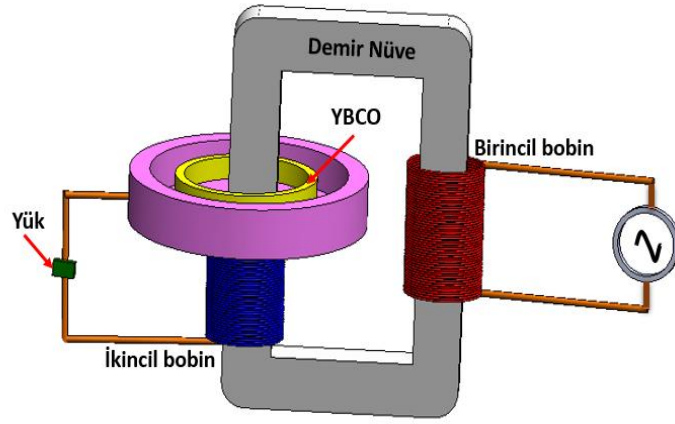
Şekil 4.13 2 kVA'lık trafoya ait demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu

Soldaki demir nüvede oluşan manyetik akı yoğunluğu ile sağ tarafta oluşan manyetik akı yoğunluğu arasında fark olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin demir nüvenin relüktansından ve kaçak akılardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca; süperiletken halkanın manyetik akıyı neredeyse kayıpsız bir şekilde aktardığı şekil 4.13'de açık bir şekilde görülmektedir.

Yapılan simülasyon çalışmaları, süperiletken halkanın birbirinden bağımsız iki tane demir nüveyi manyetik akı transferi ile birbirine bağladığını göstermiştir. Deneysel çalışmalarla simülasyon çalışmalarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

4.2 Süperiletken Tellere Ait Ölçüm Sonuçları

Sonraki aşamada, SHAS yapımında kullanılmak üzere ortadan ikiye kesilerek hazırlanan kritik akım değeri 308 A olan SF12050 YBCO halkaların zarar görüp görmediğini ve kritik akım değerlerini belirlemek için hazırlanan düzenek şematik olarak şekil 4.14'de gösterilmiştir. Bu teller ortadan ikiye kesildiği için kritik akım değerlerinin 154 A olması beklenmektedir.



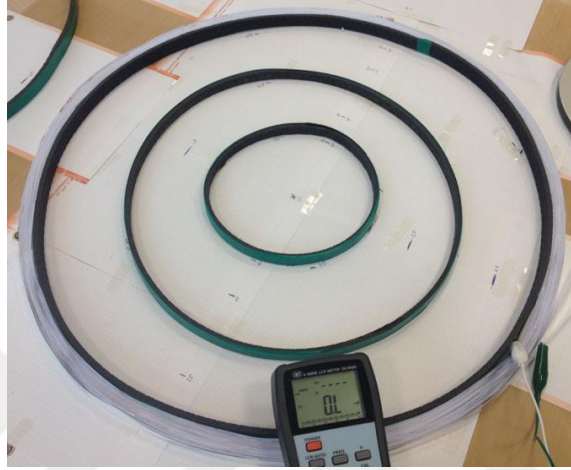
Şekil 4.14 Tellerin denenmesi için hazırlanan düzenek

YBCO halkaların deneysel olarak kritik akım değerleri $i_{s1}(t) = N_2 i_2(t) = \text{halkanın quench olduğu akım değeri} \times 140$ formülüyle hesaplanarak çizelge (4.1)'de verilmiştir. Süperiletken halkanın kritik akım değeri 128 A ve 165 A aralığında değişmektedir. Bu durumun sebebini, telin kesilmesi esnasında oluşan zayıf noktalardan kaynaklı olduğunu düşünüyoruz.

Çizelge 4.1 YBCO halkanın kritik akım değerinin teorik ve deneysel kıyaslaması

YBCO Halka No	Deneysel [I _c (Arms)]	YBCO Halka No	Deneysel [I _c (Arms)]
1	1,11*140=155,4	15	145
2	151	16	163
3	154	17	165
4	138,6	18	159
5	140	19	177
6	146	20	152
7	144	21	180
8	142	22	161
9	147	23	149,8
10	148	24	135
13	158	25	141
14	128	26	149,8

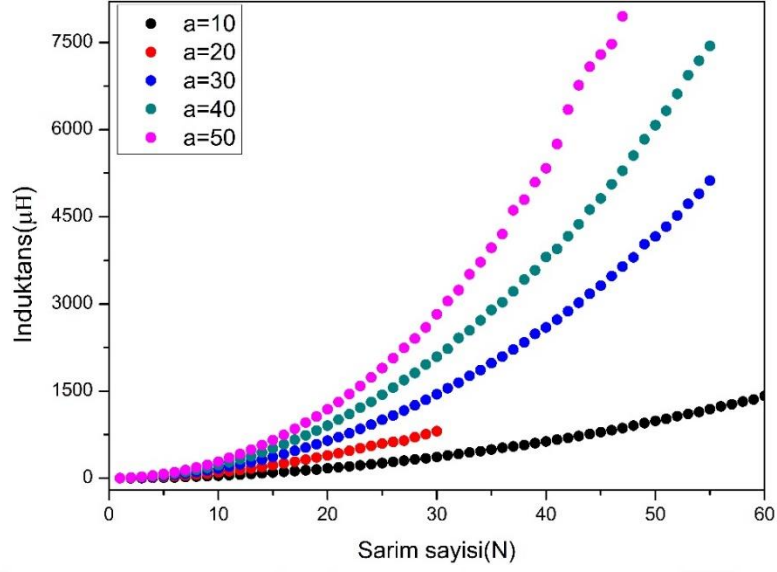
Çembersel bir şekilde hazırlanan kalıbın etrafına SF12050 süperiletken teli sarılarak LCR metre ile halkanın indüktansı ölçülmüştür. Süperiletken şeridin kalınlığı 0,1 mm, genişliği ise 12 mm'dir. Süperiletken tellerin arasına yalıtımı sağlamak amacıyla ince şeritler halinde kesilen kağıtlar konulmuştur (Şekil 4.15). Çizelge 4.2'de süperiletken telin sarım sayılarına bağlı indüktans değişimleri verilmektedir.



Şekil 4.15 SF1050 süperiletken telinin indüktans ölçüm deney düzeneği

Çizelge 4.2 Yarıçapı 10 cm olan süperiletken halkanın sarım sayısına bağlı indüktans değerleri

Sarım sayısı	L (μH)	Sarım sayısı	L (μH)	Sarım sayısı	L (μH)	Sarım sayısı	L (μH)
1	0,152	16	111,02	31	393,5	46	825,9
2	1,715	17	125,48	32	417,2	47	863,3
3	4,26	18	139,35	33	444,7	48	906,2
4	7,214	19	152,12	34	466,5	49	950
5	11,017	20	169,29	35	493	50	986
6	15,685	21	187,51	36	523,4	51	1021,5
7	21,53	22	204,3	37	547,6	52	1068,8
8	28,62	23	222,9	38	572,5	53	1106,9
9	36,04	24	241,7	39	603,9	54	1139,2
10	43,72	25	263,1	40	632,9	55	1190,6
11	52,7	26	281,6	41	664,5	56	1236,8
12	62,69	27	302,3	42	690,8	57	1272,1
13	73,27	28	323,1	43	726,5	58	1320,1
14	86,24	29	343,4	44	762,3	59	1358
15	97,52	30	365,2	45	792,8	60	1417,1

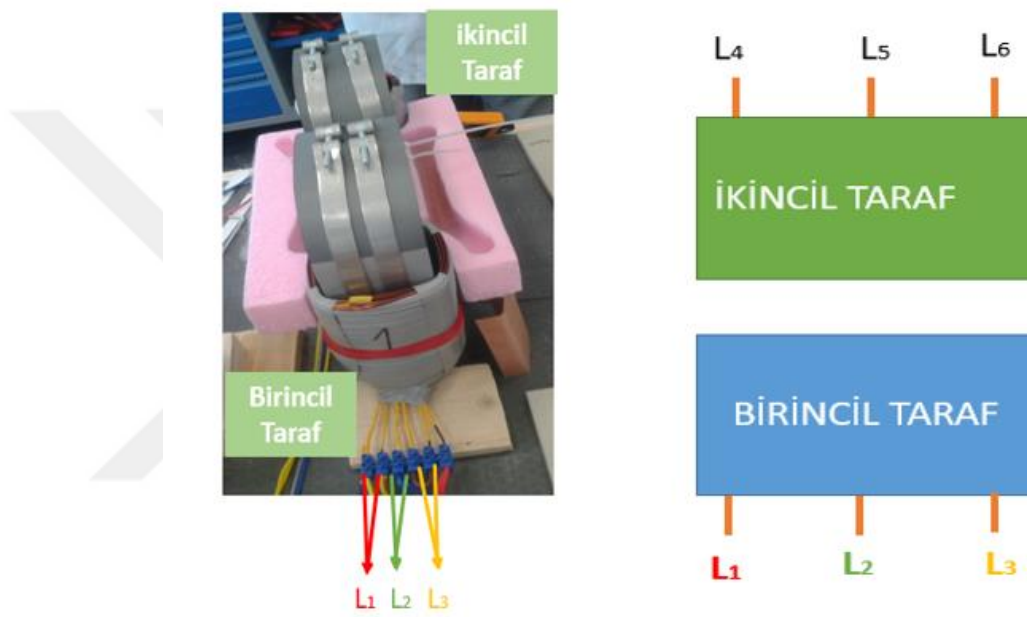


Şekil 4.16 Süperiletken halkanın indüktansının sarım sayısına bağlı grafiği

Süperiletken halkanın indüktansının sarım sayısına bağlı grafiği şekil 4.16’da verilmiştir. Deneysel ölçümler sonucu çizilen grafikte yarıçapın (a) artmasıyla birlikte indüktans değerinin arttığı görülmektedir. $W = \frac{1}{2} \mu_r L I^2$ halkanın şok geçiş (quench) olduğu zaman ortaya çıkan enerji miktarını ifade eder. Burada, I süperiletken telin kritik akım değerini, μ_r geçirgenlik sabitini, L indüktans değerini verir. Denklemden de açıkça ifade edildiği gibi indüktans değerinin artmasıyla birlikte açığa çıkan enerji miktarında artış meydana gelmektedir. Bu durumda süperiletken telin sarım sayısı ne kadar fazla olursa indüktans değeri o oranda artacaktır. Tek-fazlı sisteme ait deneyler yapılırken kullanılan SF12050 süperiletken telinin kritik akım değeri 308 A’dır. Deneyler esnasında kullanılan süperiletken teller ortadan ikiye kesildiğinde kritik akım değeri teorik olarak 154 A alınmıştır. Bu durumda demir nüveler için μ_r değeri fabrika verilerine göre 4350 olarak verilmiştir. Halkaların yarıçapı yaklaşık olarak 10 cm kadardır. Tek sarımlı halka için indüktans değeri 0,152 μH ’dir ve açığa çıkan enerji şok geçiş anında 7,84 J olacaktır. Açığa çıkan bu enerjiden dolayı süperiletkenin sıcaklığı artacaktır. Bu durumda süperiletken halkanın normal duruma geçmesini engellemek için sıvı azotun yükselen bu sıcaklığı düşürmesi gerekmektedir.

4.3 Aynı Geometride Demir Nüveler Kullanılarak Yapılan Tek Fazlı 2,5 kVA'lık SHAS'a ait ölçümler

Bu SHAS çeşidinde aynı kesit alanına sahip iki tane demir nüve kullanılmıştır (Şekil 4.17). Birincil ve ikincil taraflardaki bobinlere ait indüktans değerleri LCR metre ile ölçülmüştür (Çizelge 4.3). Aynı sarım sayısına sahip bobinlerin indüktans ve direnç değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.17.a Tek- fazlı SHAS b. SHAS'a ait bobinlerin şematik gösterimi

Çizelge 4.3 Tek- fazlı SHAS'ın birincil ve ikincil tarafındaki bobinlere ait değerler

	Sarım sayısı	İndüktans(mH)	Direnç(Ω)
BİRİNCİL TARAF	$N_1=115$	$L_1=74$	$R_1=0,25$
	$N_2=57$	$L_2=19$	$R_2=0,18$
	$N_3=58$	$L_3=19$	$R_3=0,17$
İKİNCİL TARAF	$N_4=115$	$L_4=81$	$R_4=0,27$
	$N_5=57$	$L_5=21,7$	$R_5=0,17$
	$N_6=58$	$L_6=21,7$	$R_6=0,17$

Çizelge 4.4’de V_p (V); birincil taraftaki birincil bobine ait voltaj değerini, I_p ; birincil bobindeki akım değerini, V_s (V); ikincil taraftaki ikincil bobine ait voltaj değerini ifade etmektedir.

Çizelge 4.4 2,5 kVA tek- fazlı trafoya ait akım ve voltaj değerleri

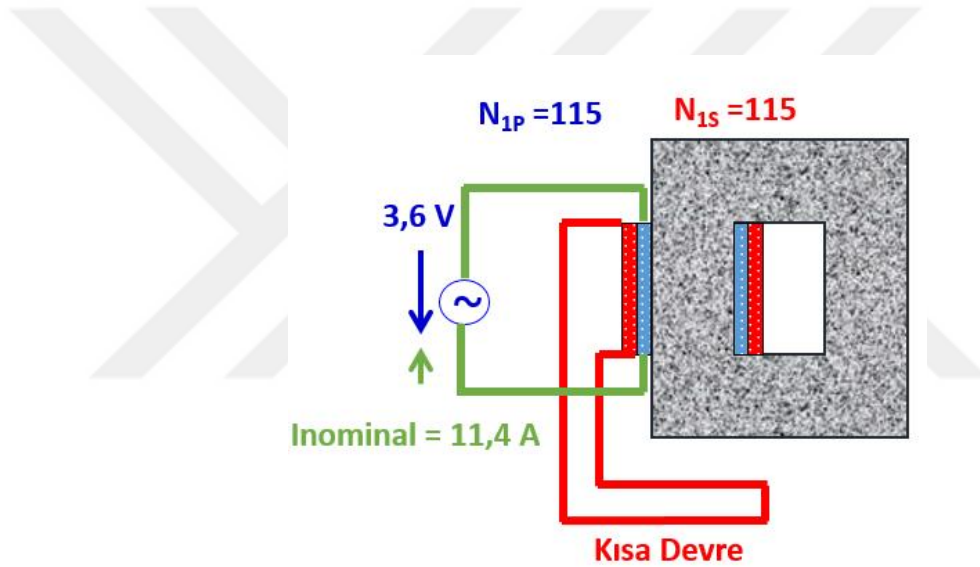
$V_p(V)$	$I_p(A)$	$V_s(V)$	$V_p(V)$	$I_p(A)$	$V_s(V)$
5,139	281,5 mA	5,073	120,4	6,29	118,0
10,17	0,555	10,3	130,4	6,81	128,3
20,23	1,101	19,92	140,7	7,35	138,5
30,03	1,63	29,6	150,0	7,84	147,7
40,69	2,214	40,05	160,8	8,31	158,4
50,54	2,734	49,64	170,1	8,55	167,8
60,15	3,25	59,2	180,1	9,00	177,3
70,3	3,809	69,2	190,0	9,5	187,2
80,7	4,33	79,4	201,7	10,05	198,5
90,5	4,73	89,1	211,8	10,33	208,8
101,0	4,98	94,3	219,3	11,4	215,3
110,0	5,74	108,2			

Çizelgeden görüldüğü üzere birincil taraftaki ve ikincil taraftaki voltaj değerleri hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. İlk yapılan ölçümler esnasında birincil ve ikincil voltajlar arasında farkın fazla olduğu görülmüştür. Kayıplardan kaynaklı bu durumu ortadan kaldırmak için birincil bobin için sarım sayısı 115, ikincil bobin için sarım sayısı 125 olarak yapılmış ve birincil taraf ve ikincil taraftaki voltaj değerlerinin birbirine çok yakın olması sağlanmıştır. Teorik olarak hesaplanan nominal akım değeri 11,36 A, deneysel olarak bulunan nominal akım değeri ise; 11,4 A’dır. Bu durumda teorik olarak hesaplanan değer ile deneysel olarak bulunan değer birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Tek- fazlı SHAS’a ait birincil ve ikincil taraftaki voltaj düşüm (drop ε) hesapları deneysel veriler kullanılarak hesaplamaları yapılmıştır. Birincil taraftaki voltaj düşümünü hesaplamak için ikincil bobin kısa devre yapılmıştır ve birincil bobin nominal akım değerinde iken birincil bobin üzerinden geçen voltaj değeri

belirlenmiştir (Şekil 4.18). Bu durumda 11,4 A nominal akım değerine karşı gelen voltaj değeri 3,6 V olarak ölçülmüştür. Düşüm hesabı denklem (4. 1)'le belirlenir.

$$\varepsilon = \frac{V_{kisa\ devre}}{V_{nominal}} \% 100 \quad (4.1)$$

Hesaplamalar doğrultusunda birincil taraftaki voltaj düşümü % 1,63 bulunmuştur. Sisteme uygulanan nominal voltaj değeri şehir şebekesi voltaj değeri olan 220 V alınmıştır. Kısa devre durumundan sonra birincil taraftaki voltaj düşümü % 1,63 olarak bulunmuştur.



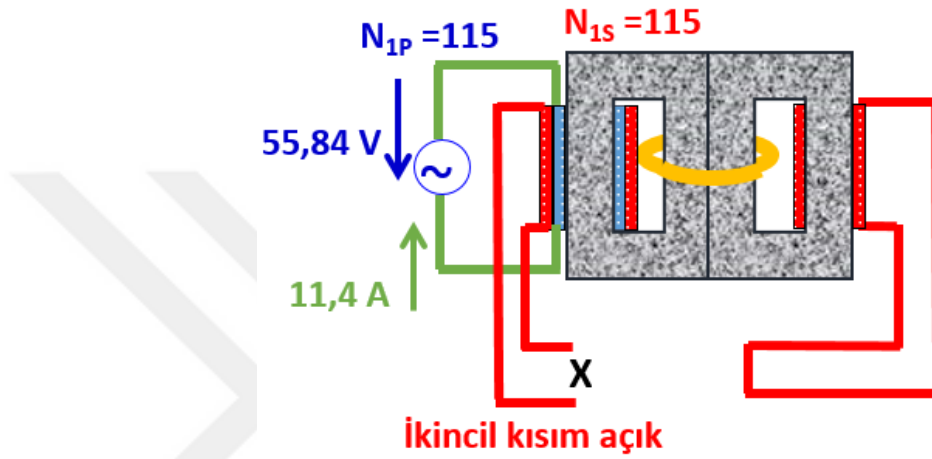
Şekil 4.18 Tek- fazlı SHAS'ın birincil tarafı için drop ölçümü

Tek- fazlı SHAS'ın karşılayabileceği maksimum hatalı akım değerini hesaplamak için gerekli ifade denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$I_{hatalı\ akım} = \frac{V_{nominal}}{V_{kisa\ devre}} I_{nominal} \quad (4.2)$$

Buna göre birincil tarafın karşılayabileceği maksimum hatalı akım değeri 696,7 A olduğu görülmüştür.

İkincil taraftaki drop ölçümü için ikincil taraftaki bobin kısa devre yapılmıştır ve birincil bobin nominal akım değeri olan 11,4 A ulaştığı andaki voltaj değeri 55,84 V olarak belirlendikten sonra ikincil tarafın düşüm hesabı denklem (4.1)'e göre $\varepsilon = \% 25,38$ olarak hesaplanmıştır. İkincil taraf için maksimum hatalı akım değeri 44,91 A belirlenmiştir. Şekil 4.19'da ikincil tarafın düşüm hesabı için sistemin şematik gösterimi verilmektedir.



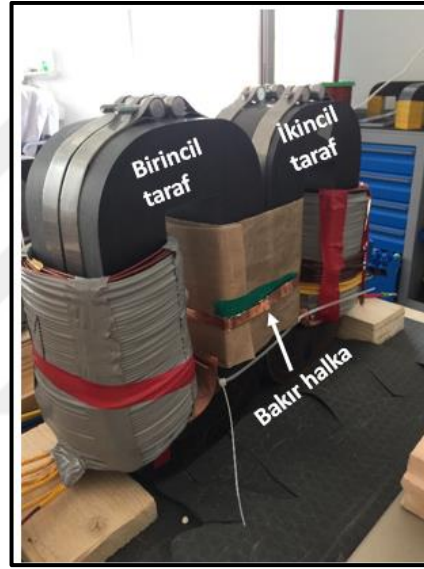
Şekil 4.19 Tek- fazlı SHAS'ın ikincil tarafı için drop ölçümü

4.3.1 Farklı dirençlerde teller kullanılarak alınan ölçümler

Yapılan bu deneyde farklı dirençlerde teller kullanılarak manyetik akı transferinin nasıl değişeceği gözlemlenmek istenmiştir. Şekil 4.20 görüldüğü üzere demir nüvelerin kesiştikleri yerin orta kısmına bakır halka bağlanarak ikincil tarafa manyetik akı transferi gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Bakır halka sonrasında sıvı azot kabının içerisine konularak ölçümler alınmaya devam edilmiştir. Bütün deneyler 50 Hz frekansında yapılmıştır. Çizelge 4.5'de bobinlerde okunan akım ve voltaj değerlerinin isimlendirme ve kısaltmaları yer almaktadır.

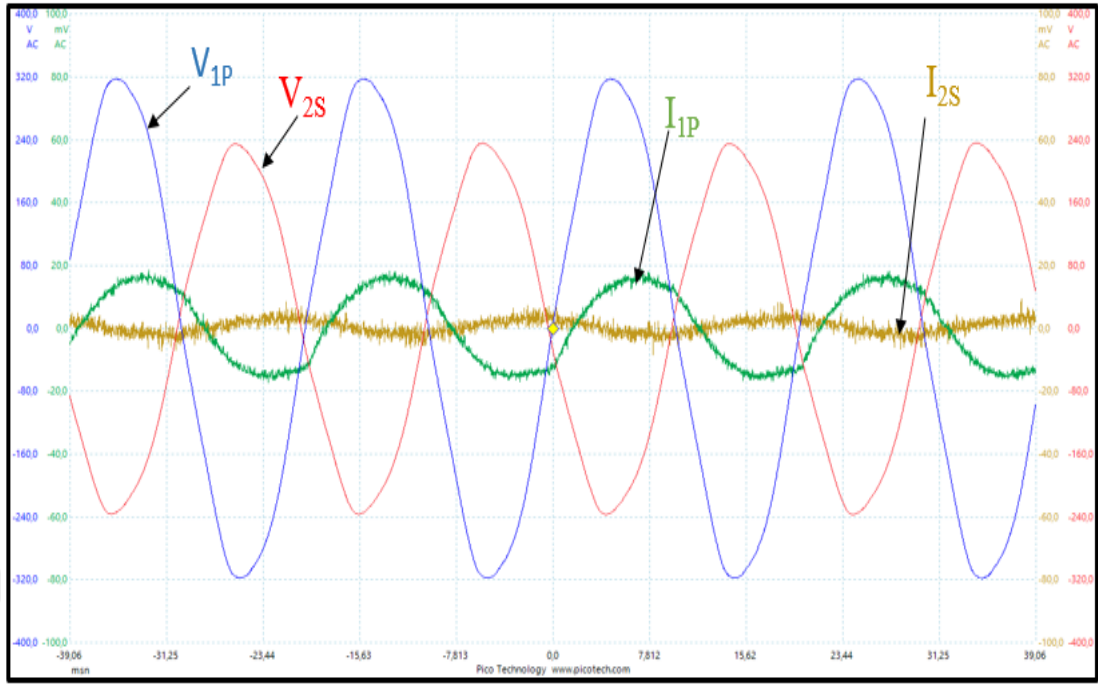
Çizelge 4.5 Bobinlerde okunan akım ve voltaj değerlerinin isimlendirme ve kısaltmaları

İsimlendirme	Voltaj	Akım
Birincil taraftaki birincil bobin	V_{1P}	I_{1P}
Birincil taraftaki ikincil bobin	V_{1S}	I_{1S}
İkincil taraftaki birincil bobin	V_{2P}	I_{2P}
İkincil taraftaki ikincil bobin	V_{2S}	I_{2S}



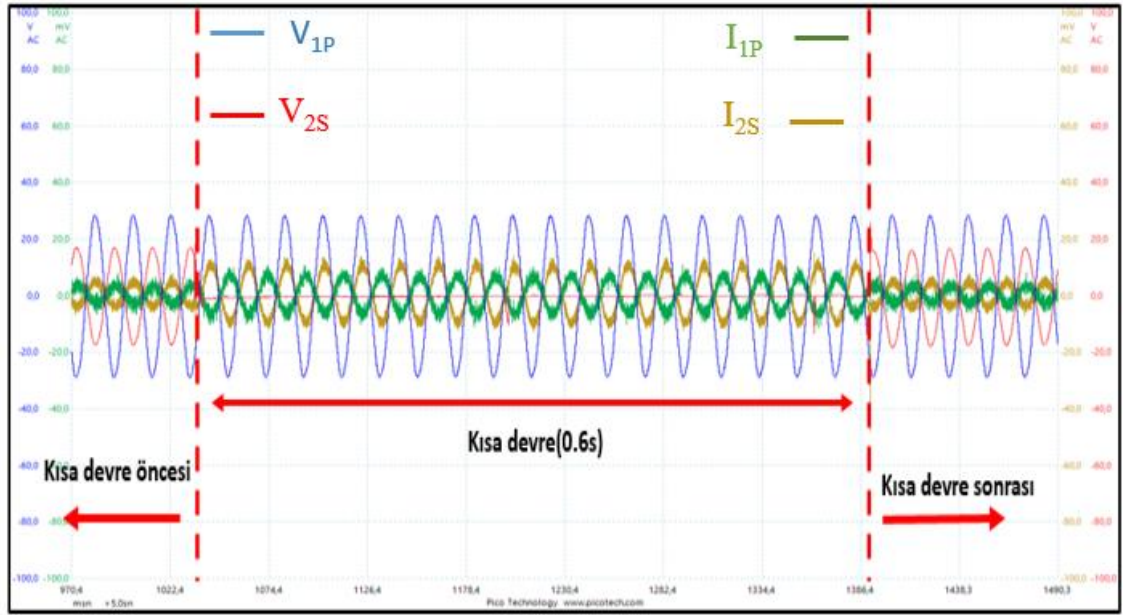
Şekil 4.20 Bakır halka kullanılarak hazırlanan sistem

Şekil 4.21’de sistem yüksüz durumda iken bakır halka kullanılarak yapılan sisteme ait ölçüm gösterilmektedir.



Şekil 4.21 Yüksüz durumda bakır halka kullanılarak yapılan sisteme ait ölçüm

Birincil ve ikincil bobinlerin sarım sayıları neredeyse aynı olan tek- fazlı SHAS'da, manyetik akı transferinin kayıpsız bir şekilde ikincil tarafa aktarılması durumunda V_{1P} ve V_{2S} değerinin aynı olması gerekirken şekil 4.21' de görüldüğü üzere V_{1P} değeri 226 V_{rms} iken, V_{2S} değeri 167 V_{rms} 'dur. Voltaj değerlerinin arasındaki farkın fazla olmasının sebebi bakır telin dirençli olmasından kaynaklıdır. Sistem yüksüz olduğu için I_{2S} değerinin sıfıra yaklaşık olduğu görülmektedir. Bir sonraki ölçüm sistem yüklü ve kısa devre durumundayken alınmıştır (Şekil 4.22).

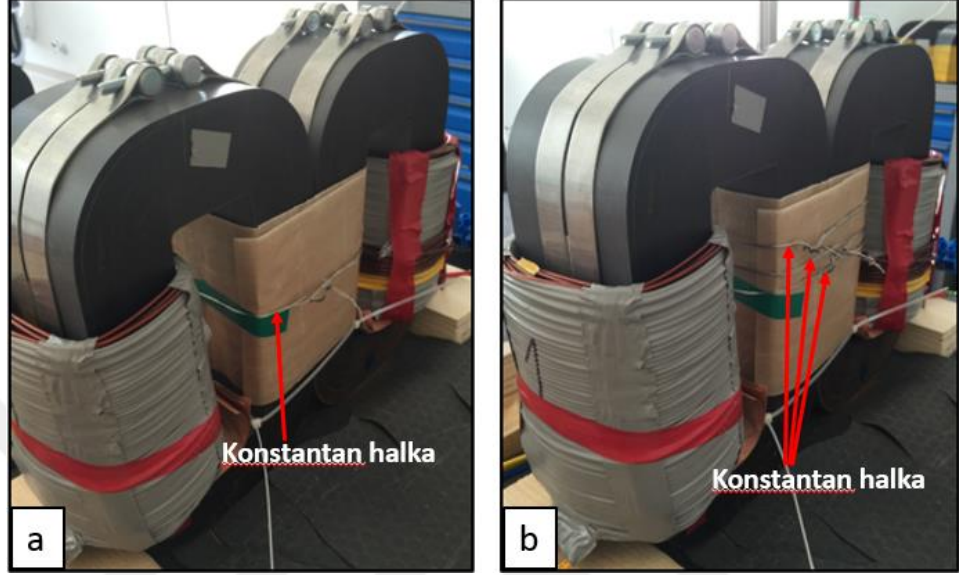


Şekil 4.22 Yüklü ve kısa devre durumunda bakır halka kullanılarak yapılan sisteme ait grafik

Bu ölçüme göre V_{1P} pik değeri 28,4 V iken, V_{2S} pik değeri değeri 17,3 V'dur. İkincil taraftaki ikincil bobin 0,6 s kısa devre yapıldıktan sonra grafiklerden de açıkça görüldüğü üzere V_{2S} değeri neredeyse sıfır olmakta ve kısa devre durumu ortadan kalktıktan hemen sonra yeniden ikincil tarafta voltaj değeri gözlenmektedir. Kısa devre durumu ortadan kalktıktan yaklaşık 4 periyot sonra V_{2S} eski değeri olan 17,3 V değerine geri dönmektedir. Bu durumda bakır tel kullanılarak yapılan sistemde manyetik akı transferi ikincil tarafa başarılı bir şekilde iletilmesine rağmen bakır telin dirençli olmasından dolayı bir kayıp söz konusudur.

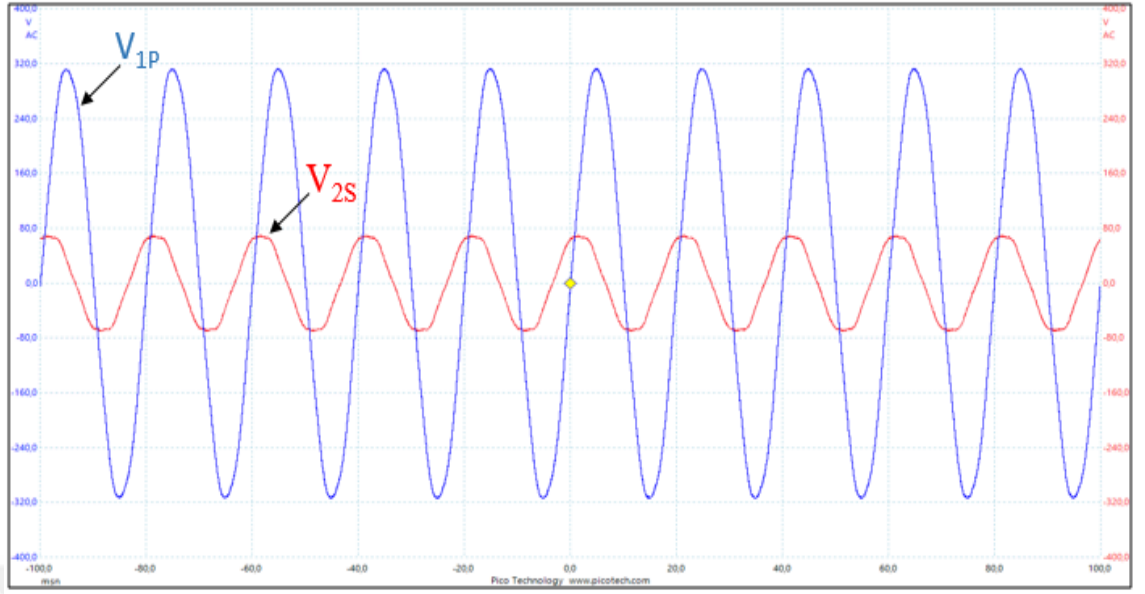
Bir sonraki deney düzeneğinde bakır halka yerine konstantan tel kullanılmıştır. Konstantan telin direncinin sıcaklıkla değişimi $0,00001 \text{ K}^{-1}$ 'dir. Bakırın direncinin sıcaklıkla değişimi $0,0039 \text{ K}^{-1}$ olarak verilmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğu zaman konstantan tel kullanılmasının daha avantajlı olacağı düşünülmüştür. Konstantan tel demir nüvelerin kesiştikleri kısmın ortasına bağlanarak manyetik akı transfer işlemini gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Farklı direnç değerlerinde konstantan halkalar birbirine paralel bağlanarak direnç değerleri düşürülmüş ve ölçümler alınmıştır.

Şekil 4.23.a'da $0,25 \Omega$ direncinde konstantan halka kullanılarak hazırlanan sistem, şekil 4.23.b'de ise her birinin direnci $0,25 \Omega$ olan üç tane konstantan halka kullanılarak hazırlanan sistem gösterilmiştir.

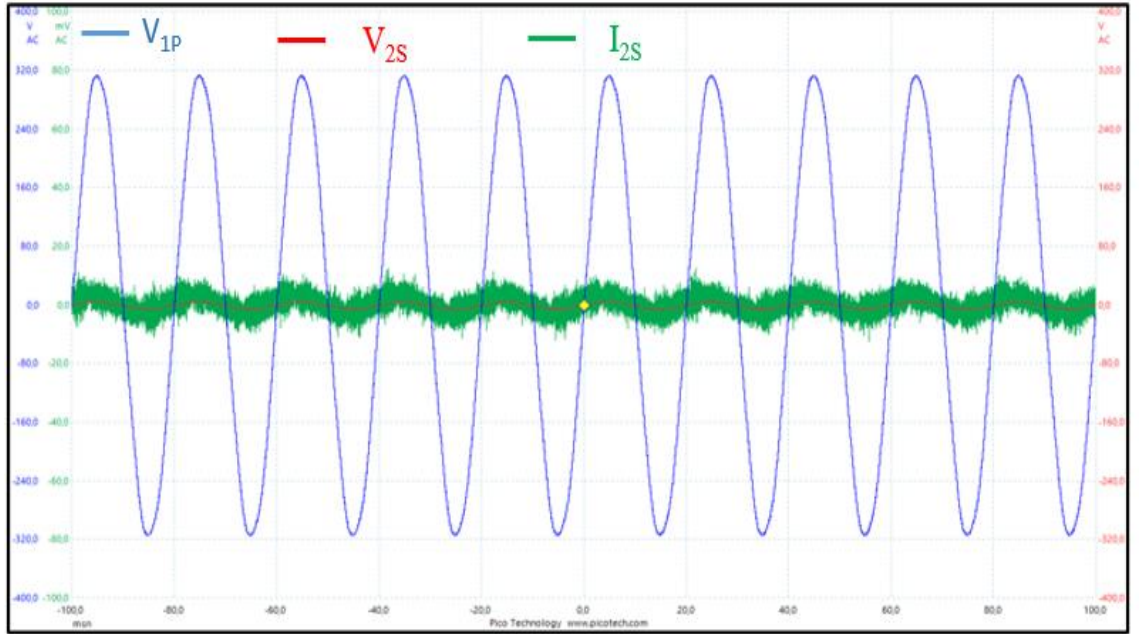


Şekil 4.23.a Tek- fazlı sistemde $0,25 \Omega$, b. $0,083 \Omega$ direncinde konstantan halka kullanılarak hazırlanan düzenek

Şekil 4.24'de sistem yüksüz durumdayken ve şekil 4.25'de yüklü durumdayken, $0,125 \Omega$ direncine sahip konstantan tel kullanılarak yapılan sisteme ait akım ve gerilim grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.24 Yüksüz durumda birincil ve ikincil taraftaki voltaj değerleri

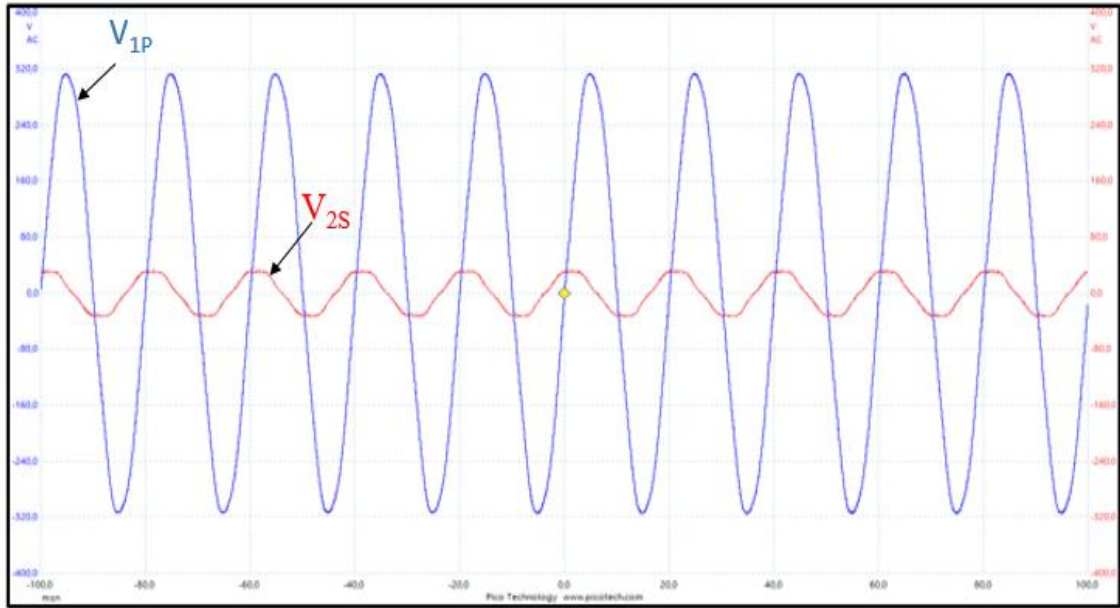


Şekil 4.25 Yüklü durumda birincil ve ikincil taraftaki voltaj değerleri ve akım değeri

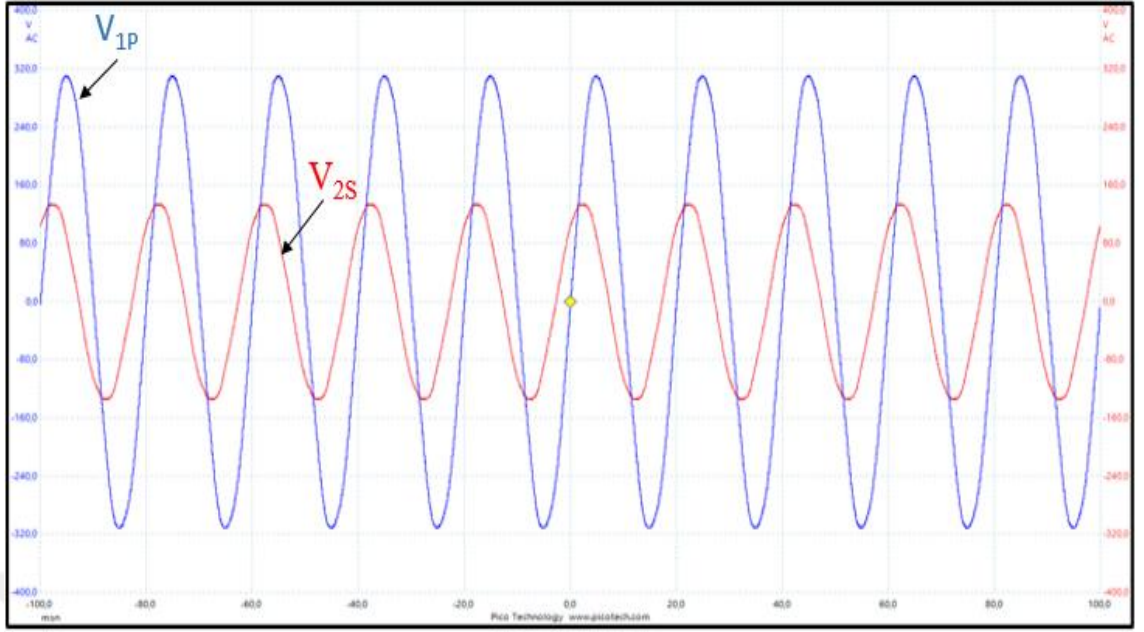
Birincil bobin ve ikincil bobinin sarım sayıları yaklaşık eşit olduğundan V_{1P} ve V_{2S} aynı olması gerekirken Şekil 4.24' de görüldüğü üzere V_{1P} değeri $224 V_{rms}$ iken, ikincil voltaj değeri $51 V_{rms}$ 'dur. Voltaj değerlerinin farklı olmasının sebebi konstantan telin dirençli olmasından kaynaklanmaktadır. İkincil tarafa manyetik akı transferini kayıplı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Şekil 4.25 incelendiğinde V_{1P} değeri $224 V_{rms}$ iken, V_{2S} değeri $3,5 V_{rms}$ ve I_{2S} değeri $0,09 A_{rms}$ değerindedir. İkincil taraftaki ikincil bobin 26Ω 'luk bir dirençle yüklü olduğundan bir akım değeri görülebilmektedir. Ayrıca konstantan teldeki direnç değişimine bağlı olarak I_{2S} değerinin de değiştiğini gözlemleyebiliyoruz. Buna göre, **$0,083 \Omega$** direnç değerinde iken I_{2S} değeri; $0,16 A_{rms}$, **$0,0625 \Omega$** direnç değerinde I_{2S} değeri; $0,22 A_{rms}$, **$0,05 \Omega$** direnç değerinde I_{2S} değeri; $0,28 A_{rms}$, **$0,041 \Omega$** direnç değerinde I_{2S} değeri; $0,33 A_{rms}$, **$0,035 \Omega$** direnç değerinde I_{2S} değeri; $0,39 A_{rms}$ 'dir. Değerlere bakıldığı zaman konstantan telin direncinde düşme olduğunda I_{2S} değerinde yükselme olduğu görülmektedir.

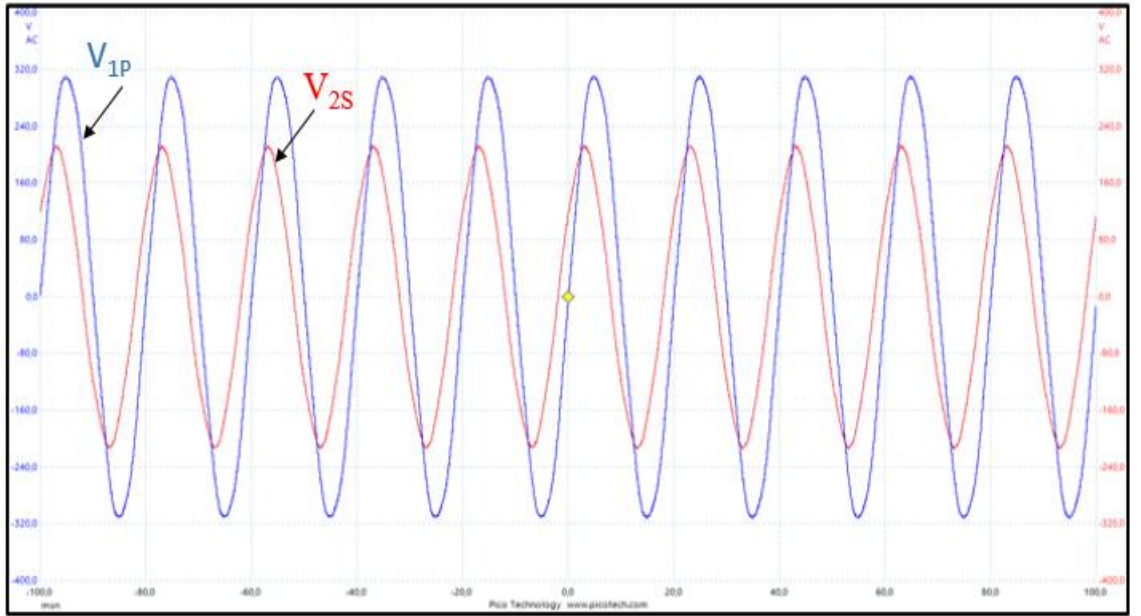
Şekil 4.26-4.28'de sistem yüksüz durumdayken, konstantan tel demir nüvelerin orta kısmına farklı direnç değerlerinde bağlanarak ölçümler alınmış ve direnç değişiminin V_{2S} değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.26 $0,25 \Omega$ direncinde konstantan halka kullanıldığında V_{1P} ve V_{2S} değerleri



Şekil 4.27 0,0625 Ω direncinde kostantan halka kullanıldığında V_{1P} ve V_{2S} değerleri



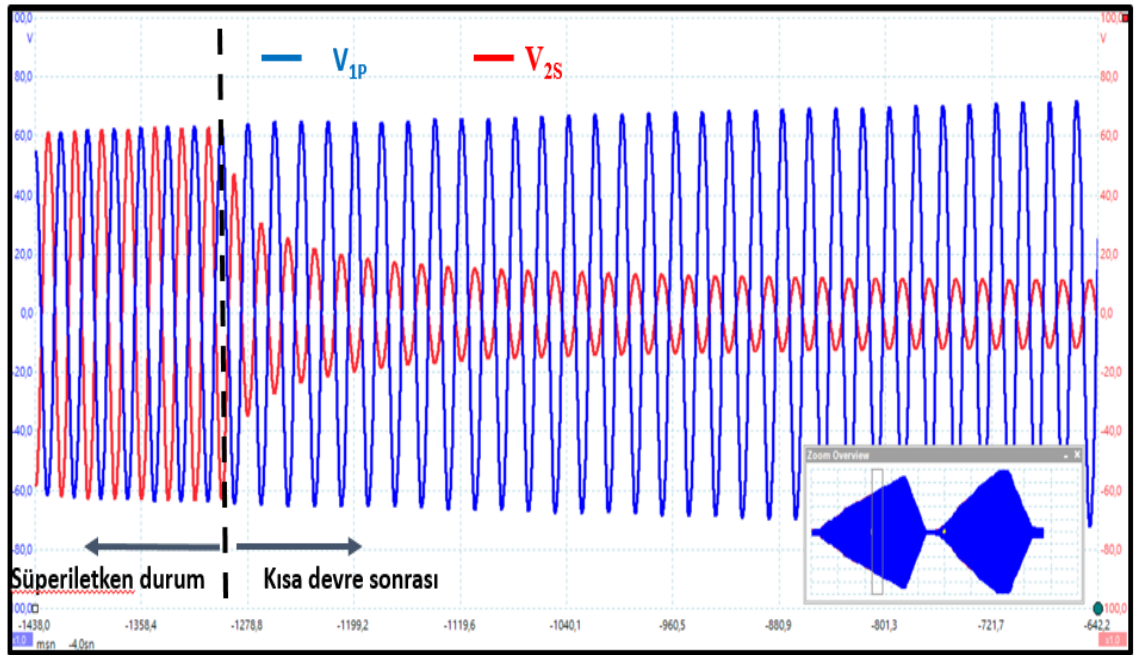
Şekil 4.28 0,035 Ω direncinde kostantan halka kullanıldığında V_{1P} ve V_{2S} değerleri

0,25 Ω 'luk direnç kullanıldığında V_{1P} değeri 224 V_{rms} iken, V_{2S} değeri 22,3 V_{rms} , 0,0625 Ω 'luk direnç kullanıldığında V_{1P} değeri 222,5 V_{rms} iken, V_{2S} değeri 98 V_{rms} , 0,035 Ω 'luk direnç kullanıldığında V_{1P} değeri 222,5 V_{rms} iken, V_{2S} değeri 147,5 V_{rms} belirlenmiştir. Şekil 4.25-28'den açık bir şekilde görüldüğü üzere kullanılan direnç

değeri düşmeye başladığında V_{1P} ve V_{2S} değerleri birbirine yaklaşımakta ve manyetik akı transferi daha az kayıpla ikincil tarafa konstantan tel aracılığıyla yapılmaktadır.

4.3.2 Süperiletken halka kullanılarak alınan ölçümler

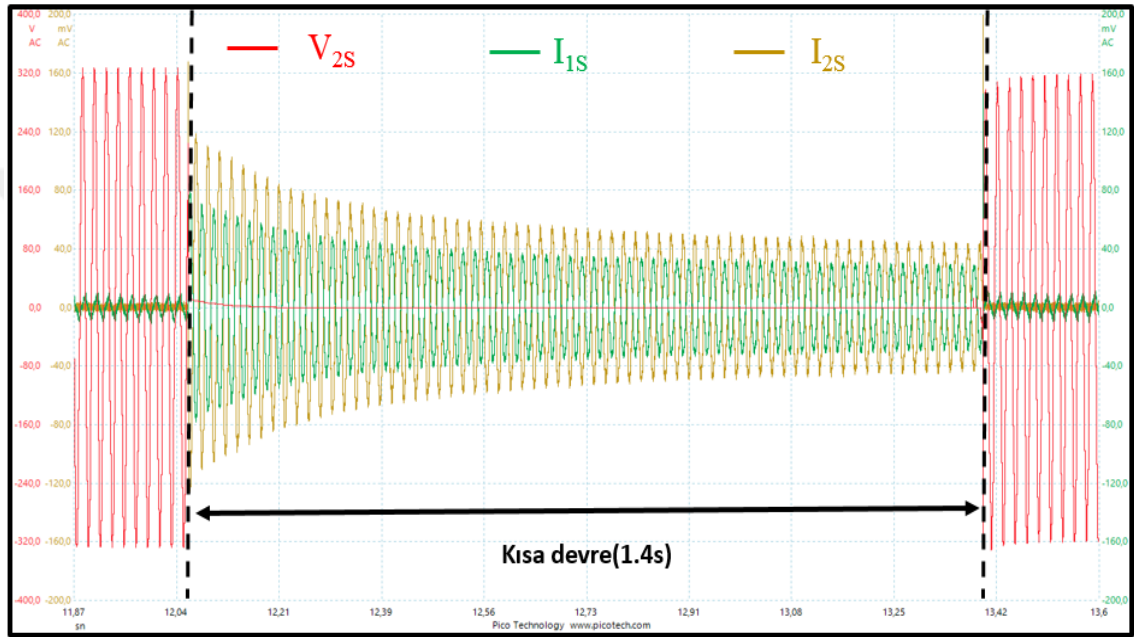
Daha önce yapılan konstantan tel ve bakır tel deneylerinde iletkenlerin dirençli olmalarından dolayı V_{1P} ve V_{2S} değerleri arasında fark gözlenmiştir. Manyetik akı transferinin kayıpsız bir şekilde ikincil tarafa aktarılması istediğimiz bir durum olduğu için süperiletken halka kullanmayı uygun gördük. Yapılan deneyde ise kritik akım değeri 308 A olan SF12050 süperiletken teli kullanılmıştır. Şekil 4.29’da sistem yüklü durumda iken, tek süperiletken halka kullanılarak alınan voltaj değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.29 Tek halka kullanılarak yapılan sisteme ait voltaj değerleri

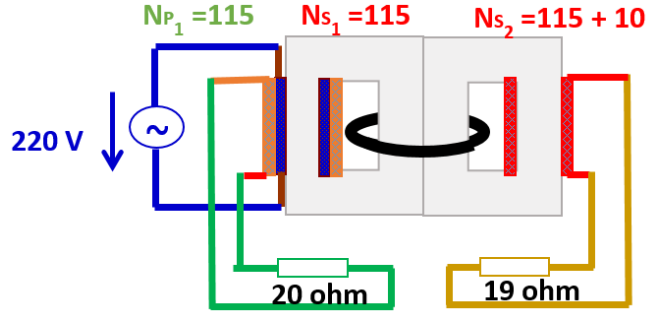
Grafik incelendiği zaman halka süperiletken durumda iken V_{1P} ve V_{2S} değerleri neredeyse aynıdır. Fakat V_{1P} değeri artmaya başladığında V_{2S} değeri düşmektedir. Bu durumun sebebi; süperiletken halkanın normal duruma geçmesi ve manyetik akı transferinin ikincil tarafa aktarılamamasından dolayıdır.

Bu bölümde süperiletken halka ve bakır halka aynı anda iki demir nüve arasında manyetik akı geçişini sağlamak amacı ile bağlanmıştır. Yapılan bu deneyde bakır halka soğutma kabının birine, süperiletken halka bir diğer soğutma kabına konulmuştur. Sonrasında bu iki soğutma kabı üstüste konularak ölçüm alınmıştır (Şekil 4.30). Ölçümler için kritik akım değeri 308 A olan SF12050 süperiletken teli ortadan ikiye kesilerek kullanılmıştır.

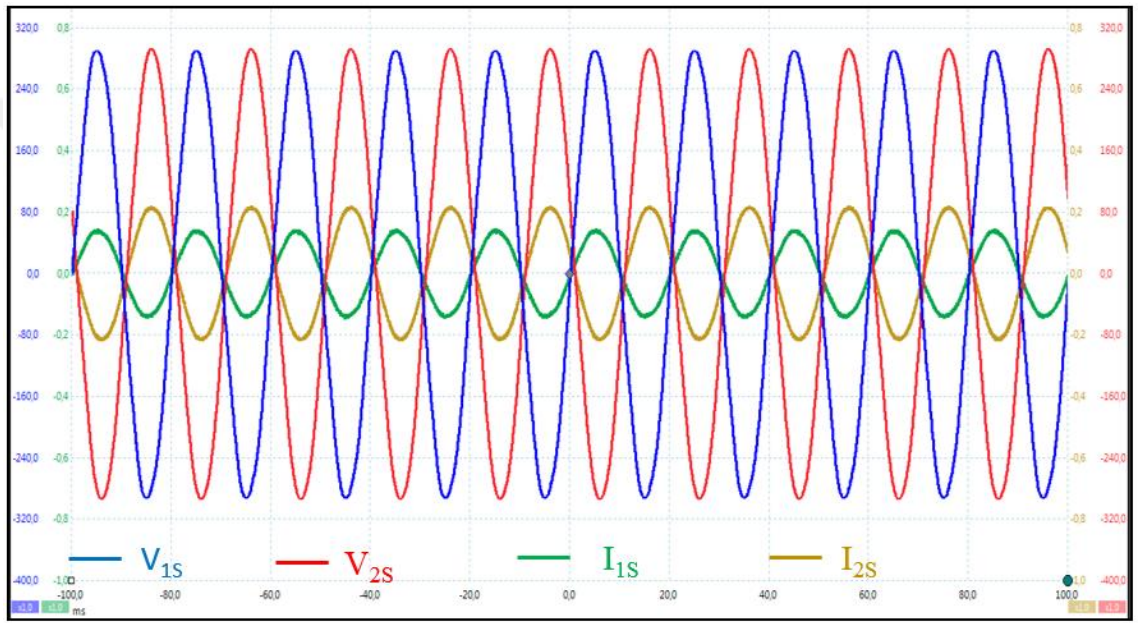


Şekil 4.30 Bakır halka ve süperiletken halka varken sisteme ait voltaj ve akım değerleri

Şekil 4.30'daki grafik incelendiğinde V_{2S} pik değeri 320 V'dur. İkincil taraftaki ikincil bobin 1,4 s kısa devre yapılmaktadır. Kısa devre durumunda süperiletken halka taşıyabileceği maksimum akım değerini aştığı için dirençli duruma geçmiştir. Kısa devre durumunda V_{2S} değeri neredeyse sıfır olmuştur ve dolayısıyla manyetik akı transferi ikincil tarafa yapılamamıştır. Ayrıca kısa devre durumundan önce sistem yüksüz olduğundan I_{2S} değeri gözlenmezken kısa devre durumunda aniden artarak yaklaşık 12 A değerine kadar ulaştığı gözlenmiştir. I_{1S} pik değeri kısa devre durumundan önce 1,2 A iken, kısa devre durumunda 7,6 A değerine kadar ulaşmıştır. Fakat bir kaç periyot sonra 3,6 A değerinde sabitlenmiştir.



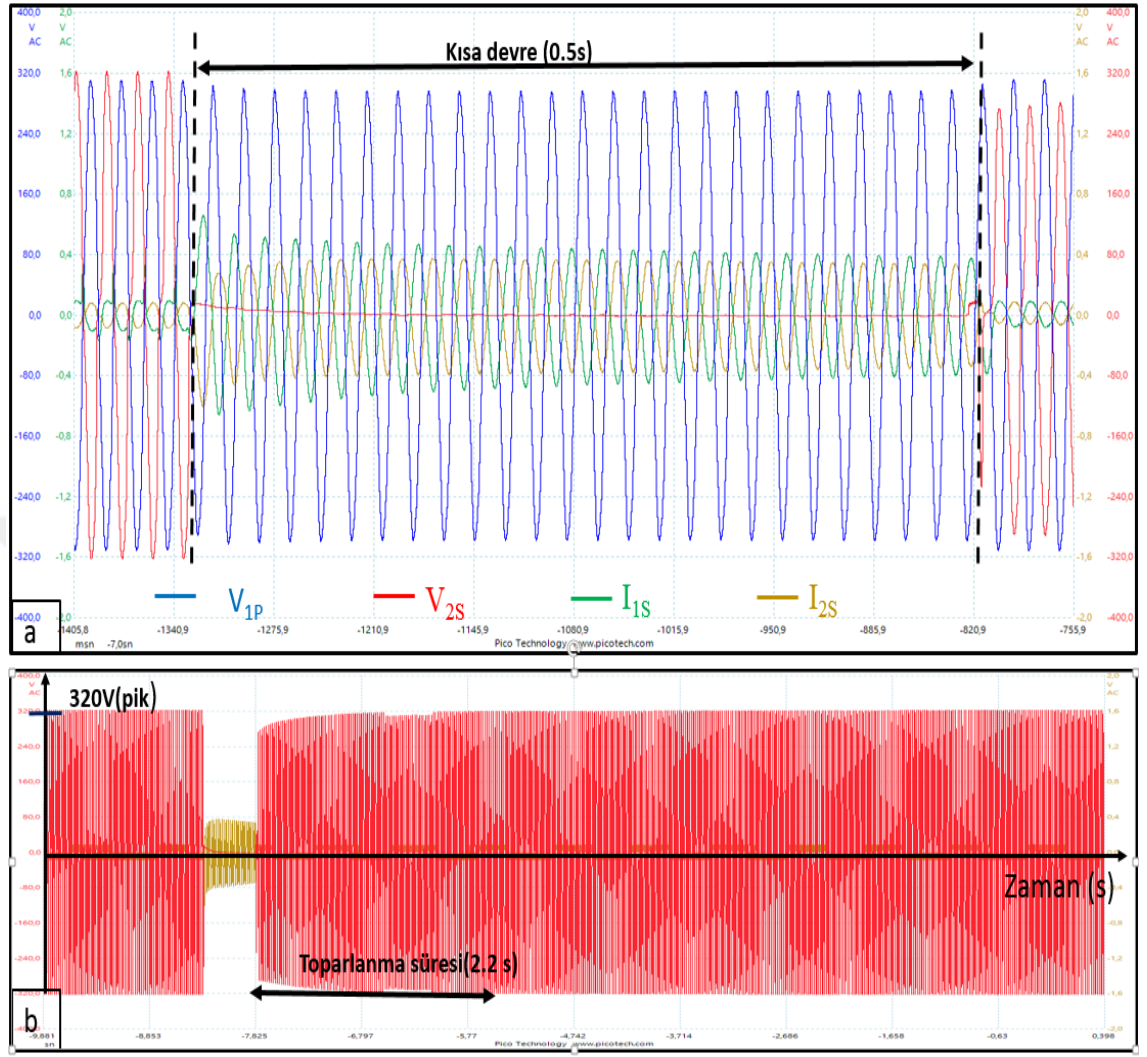
Şekil 4.31 Tek- fazlı SHAS'ın şematik gösterimi



Şekil 4.32 Sisteme ait voltaj ve akım değerleri

Tek- fazlı SHAS'a birincil tarafa 20 Ω ve ikincil tarafa 19 Ω olmak üzere iki tane direnç bağlanmıştır (Şekil 4.31). Yapılan deneyde 21 sarımlı süperiletken halka kullanılarak manyetik akı transferinin birincil taraftan ikincil tarafa aktarılması sağlanmıştır. Bu sisteme ait grafik incelendiği zaman V_{1s} ve V_{2s} değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. I_{1s} değerinin I_{2s} değerinden daha az olduğu grafikten görülmektedir (Şekil 4.32). Bunun sebebinin, birincil tarafta kullanılan direnç değerinin ikincil tarafta kullanılan direnç değerinden daha fazla olmasıdır.

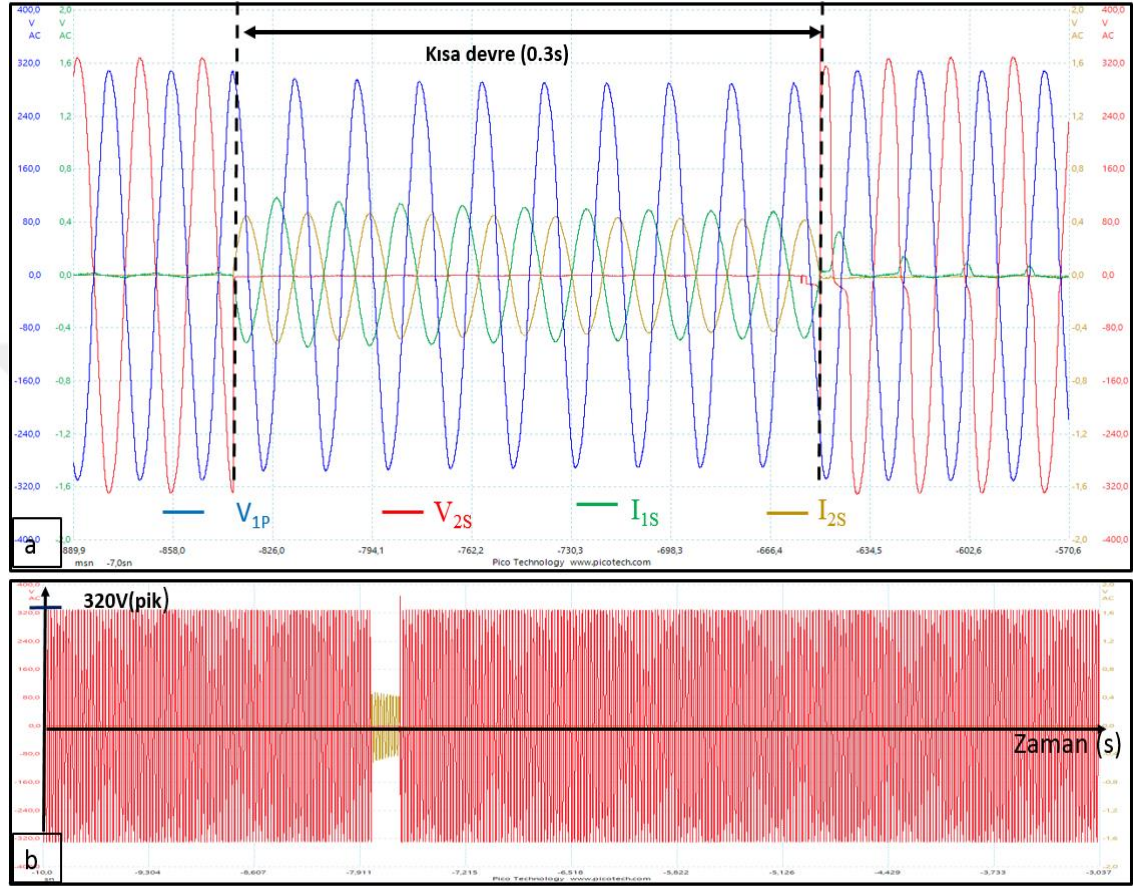
Şekil 4.33'de sistem 19 Ω 'luk dirençle yüklü iken, 21 sarımlı süperiletken halka kullanılarak ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.33.a Sistem yüklü durumdayken 21 sarımlı halka ile alınan ölçüm, b. V_{2S} ve I_{2S} zamanla değişimi (Gencer vd. 2016)

V_{2S} 'nin maksimum değeri 320 V'dur. V_{1P} ve V_{2S} değerleri birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. İkincil taraftaki ikincil bobin 0,5 s boyunca kısa devre edilmektedir. Kısa devre yapıldıktan sonra süperiletken halka süperiletken durumdan çıkarak normal dirençli duruma dönüşmektedir ve V_{2S} değeri neredeyse sıfır olmaktadır. İki demir nüve arasındaki çiftlenim bozulmaktadır. Kısa devre durumu ortadan kalktıktan sonra sistem tekrardan eski durumuna hemen dönememektedir ve bir toparlanma süresine ihtiyaç duymaktadır. Toparlanma süresi yaklaşık 2,2 s olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Ayrıca kısa devre durumundan önce I_{1S} ve I_{2S} pik değerleri sırasıyla 9,7 A ve 7,3 A iken kısa

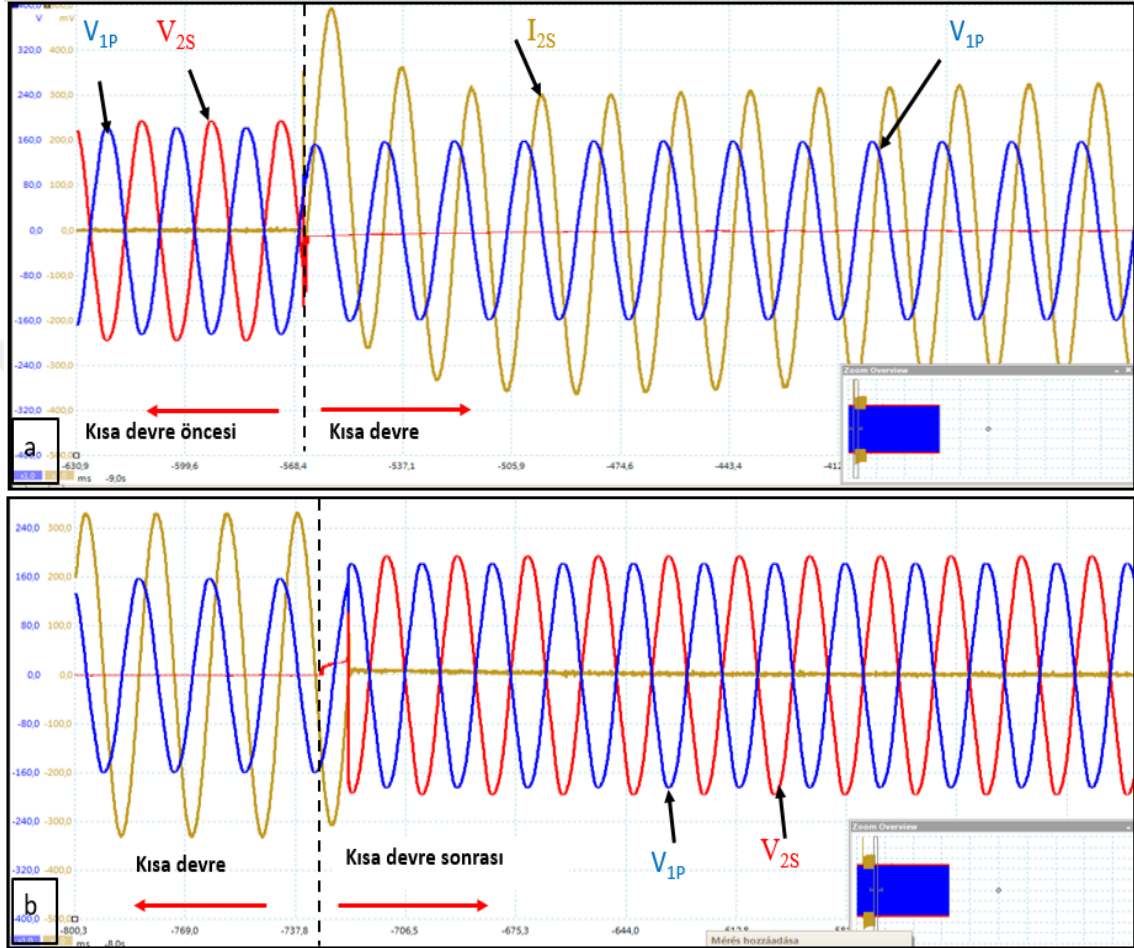
devreden hemen sonra I_{1S} ve I_{2S} pik değerleri sırasıyla 65,8 A ve 28,4 A olmaktadır. Akım değerleri kısa devre durumunda neredeyse üç katı artmaktadır ve kısa devre durumu ortadan kalktıktan sonra yaklaşık 2,2 s sonra eski değerlerine geri dönmektedir.



Şekil 4.34.a Sistem yüksüz durumdayken 21 sarımlı halka ile alınan ölçüm, b. V_{2S} ve I_{2S} zamanla değişimi

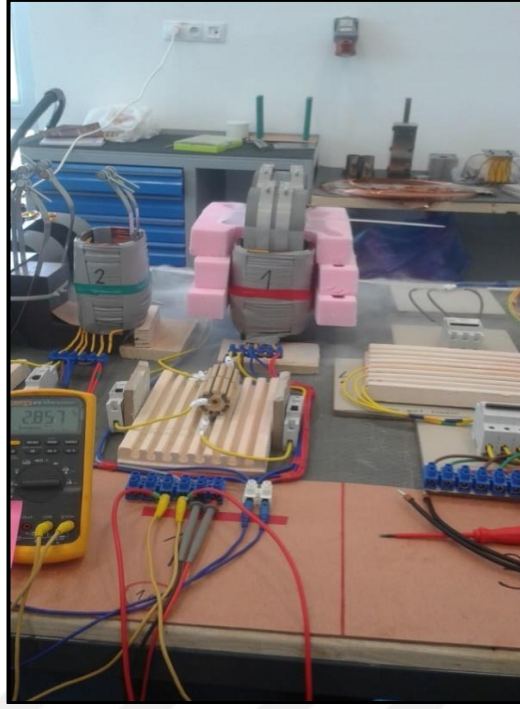
Şekil 4.34'de görüldüğü üzere V_{1P} pik değeri 310 V, V_{2S} pik değeri 320 V olduğu görülmektedir. İkincil taraftaki bobin 0,3 s kadar kısa devre edilmektedir. Süperiletken halkanın normal duruma dönüştüğü kısa devre durumunda V_{2S} değerinin neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. Kısa devre durumunda sonra sistemde yük olmadığı için toparlanma süresi neredeyse sıfır olmaktadır. Sistemin yüklü olduğu durumdaki grafiklerle (Şekil 4.33) kıyaslandığında toparlanma süresi yaklaşık 2,2 s iken sistem yüksüz olduğunda toparlanma süresine ihtiyaç duymamaktadır. Kısa devre durumundan önce I_{2S} değeri sıfırken kısa devre esnasında 47,4 A ölçülmüştür. I_{1S} maksimum değeri 2 A olup kısa devreden hemen sonra maksimum değeri 53,2 A olduğu gözlenmiştir.

Yapılan bir sonraki deneyde ortadan ikiye kesilen kritik akım değeri 308 A olan SF12050 kodlu 15 tane süperiletken tel soğutma kabının içerisine konularak ölçümler alınmıştır (Şekil 4.35).



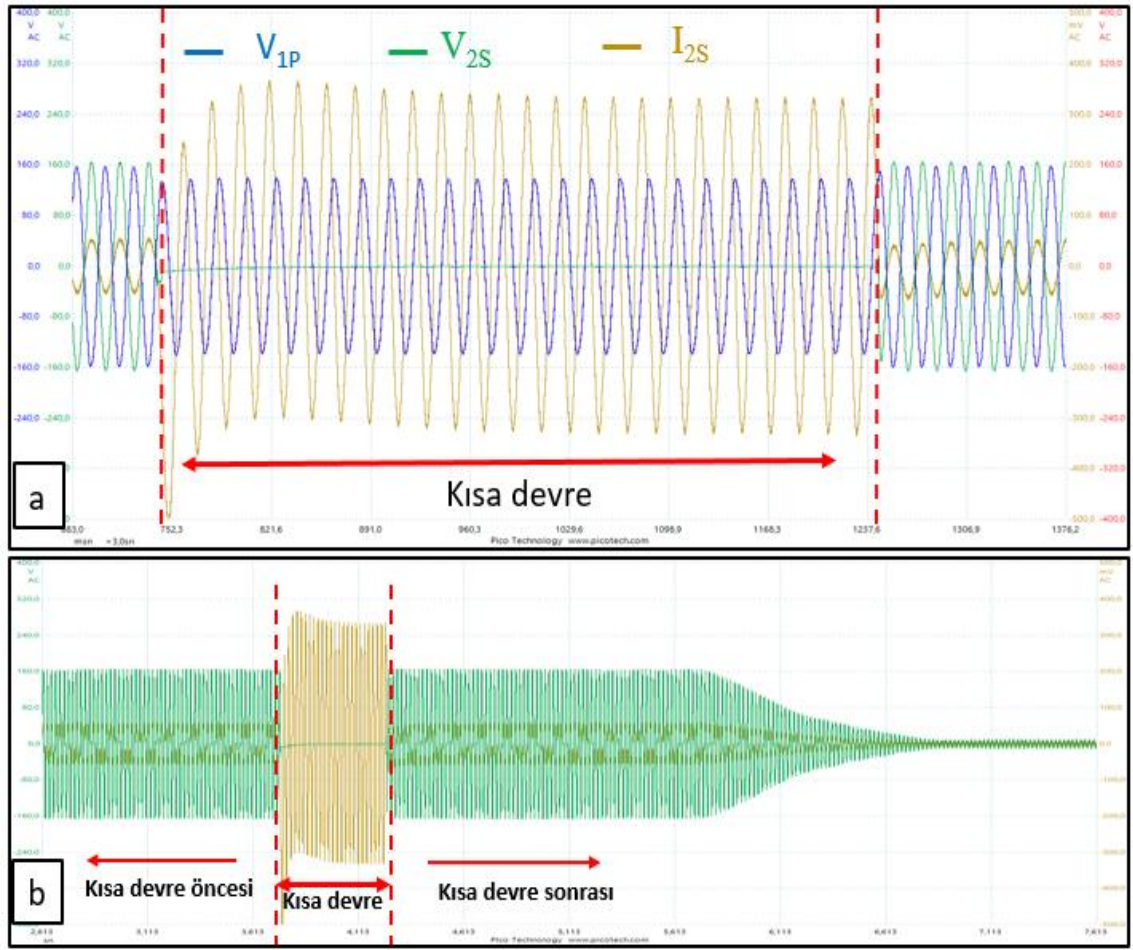
Şekil 4.35.a.b. Yüksüz sisteme ait voltaj ve akım değerlerinin kısa devre öncesi ve sonrası değerleri (Gencer vd. 2016)

Grafiğe bakıldığı zaman V_{1P} ve V_{2S} değerlerinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Sistem yüksüz olduğundan I_{2S} değerinin kısa devre durumundan önce sıfırdır. Kısa devre durumunda I_{2S} değerinin aniden artmış ve yaklaşık üç periyot sonra belli bir değerde sabitlenmiştir. Süperiletken halkanın normal duruma dönüşmesinden sonra manyetik akı transferi yapılamamış ve V_{2S} değeri neredeyse sıfır olmuştur.



Şekil 4.36 Birbirine paralel 45 tane süperiletken tel kullanılarak oluşturulan deney düzeneği

Şekil 4.36’da birbirine paralel olarak hazırlanmış 45 tane süperiletken halkanın deney düzeneği gösterilmektedir. Üç tane soğutma kabı şekildeki gibi yerleştirilip herbirinin içerisine 15 tane süperiletken halka konularak sıvı azot ortamında soğumaya bırakılmış ve sistem yüklü iken ölçüm alınmıştır (Şekil 4.37).



Şekil 4.37.a.b Yüklü sisteme ait voltaj ve akım değerlerinin kısa devre öncesi ve sonrası değerleri

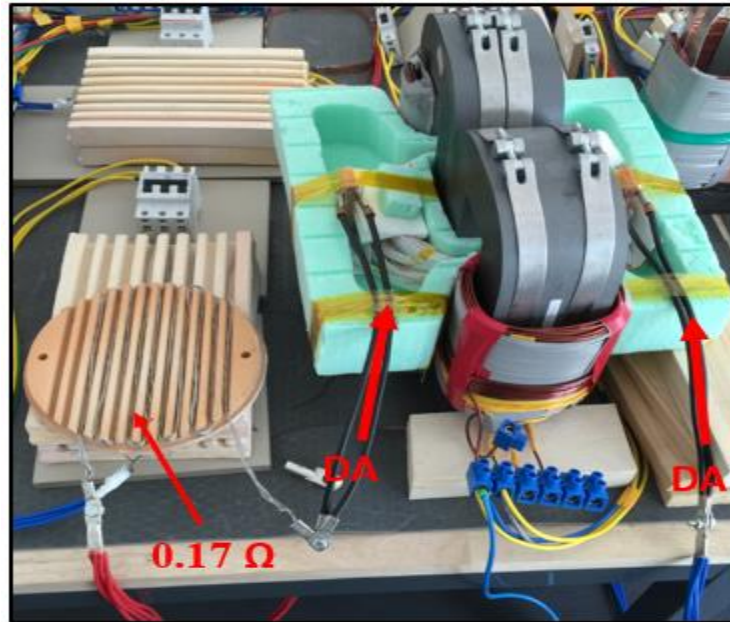
Şekil 4.37'deki grafik incelendiği zaman V_{1P} 'nin pik değeri 157,7 V ve V_{2S} 'nin pik değeri 162 V'dur. İkincil taraftaki ikincil bobin 0,7 s kısa devre yapılmaktadır. V_{1P} ve V_{2S} voltaj değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Kısa devre durumunda ikincil tarafa manyetik akı transferi yapılamadığı için V_{2S} değeri neredeyse sıfır olmaktadır. V_{2S} , kısa devre durumundan yaklaşık 5 periyot sonra eski değeri olan 162 V değerine geri dönmektedir. Ayrıca kısa devre durumundan önce I_{2S} pik değeri 5,2 A iken kısa devreden hemen sonra 50 A olmaktadır.

Birbirine paralel 15 ve 45 tane halka kullanılarak yapılan sisteme ait deneysel ölçümler esnasında bir takım problemlerle karşılaşılmıştır. Çizelge 4.2'den görüldüğü gibi tellerin kritik akım değerleri özdeş değildir. Kritik akım değeri daha düşük olan tel daha önce quench olmaktadır. Ayrıca süperiletken tellerin ortadan ikiye kesilmesi esnasında

zayıf noktalar oluşturulmuştur ve tel yanmaya bu zayıf noktalardan başlamıştır. İçerisinden akım geçen ve birbirine paralel olan bu teller birbirlerini çektiğinden diğer tellerde olumsuz yönde etkilenmiş, diğer tellerde yanmalar oluşmuştur. Bu duruma sebep olan başka bir etmende süperiletken tellerin yalıtımı sağlanamadığı için birisinde meydana gelen yanma diğer tele de daha kolay etki etmiştir. Tellerin bu şekilde hazırlanarak deney düzeneğinin kurulması çok avantaj sağlamamıştır. Yapılan deneylerden çıkarılacak en önemli sonuçlardan birisi süperiletken telin seri bir şekilde sarılarak hazırlanması daha büyük bir avantaj sağlamıştır. Çünkü paralel hazırlanan tellerde yalıtım yapılamadığı için yanması daha kolay olmuştur.

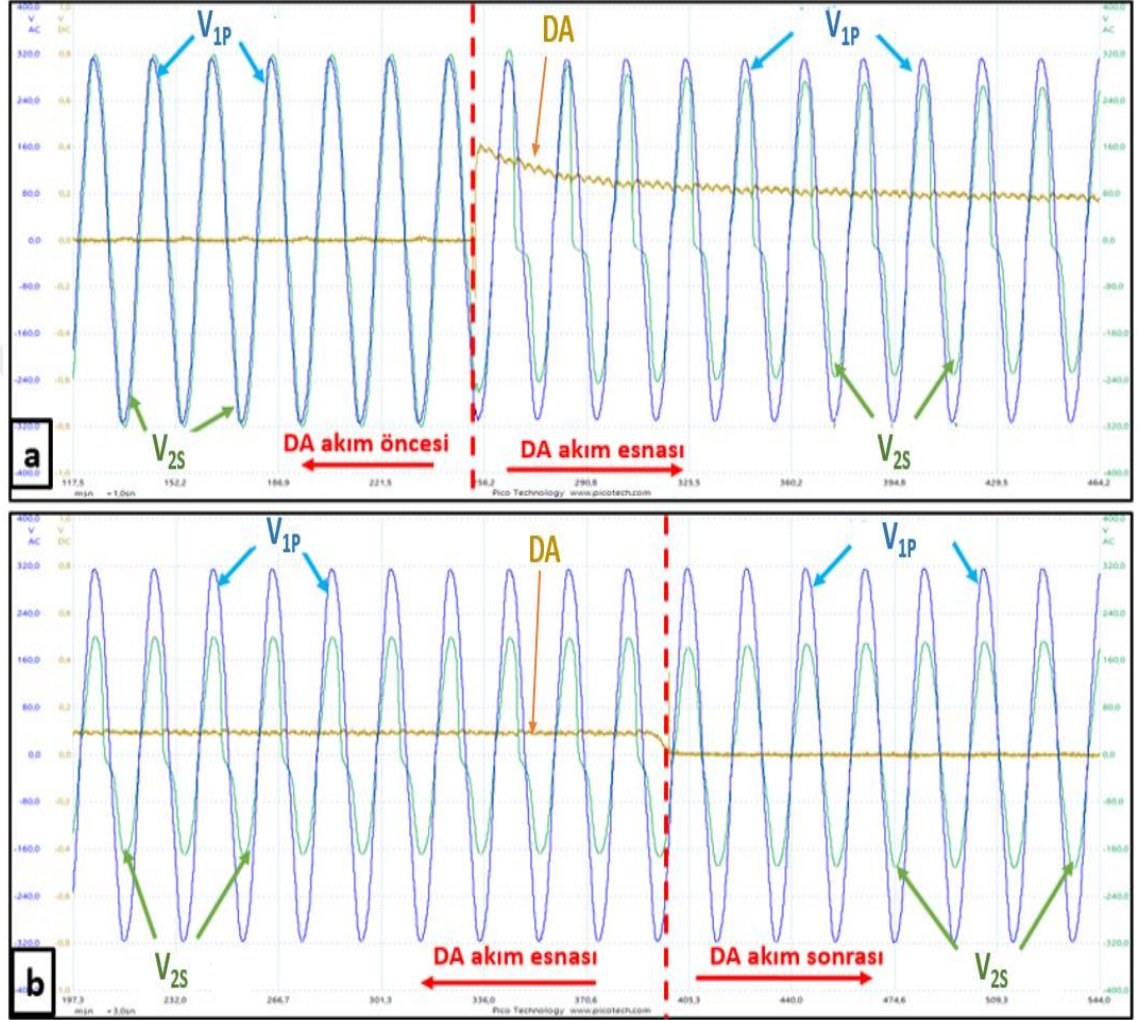
4.3.3 2,5 kVA'lık tek- fazlı SHAS'a kontrol edilebilir ekstra DA verilmesi

Bu kısımda tek fazlı sisteme ayarlanabilir ekstra DA uygulanmıştır. Bu uygulanan DA sayesinde süperiletken halka süperiletken durumdan çıkarak dirençli duruma dönüşmüştür ve bu durumun sonucunda ikincil voltaj değerinin azalması sağlanmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda sistemin birincil ve ikincil tarafında 26Ω 'luk iki tane direnç kullanılmıştır. DA kaynağına bağlanan yükün direnci $0,17 \Omega$ 'dur. Şekil 4.38'de 2,5 kVA'lık tek-fazlı sisteme DA verilmesi gösterilmiştir.

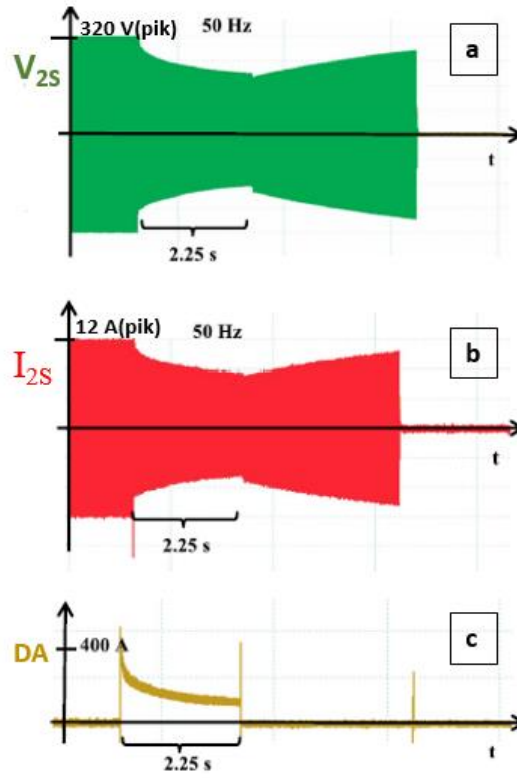


Şekil 4.38. Tek-fazlı sisteme DA verilmesi

Şekil 4.39 - 4.40'da kritik akım değeri 83 A olan SF4050 süperiletken teli 45 sarım yapılarak süperiletken halka oluşturulmuştur ve bu süperiletken halka kullanılarak yapılan tek fazlı sisteme ait grafikler gösterilmektedir.



Şekil 4.39.a. 45 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait DA öncesi, b. DA sonrası grafikler

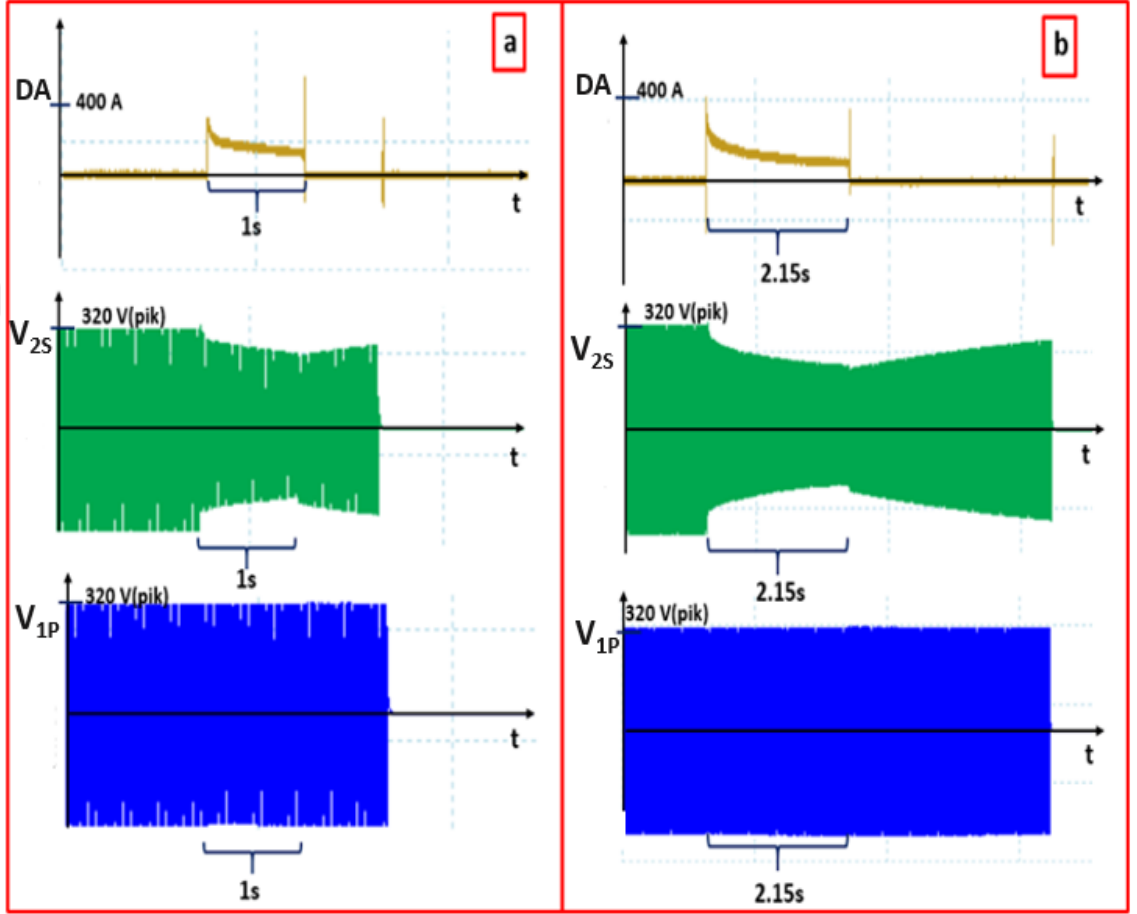


Şekil 4.40.a V_{2s} , b. I_{2s} , c. DA değerleri (Gecer vd. 2016)

45 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait grafiğe bakıldığında zaman V_{1P} pik değerinin 320 V olduğu görülmüştür (Şekil 4.39). Süperiletken halkaya 2,25 s boyunca DA verilmiştir ve bu süre boyunca V_{1P} değerinde herhangi bir değişim olmamıştır. V_{2s} değeri ise 167 V değerine kadar düşmüştür. Süperiletken halkaya DA verildiği zaman süperiletken halkanın kritik akım değerinden daha fazla akım geçmesi sağlanmıştır ve süperiletken halka dirençli duruma dönüşmüş ve meydana gelen hatalı akımın bu sayede sınırlandırılması sağlanmıştır. V_{2s} pik değeri başlangıçta 320 V iken sisteme 2,25 s kadar DA verildiği zaman 167 V değerine, I_{2s} pik değeri 12 A iken DA uygulama esnasında 7 A değerine kadar düşmüştür (Şekil 4.40).

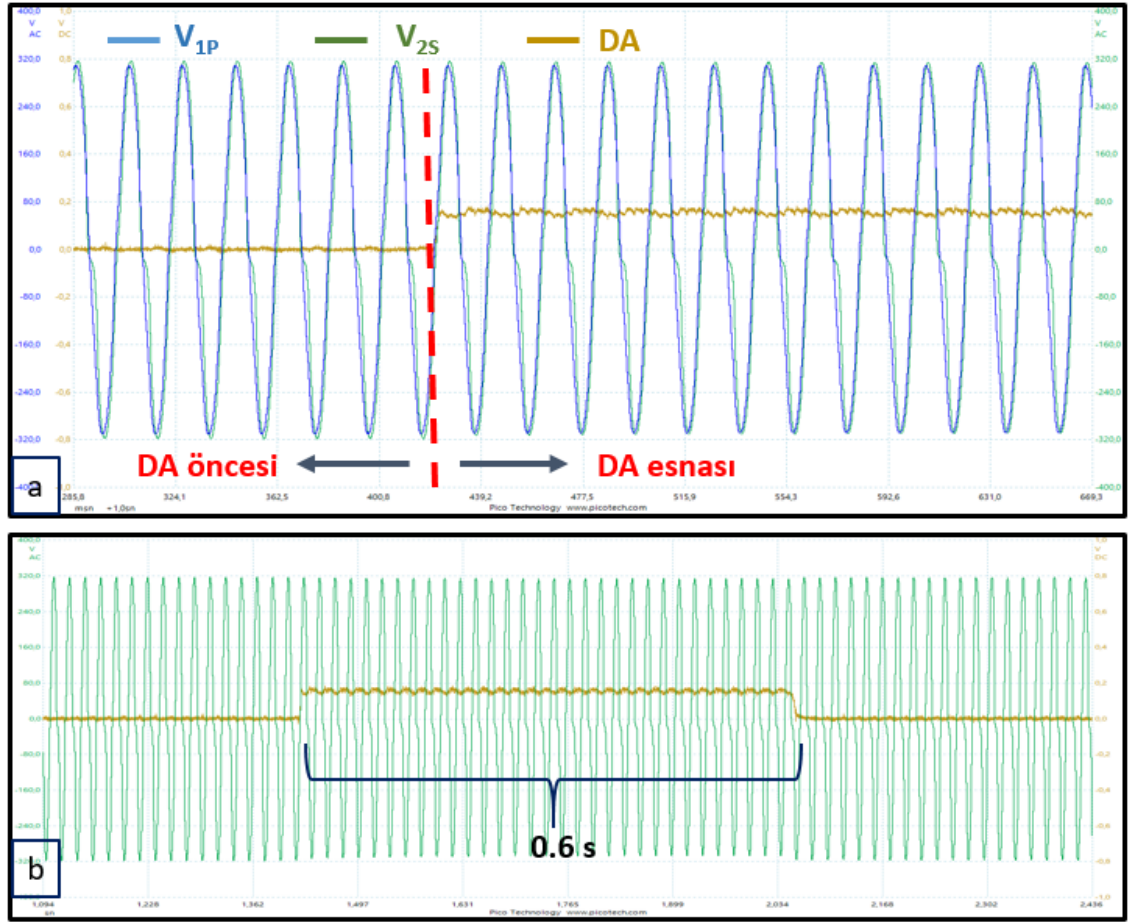
Daha sonra sistem yüklü iken ölçümler alınmıştır (Şekil 4.41). Halkaya doğru akımın uygulanma süresi değiştikçe V_{2s} değerinde de buna bağlı olarak değişimler gözlenmiştir. Şekil 4.41.a'da V_{2s} pik değeri başlangıçta 320 V iken sisteme 1 s kadar DA verildiği zaman 240 V değerine kadar düşmüştür. Şekil 4.41.b'de başlangıçta V_{2s} pik değeri 320 V iken sisteme 2,15 s boyunca 400 A doğru akım verildiği zaman 178 V değerine kadar düşmüştür. Her iki grafikte incelendiği zaman sisteme DA verilme

süresinin V_{1P} üzerinde hiç bir etkisi gözlenmezken, halkaya DA verilme süresi uzadıkça buna bağlı V_{2S} değerinde daha çok düşme görülmüştür. Bütün bu ölçümlerden görüldüğü üzere DA uygulama esnasında süperiletken halka normal duruma dönüşerek V_{2S} düşmesine sebep olmuş ve hatalı akımı sınırlamıştır.



Şekil 4.41.a Sisteme 1s, b, 2,15 s DA verildiği zaman voltaj değerleri

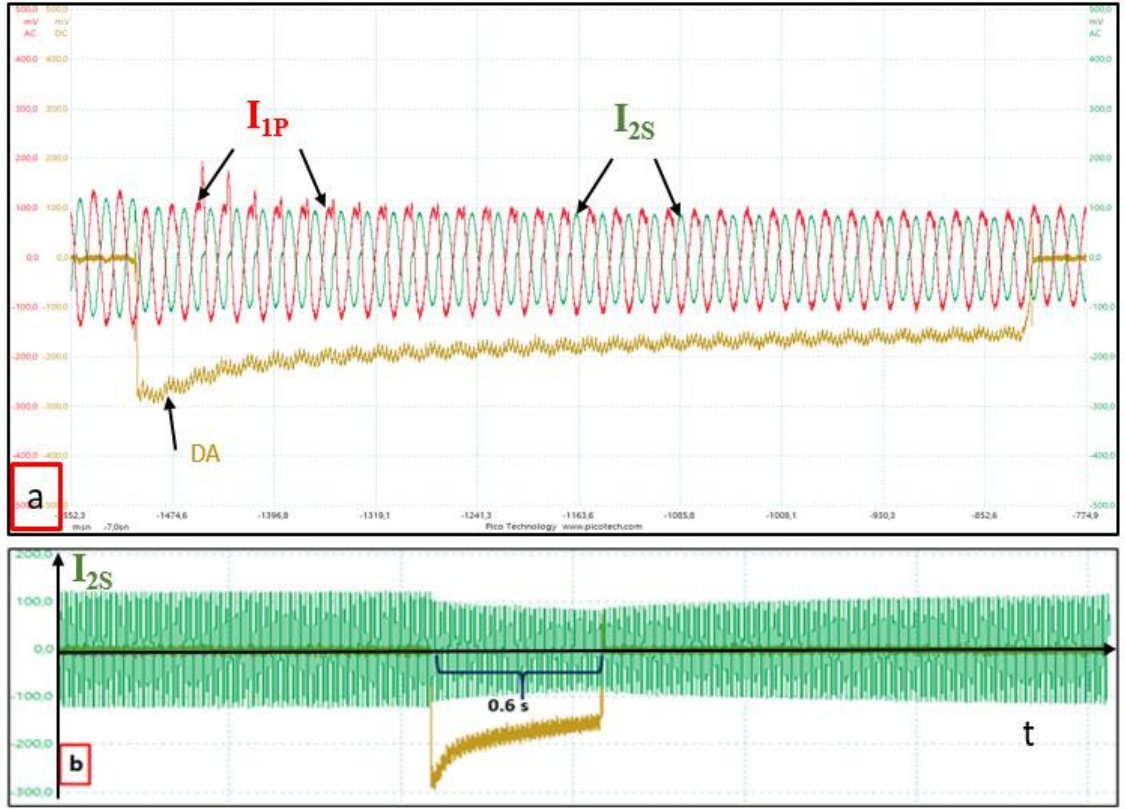
Alınan sonraki ölçümde yine 45 sarımlı süperiletken halka kullanılmıştır (Şekil 4.42). Bu ölçümde DA uygulama süresine göre toparlanma süresinin kıyaslaması verilmiştir.



Şekil 4.42.a Sisteme ait DA ve voltaj değerleri, b. V_{2S} ve DA değerleri

Grafiktende görüldüğü üzere V_{1P} ile V_{2S} pik değeri 320 V'dur. Süperiletken halkaya 0,6 s boyunca DA uygulanmıştır. V_{2S} pik değeri sisteme DA uygulandığı zaman 300 V değerine kadar düşmüştür. Şekil 4.41 ile kıyaslandığı zaman DA sisteme 2,15 s boyunca verilirken toparlanma süresi 3,4 saniyeden fazlayken, Şekil 4.42'deki grafikte 0,6 s DA uygulandığı zaman toparlanma süresi yaklaşık sıfır olmaktadır. Sisteme DA verilme süresi ne kadar kısa olursa toparlanma süresinin de o kadar kısa olduğu görülmüştür.

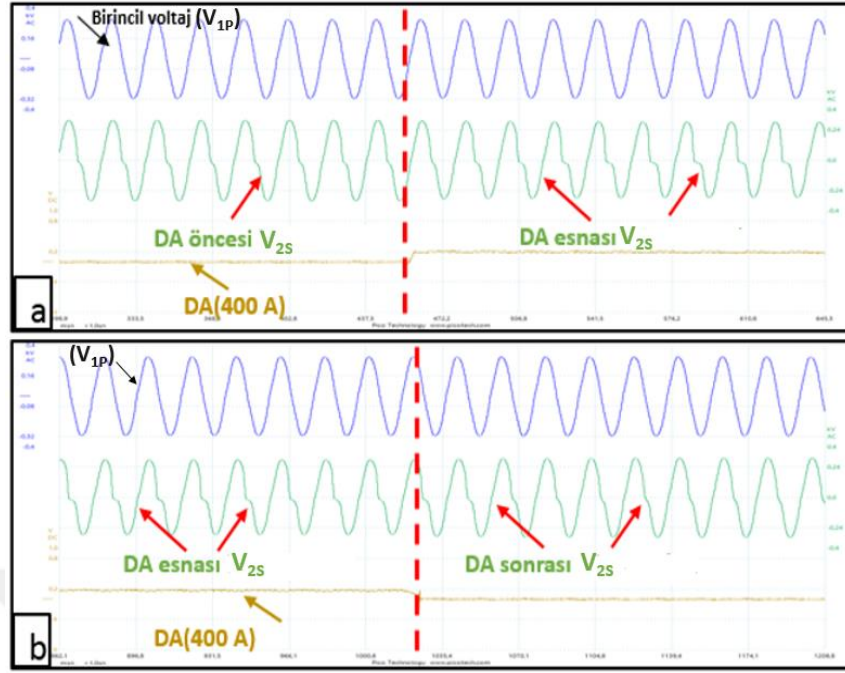
Yapılan bir sonraki deneyde kritik akım değeri 83 A olan SF4050 süperiletken teli 30 sarım yapılarak halka oluşturulmuştur ve sistem yüklü iken ölçümler alınmıştır (Şekil 4.43).



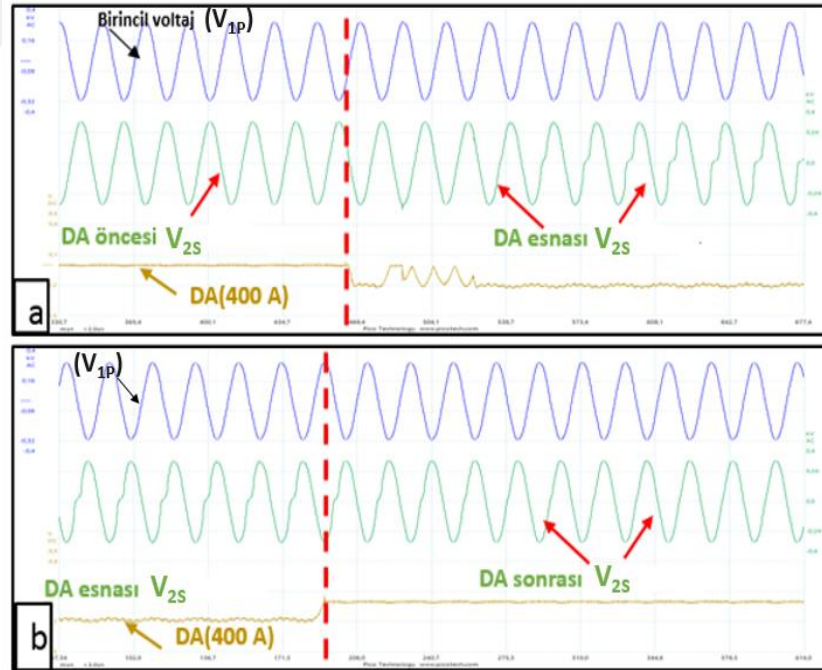
Şekil 4.43.a Sisteme ait akım değerleri, b. I_{2S} ve DA değerleri

Grafiğe bakıldığı zaman 0,6 saniye boyunca halkaya DA verilmiştir bu zaman boyunca I_{2S} değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. DA uygulanmadan önce I_{2S} pik değeri 12 A iken, DA uygulama esnasında 8,1 A değerine kadar düşme gözlemlenmiştir. I_{1P} ise 10 A değerine kadar düşmüştür. DA uygulama esnasında süperiletken halkanın dirençli duruma geçmesiyle birlikte I_{1P} ve I_{2S} değerlerinde azalma meydana gelmiş ve bu sayede hatalı akım sınırlandırılmıştır.

Şekil 4.44 - 4.45’de ise 30 sarımlı ve 45 sarımlı süperiletken halka kullanılarak alınan ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. 45 ve 30 sarımlı süperiletken halkalara ait grafikler incelendiğinde halkaya DA verilmeden önce, DA verildiği sürece, DA kesildikten sonra V_{1P} , V_{2S} ve V_{DA} değerleri görülmektedir.



Şekil 4.44.a 45 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait DA öncesi, b. DA sonrası grafikler

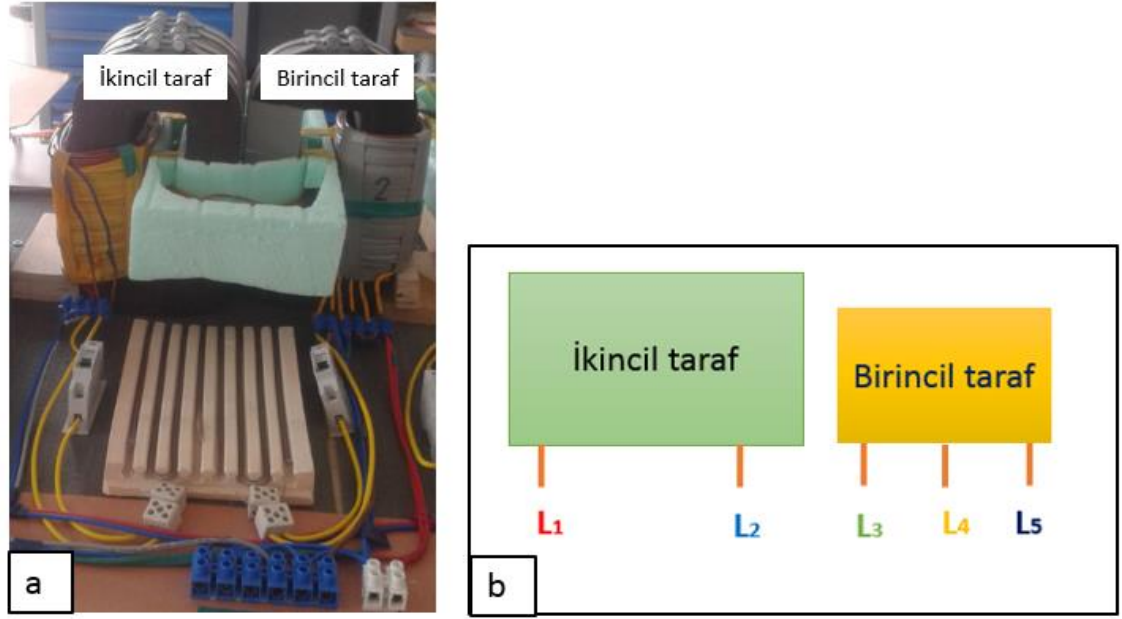


Şekil 4.45.a 30 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait DA öncesi, b. DA sonrası grafikler

45 sarımlı halkada V_{1P} pik değeri 310 V iken 0,67 s boyunca DA verilmektedir. DA esnasında V_{2S} değeri 245 V değerine kadar düşmekteyken V_{1P} değerinde hiçbir değişme gözlemlenmemiştir. 30 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait grafik incelendiğinde halkaya DA 0,69 s boyunca verilmiştir ve halkaya DA verilmeden önce V_{1P} ile V_{2S} pik değerinin 320 V olduğu görülmektedir (Şekil 4.45). DA esnasında V_{2S} değeri ancak 315 V değerine kadar düşmüştür. Alınan her iki ölçümde de halkaya DA verilme süreleri neredeyse aynıdır. 30 sarımlı ve 45 sarımlı halka kullanılarak alınan ölçüm sonuçları kıyaslandığı zaman süperiletken sarım sayısı arttıkça V_{2S} değeri daha çok düşmektedir. Her iki ölçüm sonucunda da V_{1P} değeri sabit kalmaktadır. 45 sarımlı halkaya ait grafiğe bakıldığında sisteme DA verilmeden önce V_{2S} sinüsoidal dalga formundan çıktığı görülmektedir. Bu durumu ise, demir nüvelerin doyuma ulaşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. 30 sarımlı halkaya ait grafiğe bakıldığı zaman V_{2S} dalga formunun DA verilmeden önce ve DA verildikten sonra 45 sarımlı halkaya ait sistemdeki ikincil voltaj değerine oranla daha az değişmiştir.

4.4 Farklı Geometride Demir Nüveler Kullanılarak Yapılan Tek Fazlı 2,5 kVA'lık SHAS'a Ait Ölçümler

Şekil 4.46.a'da farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan sistemin birincil ve ikincil taraflardaki bobinlere ait indüktans değerleri LCR metre ile ölçülmüştür (Çizelge 4.6). Aynı sarım sayısına sahip birincil ve ikincil bobinin indüktanslarının aynı olduğu görülmektedir.



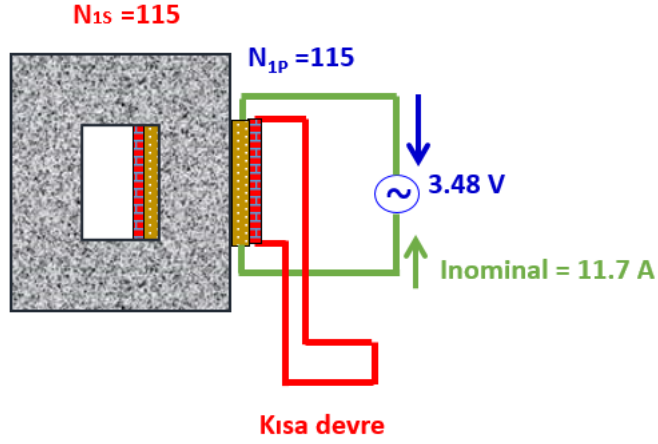
Şekil 4.46.a Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan sistemin fotoğrafı, b. Bobinlerin şematik gösterimi

Çizelge 4.6 Birincil ve ikincil taraftaki bobinlere ait değerler

	Sarım sayısı	İndüktans(mH)	Direnç(Ω)	Bakır telin çapı(mm)
İKİNCİL TARAF	$N_1=115$	$L_1=73.5$	$R_1=0.26$	$R=3$
	$N_2=115$	$L_2=73.5$	$R_2=0.26$	$R=3$
BİRİNCİL TARAF	$N_3=115$	$L_3=77.8$	$R_3=0.27$	$R=2,5$
	$N_4=58$	$L_4=19.1$	$R_4=0.18$	$R=2,5$
	$N_5=57$	$L_5=19.8$	$R_5=0.18$	$R=2,5$

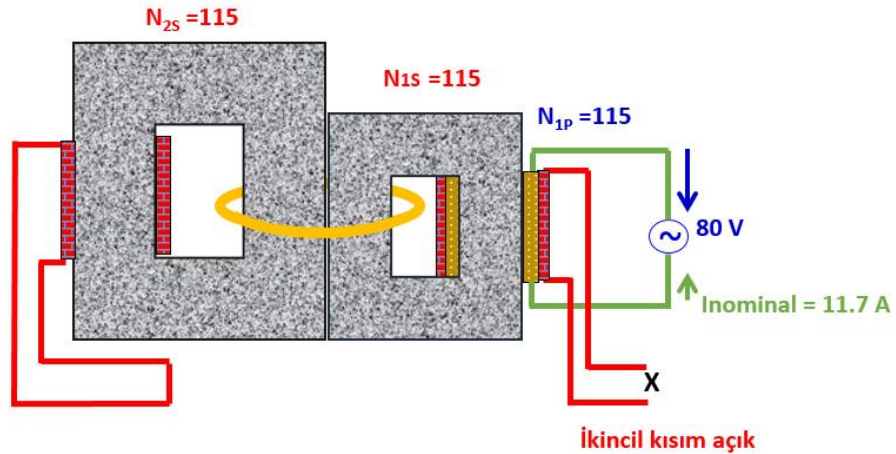
Farklı geometriler kullanılarak yapılan tek- fazlı SHAS'a ait birincil ve ikincil taraftaki voltaj düşüm (drop ϵ) hesapları deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Birincil taraftaki voltaj düşümünü hesaplamak için ikincil bobin kısa devre yapılmıştır ve birincil bobin nominal akım değerinde iken birincil bobin üzerinden geçen voltaj değeri belirlenmiştir (Şekil 4.47). Bu durumda nominal akım değeri yaklaşık olarak 11,7 A olarak ölçülmüş ve bu akım değerine karşı gelen voltaj değeri 3,48 V olarak belirlenmiştir. Kısa devre durumundan sonra birincil taraftaki voltaj düşümü % 1,58 olarak bulunmuştur. Tek- fazlı SHAS'ın karşılayabileceği maksimum hatalı akım değeri

için gerekli ifade denklem (4.2)'de verilmiştir. Buna göre birincil tarafın karşılayabileceği maksimum hatalı akım değeri 739,66 A olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.47 Tek- fazlı SHAS'ın birincil tarafı için drop ölçümü

İkincil taraftaki drop ölçümü için ikincil taraftaki bobin kısa devre yapılmıştır ve birincil bobin nominal akım değeri olan 11,7 A ulaştığı andaki voltaj değeri 80 V olarak belirlendikten sonra ikincil tarafın düşüm denklem (4.1)'e göre $\epsilon = \% 36,36$ olarak hesaplanmıştır. İkincil taraf için maksimum hatalı akım değeri 32,18 A belirlenmiştir. Şekil 4.48'de ikincil tarafın düşüm hesabı için sistemin şematik gösterimi verilmiştir.

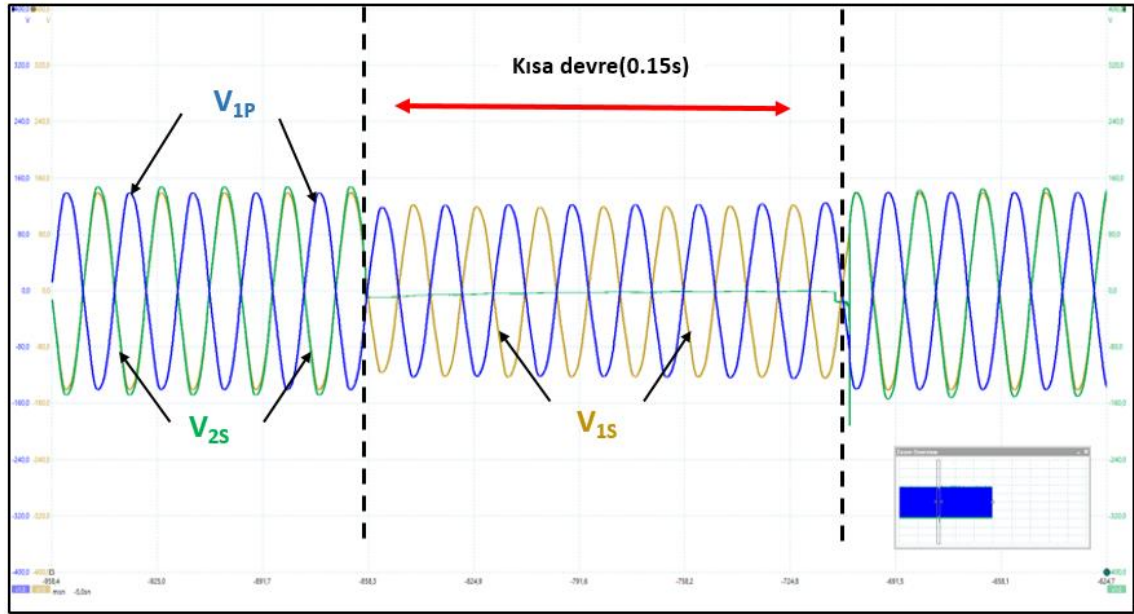


Şekil 4.48 Tek- fazlı SHAS'ın ikincil tarafı için drop ölçümü

Farklı büyüklüklerde demir nüveler kullanıldığı zaman yapılan SHAS ile tek- fazlı aynı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS'a ait drop ölçümleri

kıyaslandığında nominal akım değerleri neredeyse aynıdır. Her iki sistem için hesaplanan birincil tarafa ait drop ölçümleri birbirine çok yakındır. Fakat ikincil tarafa ait drop ölçümleri farklıdır. Bunun sebebi kullanılan ikincil tarafa kullanılan demir nüvenin boyutunun büyümesidir.

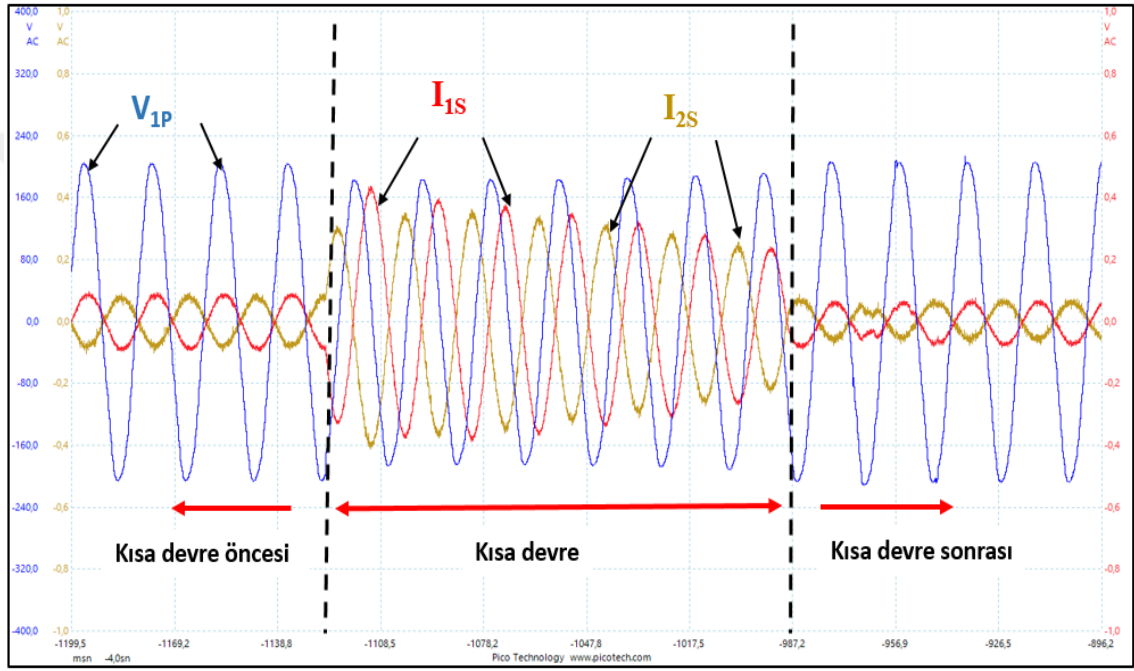
Bu sistem için kritik akım değeri 80A olan SCS 4050 YBCO süperiletken teli 12 sarım yapılarak yalıtımı için kapton bant kullanılmıştır. Farklı geometrilerde demir nüveler kullanılarak yapılan trafoda manyetik akı transferinin süperiletken halka aracılığı ile ikincil tarafa aktarıldığı yapılan deneylerle ispatlanmıştır. İkincil tarafta kesit alanını büyütmek manyetik akı transferini engelleyen bir durum oluşturmamıştır.



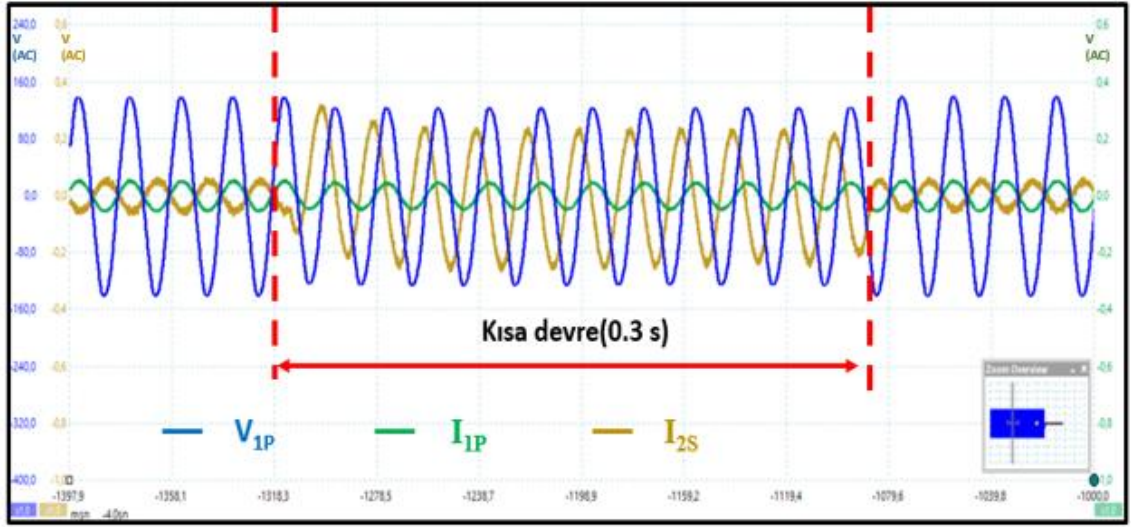
Şekil 4.49. 12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait voltaj değerleri

V_{1P} , V_{1S} ve V_{2S} pik değerleri sırasıyla 140V, 140 V ve 145 V olduğu grafiğe bakarak söylenebilir (Şekil 4.49). Sarım sayısı ve voltaj değerleri birbiriyle orantılı olduğundan V_{1S} ve V_{2S} değerleri neredeyse birbiriyle aynıdır. Kısa devre durumunda süperiletken halka normal duruma dönüşmüş ve manyetik akı transferi ikincil tarafa aktarılamamış, V_{2S} değerinin yaklaşık sıfır olduğu belirlenmiştir. Kısa devre durumundan V_{1P} ve V_{1S} değerlerinde çok azalma görülmüştür.

Şekil 4.50’de görüldüğü üzere ikincil taraftaki bobin 0,2 s kısa devre edilmiştir. 12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait V_{1P} pik değeri kısa devre öncesi 204 V iken kısa devre durumunda, değerinde çok az bir azalma olmuştur. Kısa devre durumundan önce I_{1S} ve I_{2S} değeri 9,3 A iken, kısa devre durumundan hemen sonraki periyotta sırasıyla 42,9 A ve 35,2 A olmaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi kısa devre durumunda I_{1S} ve I_{2S} değerleri aniden artmış fakat sonraki periyotlarda giderek azalmaya başlamıştır.



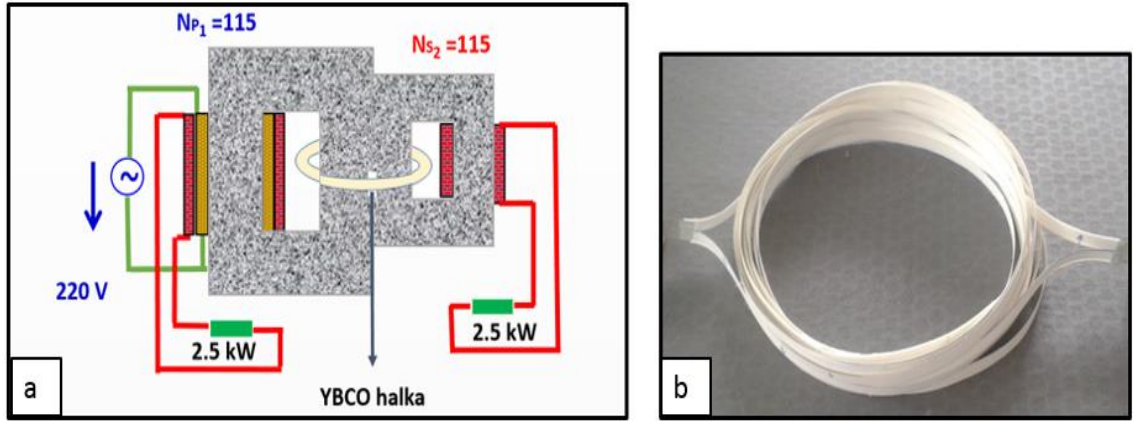
Şekil 4.50 12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait V_{1P} ve akım değerleri



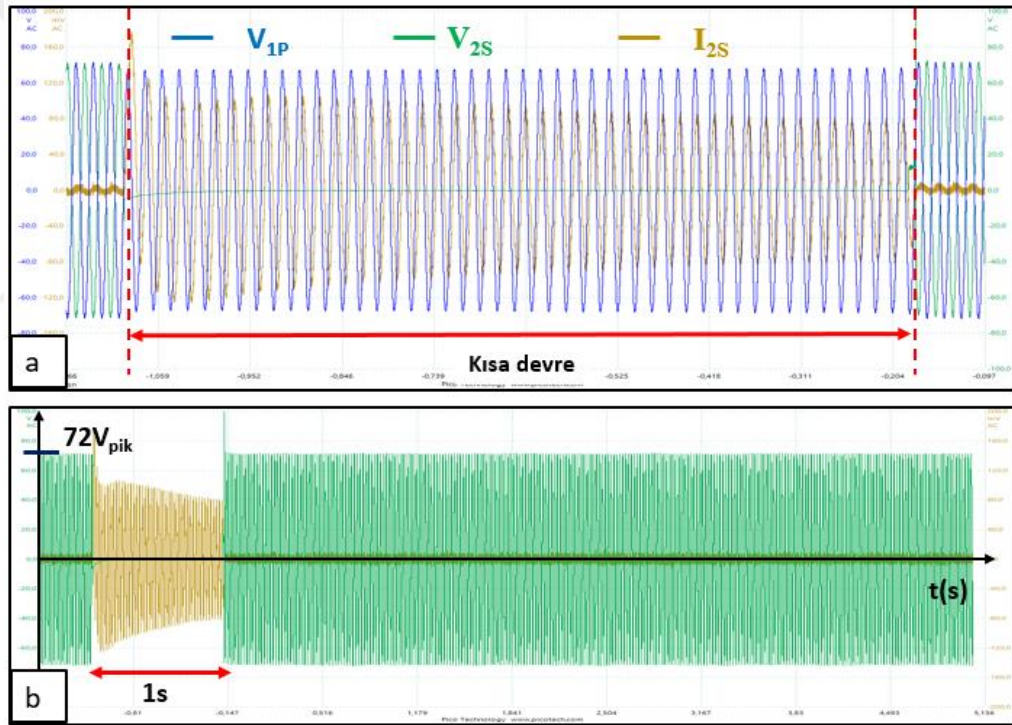
Şekil 4.51 12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan sisteme ait V_{1P} ve akım değerleri

12 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait V_{1P} pik değeri kısa devre öncesi 140 V iken kısa devre durumunda, değerinde çok az bir azalma olmuştur (Şekil 4.51). İkincil taraftaki bobin 0,3 s kısa devre edilmiştir. Kısa devre durumundan önce ve sonra I_{1P} değerinde bir değişme olmamıştır. I_{2S} değeri ise, kısa devre durumundan önce 7 A iken, kısa devre durumundan hemen sonraki periyotta 31 A olmaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi kısa devre durumunda I_{2S} değeri aniden artmış fakat sonraki periyotlarda giderek azalmaya başlamıştır.

Sonraki deney için kritik akım değeri 281 A olan SF12050 YBCO süperiletken teli ortadan ikiye kesilerek 17 sarım yapılmıştır. Oluşturulan bu süperiletken halkanın yalıtımı yalıtkan bir bant yardımıyla yapılmış ve sonrasında ölçümler alınmıştır (Şekil 4.52).



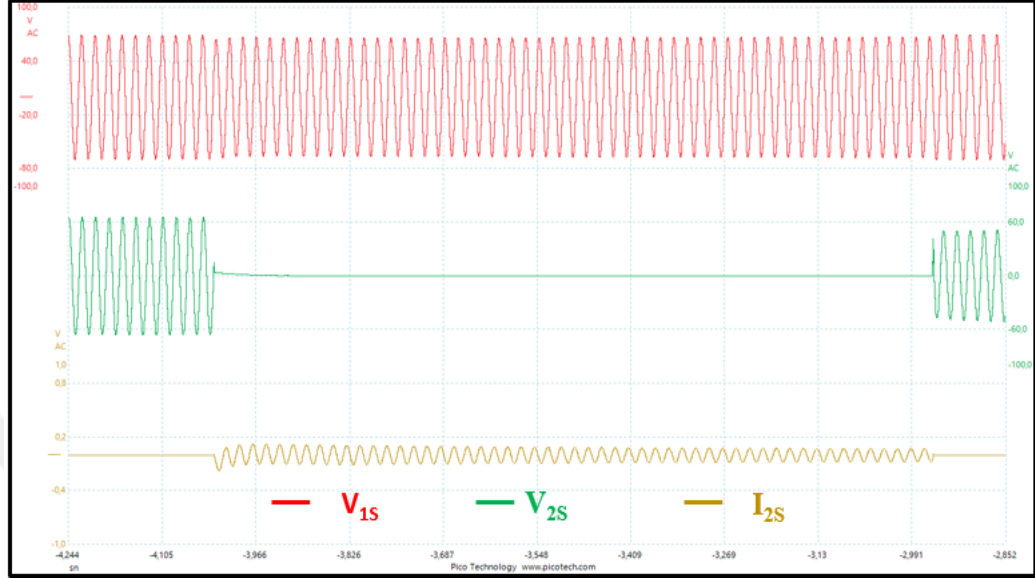
Şekil 4.52.a Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan sistemin şematik gösterimi, b. 17 sarımlı süperiletken halka



Şekil 4.53.a 17 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait akım ve voltaj değerleri, b. V_{2S} ve I_{2S} değerleri

17 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait V_{1P} ve V_{2S} pik değeri 72 V'dur (Şekil 4.53). İkincil taraftaki ikincil bobin yaklaşık olarak 1 s kadar kısa devre edilmiştir. I_{2S} değeri kısa devre durumundan önce sıfırken, kısa devre durumundan hemen sonra 12,5 A olmaktadır. Yaklaşık üç periyot sonra I_{2S} , 10 A

civarında sınırladığı görülmektedir. Sistem yüksüz olduğu için toparlanma süresi neredeyse sıfırdır.



Şekil 4.54. a 17 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait akım ve voltaj değerleri

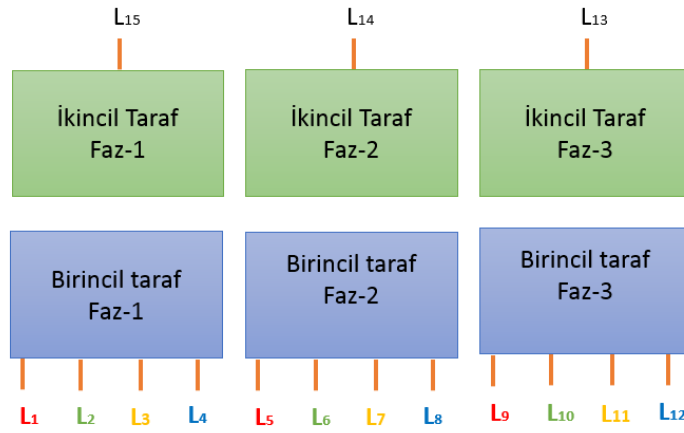
17 sarımlı süperiletken halka kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait V_{1s} ve V_{2s} pik değeri sarım sayıları aynı olduğundan 72 V'dur (Şekil 4.54). Sistem yaklaşık olarak 1 s kısa devre edilmiştir. I_{2s} pik değeri kısa devre durumundan önce sıfırken kısa devreden sonra 12 A olmaktadır. Manyetik akı transferi ikincil tarafa başarılı bir şekilde aktarılmıştır.

Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan 2,5 kVA'lık SHAS'da ikincil tarafda demir nüvenin boyutunu büyütmenin bir avantaj sağlamadığı yapılan deneyler esnasında görülmüştür. Yapılan her iki SHAS aynı güce sahiptir. Farklı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS'da ikincil taraf için voltaj düşümü yüksektir ve kullanılan süperiletken tel miktarı daha fazladır. Bu ise, istenen bir durum değildir. Manyetik akı transferi süperiletken halka ile kayıpsız bir şekilde ikincil tarafa aktarıldığı için deneyler başarı ile sonuçlanmıştır. Yapılan her iki SHAS çeşidinde karşılaşılan en büyük problem soğutma problemi olmuştur. Kısa devre esnasında süperiletken tel soğutma kabına düzgün sabitlenemediği için dışarı taşmış ve telde yanmalar oluşmuştur.

Ayrıca, sıvı azot süperiletken halkanın sarımları arasında sirkülasyonunu düzgün yapamadığı için süperiletken telin normal duruma geçmesi kolaylaşmıştır. Aynı geometride demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS'a ekstra DA verilerek süperiletken halkanın normal duruma geçmesi sağlanmıştır ve ikincil taraftaki voltaj değeri bu sayede azaltılmıştır. Diğer yapılan deneylerde ise, ikincil taraftaki ikincil bobin kısa devre yapılarak süperiletken halkanın normal duruma geçmesi sağlanmıştır. Yapılan bu iki işlemin temel amacı, süperiletken halkayı normal duruma döndürmektir.

4.5 3- Fazlı 6 kVA'lık SHAS'a Ait Ölçümler

Tezin bu aşamasında 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS yapımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.55'de birincil ve ikincil taraftaki bobinlere ait bilgilere yer verilmiştir. Birbirinden bağımsız olan bu iki demir nüve süperiletken halka aracılığı ile birbirine bağlanmıştır. Birincil ve ikincil taraftaki bobinlere ait bilgiler Çizelge 4.7'de verilmektedir.

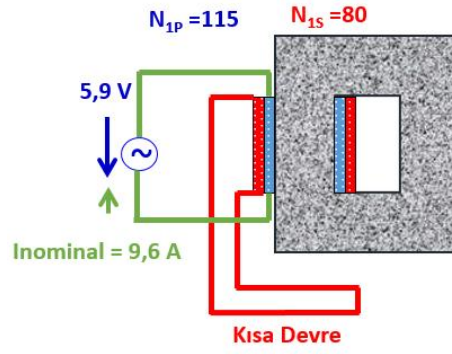


Şekil 4.55 3- fazlı 6 kVA'lık SHAS'a ait bobinlerin şematik gösterimi

Çizelge 4.7 3- fazlı 6 kVA'lık SHAS'ın birincil ve ikincil taraftaki bobinlerine ait değerler

	Sarım sayısı	Bakır telin çapı(mm)	İndüktans(mH)	Direnç(Ω)
Birincil Taraf FAZ-1	N ₁ =80	3	L ₁ =19,2	R ₁ =0,21
	N ₂ =37	2,5	L ₂ =4	R ₂ =0,19
	N ₃ =38	2,5	L ₃ =4,2	R ₃ =0,21
	N ₄ =75	2,5	L ₄ =16,7	R ₄ =0,23
Birincil Taraf FAZ-2	N ₅ =80	3	L ₅ =22,8	R ₅ =0,26
	N ₆ =37	2,5	L ₆ =4,8	R ₆ =0,18
	N ₇ =38	2,5	L ₇ =5,1	R ₇ =0,17
	N ₈ =75	2,5	L ₈ =20	R ₈ =0,23
Birincil Taraf FAZ-3	N ₉ =80	3	L ₉ =19,2	R ₉ =0,21
	N ₁₀ =37	2,5	L ₁₀ =4	R ₁₀ =0,16
	N ₁₁ =38	2,5	L ₁₁ =4,2	R ₁₁ =0,17
	N ₁₂ =75	2,5	L ₁₂ =16,8	R ₁₂ =0,21
İkincil Taraf	N ₁₃ =80	3	L ₁₃ =20,5	R ₁₃ =0,15
	N ₁₄ =80	3	L ₁₄ =24	R ₁₄ =0,17
	N ₁₅ =80	3	L ₁₅ =19,5	R ₁₅ =0,18

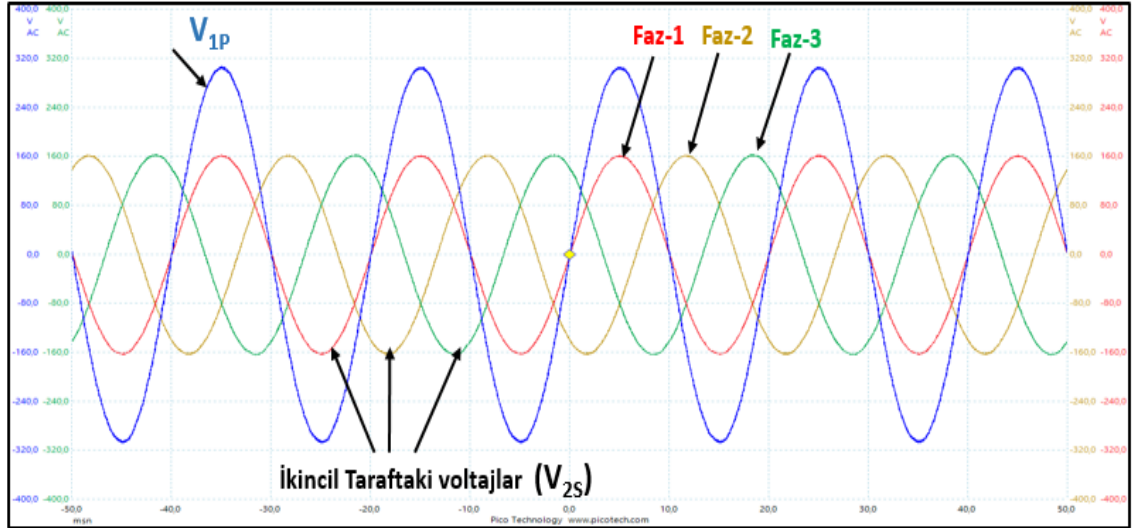
Manyetik akı transferi metodu kullanılarak yapılan 6 kVA'lık 3-fazlı SHAS için birincil ve ikincil taraftaki voltaj düşüm (drop-ε) hesapları deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik olarak hesaplanan nominal akım değeri tek faz için 9,09 A, deneysel olarak bulunan nominal akım değeri ise; 9,6 A'dir. Bu durumda teorik olarak hesaplanan değer ile deneysel olarak bulunan değer birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Birincil taraftaki voltaj düşümünü hesaplamak için ikincil bobin kısa devre yapılmıştır ve birincil bobin nominal akım değerinde iken birincil bobin üzerinden geçen voltaj değeri belirlenmiştir (Şekil 4.56). Bu durumda 9,6 A nominal akım değerine karşı gelen voltaj değeri 5,9 V olarak ölçülmüştür. Voltaj düşümü %2,68 ve birincil tarafın karşılayabileceği maksimum hatalı akım değeri 357,96 A olduğu deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır.



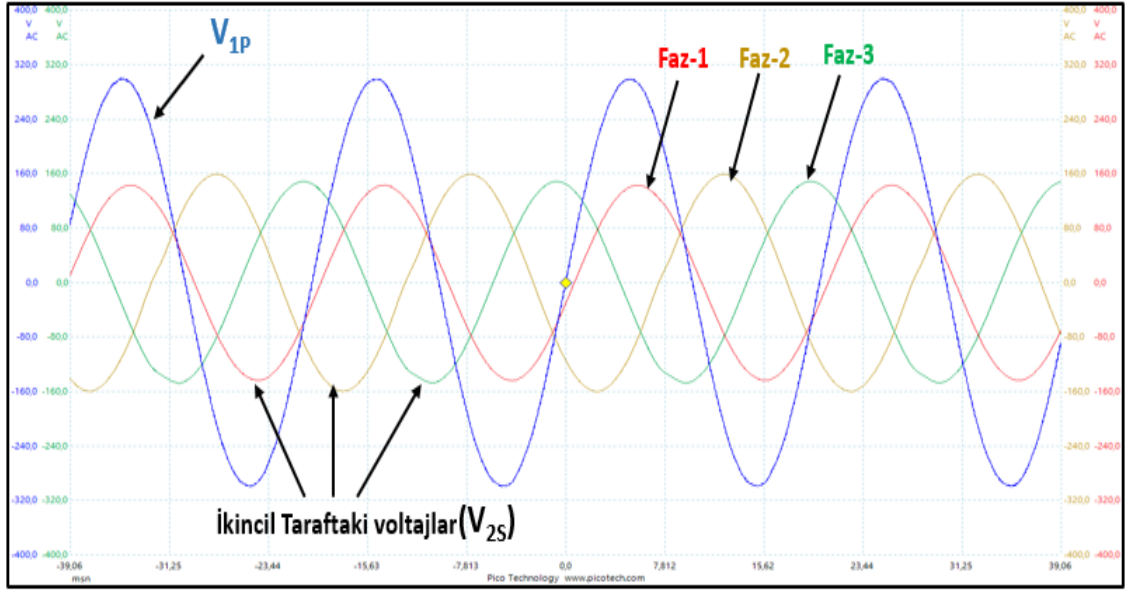
Şekil 4.56 SHAS'ın birincil tarafı için drop ölçümü için şematik gösterim

İkincil taraftaki drop ölçümü için ikincil taraftaki bobin kısa devre yapılmıştır ve birincil bobin nominal akım değeri olan 9,6 A ulaştığı andaki voltaj değeri 82,1 V olarak belirlendikten sonra ikincil tarafın düşüm $\varepsilon = \% 37,1$ olarak hesaplanmıştır. İkincil taraf için maksimum hatalı akım değeri 25,72 A belirlenmiştir.

3- fazlı 6 kVA'lık SHAS için ilk olarak kritik akım değeri 85 A olan SF4050 süperiletken telden 28 sarımlı halka oluşturulmuştur. Bu halkanın yalıtımı kapton bant yardımıyla yapılmıştır.

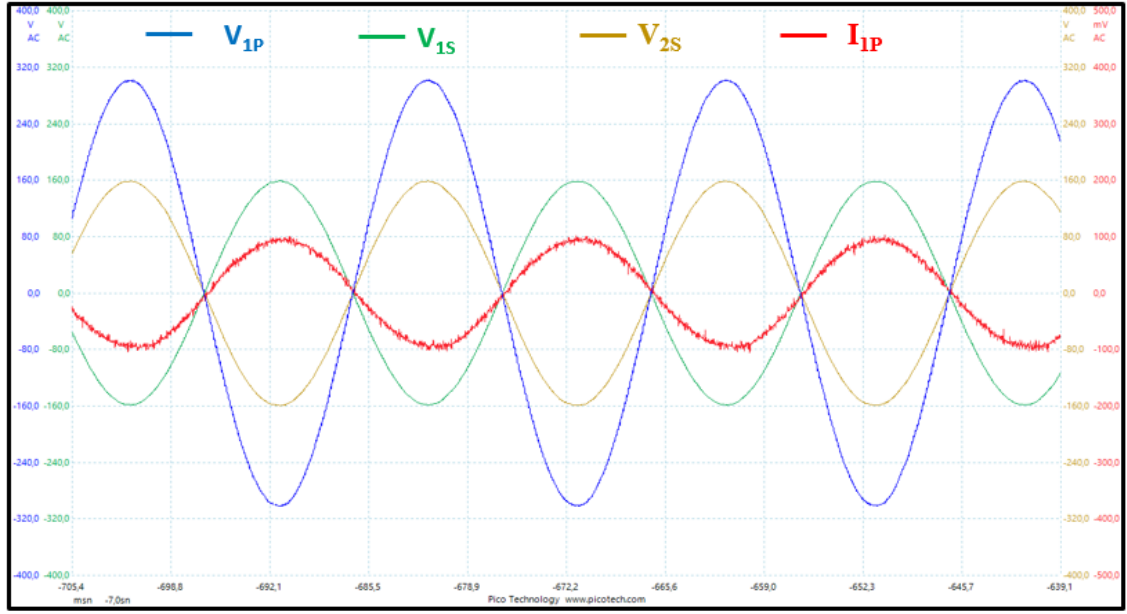


Şekil 4.57 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait voltaj değerleri



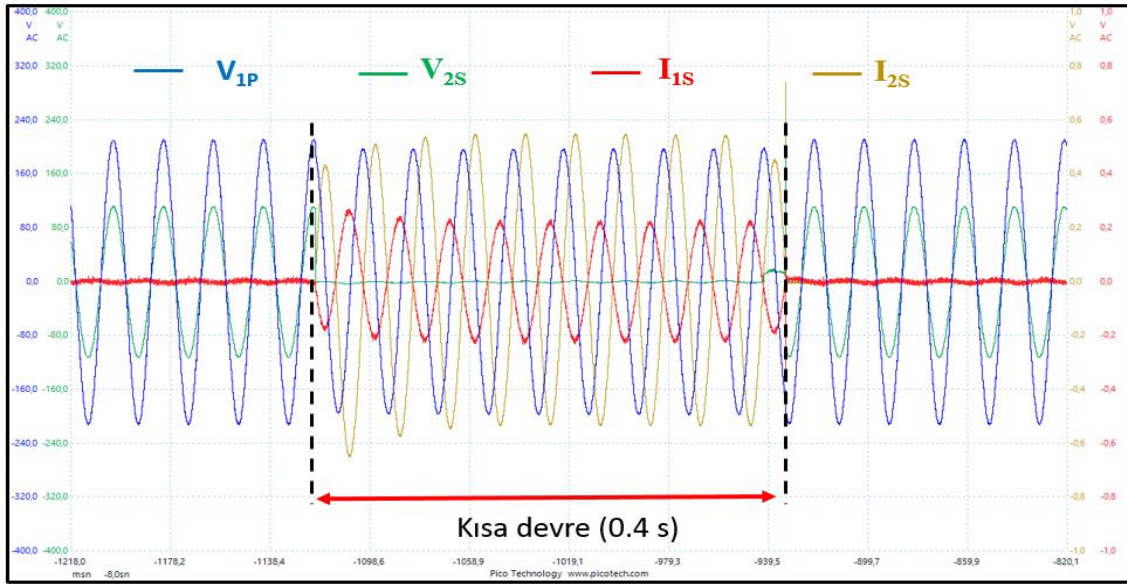
Şekil 4.58 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait voltaj değerleri

Sistem yüksüz ve yüklü durumda iken, V_{1P} pik değeri 307 V'dur. İkincil taraftaki her bir faz için sarım sayıları aynı olduğundan V_{2S} değerleri her üçünün de pik değeri 160 V'dur (Şekil 4.57 - 4.58). Voltaj değerleri sarım sayılarıyla doğru orantılı bir şekilde değiştiği için V_{2S} değerinin V_{1P} değerine göre daha az olduğu görülmektedir. Birincil taraftan ikincil tarafa manyetik akı transferi süperiletken halka yardımıyla yapılmış ve bu sayede ikincil tarafta bir voltaj değeri okunmuştur. Her iki grafiğe bakıldığı zaman manyetik akı transferinin ikincil tarafa başarılı bir şekilde aktarıldığı görülmektedir.



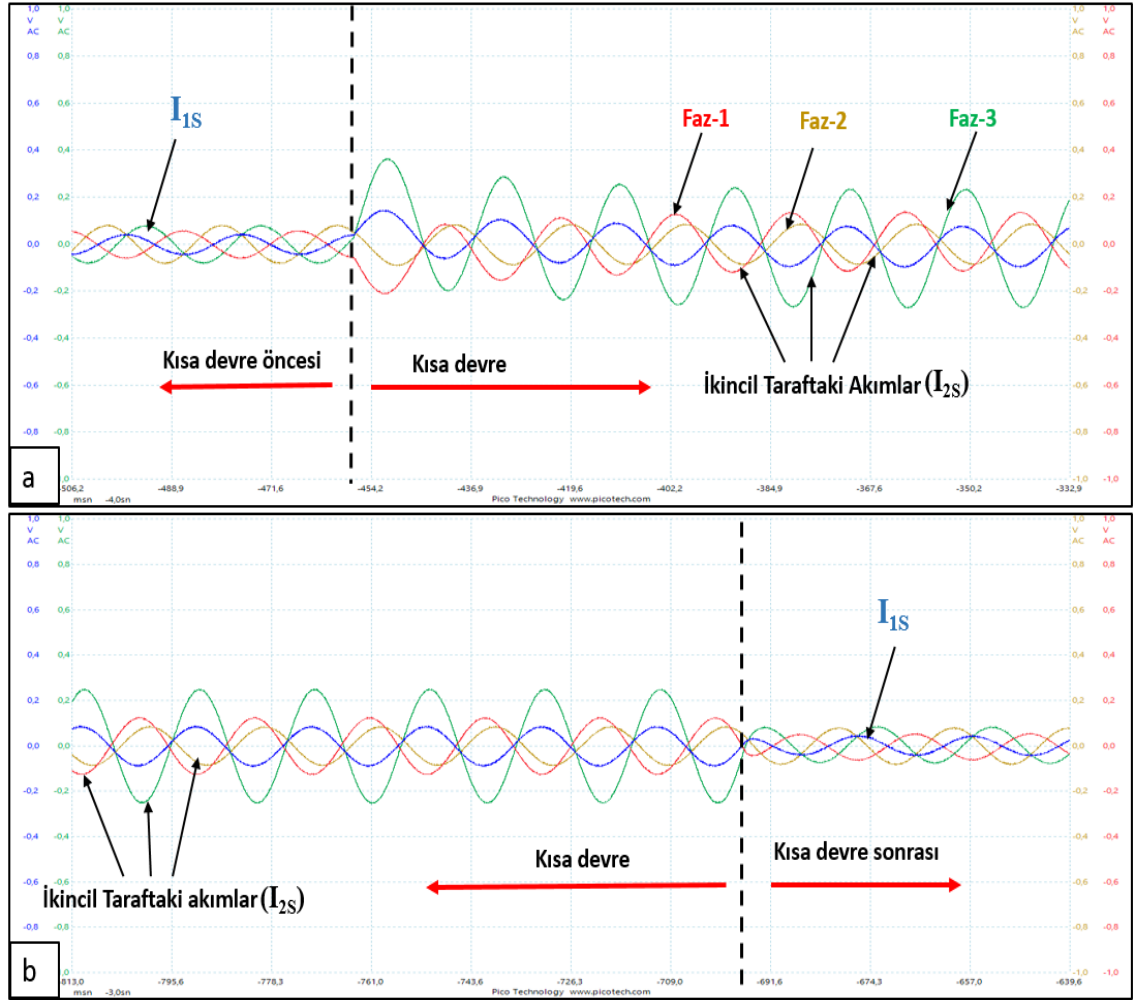
Şekil 4.59 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait akım ve voltaj değerleri

Sistem yüksüz durumda iken V_{1P} pik değeri 300 V'dur. I_{1P} pik değeri 17,2 A'dır (Şekil 4.59). Sarım sayılarının aynı olmasından dolayı V_{1S} değeri ile V_{2S} değeri neredeyse aynıdır. İkincil tarafta bir voltaj değeri gözlemlediğimiz için manyetik akı transferinin süperiletken halka vasıtasıyla başarılı bir şekilde gerçekleştiği söylenebilmektedir.



Şekil 4.60 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait akım ve voltaj değerleri

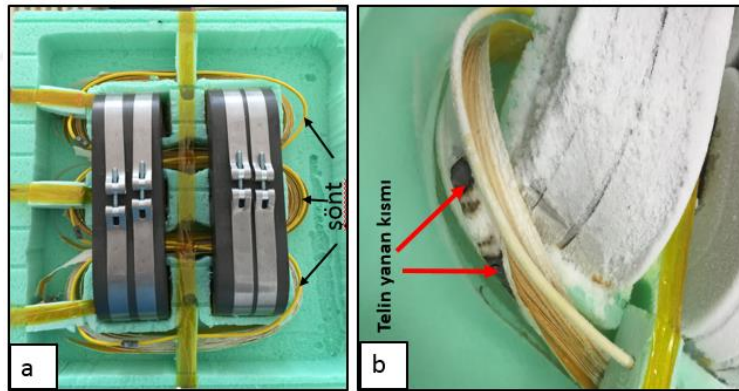
Sistem yüksüz durumda iken V_{1P} pik değeri 210 V'dur (Şekil 4.60). İkincil taraftaki bobin yaklaşık 0,4 s kısa devre edilmiştir. Kısa devre durumundan önce I_{2S} değeri sıfır iken, kısa devre durumundan hemen sonra 72 A olmaktadır ve neredeyse üç periyot sonra değeri 51 A değerinde sabitlenmektedir. Kısa devre durumunda süperiletken halka normal duruma geçtiği için ikincil tarafa manyetik akı transferi yapılamamaktadır. Bu sebepten dolayı, kısa devre edilen taraftaki voltaj değeri neredeyse sıfır olmaktadır. I_{1S} değeri kısa devre durumunda aniden yükselmiş fakat kısa devre durumundan sonra sıfır olmuştur. Yapılan bu deneyde birincil ve ikincil taraflarda yük olmadığı için kısa devre durumunda önce akım değerleri gözlenmemiştir.



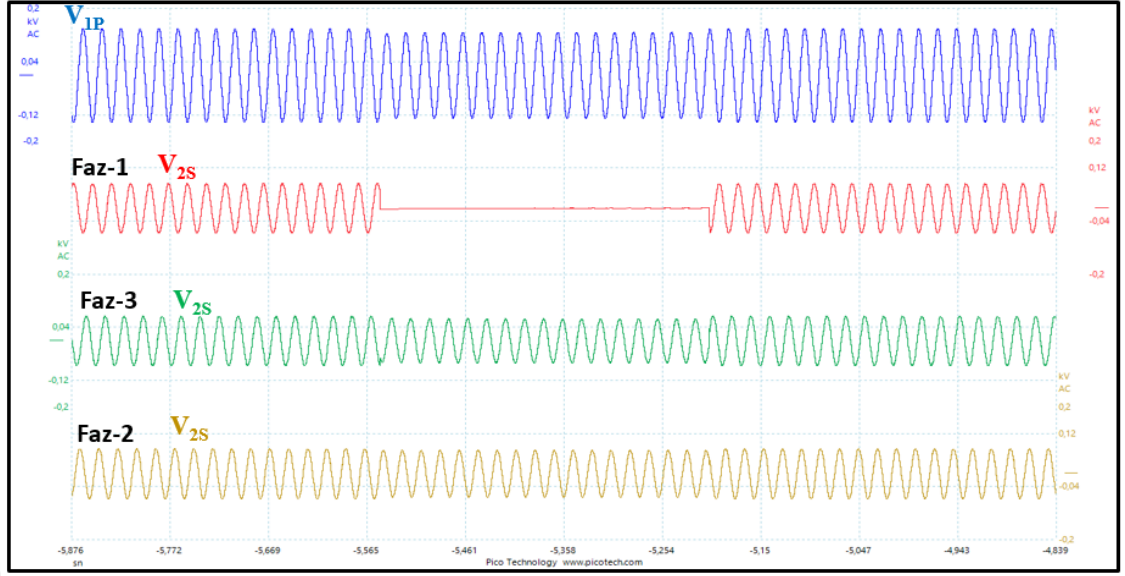
Şekil 4.61 3- fazlı 28 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüklü sisteme ait akım değerleri

Şekil 4.61 yüklü sisteme ait akım değerleri kısa devre öncesi, kısa devre anı ve sonrası durumları verilmiştir. V_{1P} etkin değeri 110 V iken, ikincil taraftaki ikincil bobinin her bir fazına ait akım değerleri neredeyse aynıdır. Bunun sebebi sarım sayılarının aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Faz- 3'deki ikincil bobine kısa devre yapıldığından Faz-3'deki akım değeri diğer fazlara oranla daha yüksek olmaktadır. Kısa devre öncesi Faz-3' deki ikincil bobine ait akımın maksimum değeri yaklaşık 8 A iken, kısa devre durumunda 24,6 A yükselmektedir.

3- fazlı 6 kVA'lık SHAS için ikinci olarak kritik akım değeri 254 A olan SF12050 süperiletken teli 14 sarım yapılarak her bir faz için üçer adet halka oluşturulmuştur. Süperiletken telin bir tarafı kapton bant diğer tarafı kağıt peçete ile kaplanarak yalıtımı sağlanmıştır (Şekil 4.62). Süperiletken telin üst kısmına şönt bağlanarak akımın bölünmesi sağlanmıştır. Aynı sarım sayısında ve SF12050 süperiletken teli kullanılarak yapılan deneyler esnasında süperiletken telden çok fazla akım geçtiği için yanmıştır. Ancak şönt bağlandıktan sonra bu sisteme ait ölçümler alınabilmektedir.



Şekil 4.62 3- fazlı 14 sarımlı sistemin fotoğrafı, b. Telin yanmış hali



Şekil 4.63 3- fazlı 14 sarımlı tel kullanılarak yapılan yüksüz sisteme ait voltaj değerleri

Şekil 4.63’de ikincil taraftaki ikincil bobin yaklaşık 0,3 saniye kadar kısa devre edilmiştir. Kısa devre öncesi V_{1P} pik değeri 130 V iken her bir faza ait V_{2S} değerleri birbiriyle aynı olup 75 V’dur. Kısa devre durumunda kısa devre edilen bobinin voltaj değeri yaklaşık olarak sıfır olurken diğer iki faza ait voltaj değerleri 72 V olmaktadır. Bu grafik bize bir faz kısa devre yapıldığında diğer iki fazdan voltaj değeri okuyabileceğimizi göstermektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında aynı kesit alanına sahip iki tane birbirinden bağımsız demir nüve kullanılarak 2,5 kVA tek fazlı trafo, farklı kesit alanlarında iki tane demir nüve kullanılarak yapılan 2,5 kVA tek fazlı trafo ve 3-fazlı 6 kVA'lık trafo laboratuvarımızda yapılmış, 50 Hz frekansta ve sıvı azot sıcaklığında ölçümler alınmıştır. Yapılan SHAS çeşitleri diğer süperiletken trafolar ile kıyaslandığı her üç SHAS çeşidinde de kullanılan süperiletkeni soğutmak için tamamen sıvı azot içerisine daldırmak gerekmediğinden daha az sıvı azot kullanılmıştır. Sadece demir nüveleri birbirine manyetik akı transfer metoduyla bağlamak için süperiletken halka kullanıldığından daha az süperiletkene ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan bütün deneyler esnasında karşılaşılan en büyük problem soğutma problemi olmuştur. Süperiletken halka soğutma kabına düzgün bir şekilde yerleştirilemediği için soğutma kabının dışarısına çıkarak yanmış veya sıvı azot halka içerisine tam nüfuz edemediği için düzgün bir şekilde soğutulamamış ve bunun sonucu olarak yanmalar ve kopmalar oluşmuştur.

Simülasyon çalışmalarında COMSOL MP programı kullanılmıştır. Demir nüvelerin arasında süperiletken halka yokken, ikincil tarafa manyetik akı transferinin gerçekleşmediği görülmüştür. Fakat orta kısımda süperiletken halka varken manyetik akı transferinin ikincil tarafa süperiletken aracılığıyla % 100 iletildiği yapılan simülasyon çalışmalarıyla gösterilmiştir.

Deneyler için yapılan ön hazırlık aşamasında YBCO telin indüktans değerleri ölçülmüştür. Telin yarıçapı ve sarım sayısı arttırıldığı zaman indüktans değerinin de arttığı alınan ölçüm sonuçlarından görülmektedir. Halkada şok geçiş olduğu zaman ortaya çıkan enerji miktarı halkanın indüktans değeriyle doğru orantılıdır. Halkadaki sarım sayısı ne kadar artarsa şok geçiş olduğu zamanda ortaya çıkan enerji miktarında da o oranda artış olmaktadır.

2,5 kVA tek fazlı trafoda kullanılan bobinler için sarım sayıları birincil taraftaki birincil bobin için 115 iken, ikincil taraftaki ikincil bobin için 125 yapılmıştır. Bu durumun sebebi ikincil taraftaki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda

birincil ve ikincil taraftaki voltaj değerlerinin neredeyse aynı olduğu gözlenmiştir. Bu durum bize manyetik akı transferinin başarılı bir şekilde iletiliğini göstermiştir. İkincil taraftaki ikincil bobine kısa devre yapıldığında süperiletken halka süperiletken durumdan çıkarak dirençli duruma dönüşmektedir ve V_{2S} değeri neredeyse sıfır olduğu belirlenmiştir. Kısa devre durumunda birincil ve ikincil taraf arasındaki bağlantı kopmaktadır.

Yapılan 2,5 kVA tek fazlı trafoda kullanılmak üzere hazırlanan konstantan tel, bakır halka ve YBCO şerit için alınan grafiklerin kıyaslaması yapılmıştır. Bu grafikler incelendiğinde bakır halka ve konstantan halka ile alınan ölçüm sonuçlarında V_{1P} ve V_{2S} arasında fark olduğu gözlemlenmiştir. Fakat süperiletken halka ile alınan ölçüm sonuçları ve grafikler incelendiği zaman V_{1P} ve V_{2S} değerlerinin aynı olduğu gözlenmiştir. SHAS yapımında süperiletken halka kullanıldığı zaman manyetik akı transferinin kayıpsız bir şekilde ikincil tarafa aktarıldığı belirlenmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılmak üzere hazırlanan süperiletken halkalar ortadan ikiye kesilerek ve ortadan ikiye kesilmeden olmak üzere iki şekilde hazırlanmıştır. Ortadan ikiye kesilerek hazırlanan halkalarda kesilme esnasında telde zayıf noktalar oluşturulduğu için daha çabuk yanmıştır. Deneylerin birçoğu ortadan ikiye kesilmeden yapılan halkalar oluşturularak yapılmıştır.

Bir diğer çalışmada 2,5 kVA tek fazlı kendi kendini sınırlayan trafoda kullanılan süperiletken halkaya kontrol edilebilir ekstra DA verilmiştir. Buradaki amaç, YBCO halkanın süperiletken durumdan çıkarak normal duruma dönüşmesini kolaylaştırmaktır. Yapılan deneylerde DA uygulama esnasında V_{1P} değerinde hiç bir değişim gözlenmezken V_{2S} değerinde düşme gözlenmektedir. Birincil ve ikincil akım değerinde DA uygulama esnasında düşme gözlenmektedir. Bu sisteme ait grafikler incelendiği zaman YBCO halkaya verilen DA sürelerinde değişim oldukça V_{2S} değerlerinde de değişimler olmuştur. YBCO halkaya verilen DA süresi uzadıkça V_{2S} değerinin daha çok düştüğü gözlenmiştir.

Farklı kesit alanına sahip demir nüveler kullanılarak yapılan SHAS'a ait voltaj düşümü ölçümleri aynı kesit alanına sahip demir nüveler kullanılarak yapılan sistemle kıyaslarsak birincil taraftaki voltaj düşümlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'da yapılan diğer SHAS'larda olduğu gibi manyetik akı transferinin başarıyla gerçekleştiği görülmüştür. Fazlardan herhangi birine kısa devre yapıldığı zaman diğer fazların çalıştığı yapılan deneylerde gözlenmiştir.

3-fazlı 6 kVA sisteme ait birincil taraftaki voltaj düşümü (ϵ) 2,68 ve birincil tarafın karşılayabileceği maksimum hatalı akım değeri 357,96 A olduğu deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır. İkincil taraftaki drop ölçümü (ϵ) % 37,1 ve ikincil taraf için maksimum hatalı akım değeri 25,72 A belirlenmiştir.

Yapılan her üç sistemde manyetik akı transferi başarı bir şekilde gerçekleştirilmiştir ve birbirinden bağımsız iki tane demir nüve birbirine süperiletken halka yardımıyla birbirine bağlanmıştır.

Bu çalışmaların bir sonraki adımı soğutma sistemi iyileştirerek şehir şebekelerinde kullanabilecek bir sistem tasarlamaktır.

KAYNAKLAR

- Akimitsu, J., Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Murakana, T. and Yuji, Z. 2001. Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride. *Nature* 410, 63 – 64.
- Anonymous. 2016a Web Sitesi: https://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/Documentsand Media/hts_fcl_110609.pdf, Erişim Tarihi: 13.08.2016.
- Anonymous. 2016b. Web Sitesi: <http://www.amsc.com/products/amperiumwire/>, Erişim Tarihi:13.08.2016.
- Anonymous. 2016c. Web Sitesi: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>, Erişim Tarihi: 20.08.2016.
- Anonymous. 2016d. http://www.nexans.de/eservice/Germany-en/navigate_299959/Superconductor_Technology.html. Tarihi:22.08.2016.
- Anonim. 2017. Yıllar itibariyle Elektrik Tüketimi, Web Sitesi: <http://www.enerjiatlası.com/elektrik-tuketimi/>, Erişim Tarihi: 18.01.2017.
- Bardeen, J., Cooper, L. N and Schrieffer, J. R. 1957. Theory of Superconductivity, *Phys. Rev.* ,108, 5,1175-1204.
- Bean C.P. Magnetization of High-Field Superconductors. *Reviews of Modern Physics*, 36:31–39, 1964.
- Öğüt, B. 2002. Kojenerasyon santrallerinde Koruma. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 83, İstanbul.
- Bilgeç, G. 2004. Sb2O3 katkılı YBCO süperiletken seramiklerin karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 98, İzmir.
- Bock, J., Hobl, A., Kramer, S., Bludau, M., Schramm, J. and Janke, C. 2011. Nexan's superconducting fault current limiter for medium voltage applications estatusand prospects. In proceedings of the 21st international conference on electricity distribution (CIRED 2011). Frankfurt, Germany (Paper 0352).
- Çakal, G. 2012. Dağıtılmış Üretime Sahip Elektrik Dağıtım Sistemlerinde, Arıza Akımı Sınırlayıcıların ve Yerleşim Yerlerinin Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 89, İstanbul.
- Çelik, Ş. 2006. $Y_{1-x}Yb_x/2Gdx/2)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ve $(Yb_{1-x}Gdx)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ süperiletkenlerinin yapısal ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 146, Trabzon.

- Dallessandro R B, M Bocchi, V Rossi, L F Martini. 2007. Test Results on 500 kVA-Class MgB₂-Based Fault Current Limiter Prototypes, IEEE Trans. Appl. Superc., 17(2), 1776.
- Dallessandro, B., Bocchi, M., Rossi, V. and Martini, L. F. 2007. Test results on 500 kVA-class MgB₂- based fault current limiter prototypes, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 17, 1776-1779.
- Dutta, S. 2014. Modelling and analysis of resistive Superconducting Fault Current Limiter. Master Thesis, National Institute of Technology Rourkela, Department of Mechanical Engineering, 32, India.
- Eckroad, S. 2011. Superconducting Power Equipment, Electric Power Research Institute (EPRI), 1021890.
- Elschner, S., Breuer, F., Noe, M., Rettelbach, T., Walter, H. and Bock, J. 2002. Manufacturing and testing of MCP2212 bifilar coils for 10 MVA fault current limiter, IEEE Trans. Appl. Supercond., 13, 1980.
- Elschner, S., Breuer, F., Walter, H. and Bock, J. 2006. Magnetic Field Assisted Quench Propagation as a New Concept for Resistive Current Limiting Devices, Journal of Physics: Conference Series 43, 917–920.
- Ertekin, E. 2016. Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı (SHAS) Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 116, Ankara.
- Fischer, S., Povh D., Schmitt, H. Superconducting fault current limiters - Getting a grip to short-circuit currents. CIRED: 15th Int. Conf. Exhibition on Electricity Distribution Nice France 1999.
- Gecer, S., Ertekin, E., Yanmaz, E., Kosa, J., Safran, S., Özgüzel, R., Kilicarslan, E.S., Kilic, A. and Gencer, A. 2016. Switching and Decoupling Effects in a Single-Phase Transformer Using Extra DC Current. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26(3), 5500504- 5500504.
- Gencer, A., Kılıc, A., Yetiş, H., Akdoğan M., Safran, S. 2016. Hatalı Akım Sınırlayıcı İçin Uygun Nano-Yapılı Süperiletken Külçe MgB₂ Ve Eriyik Y-Ba-Cu-O Halka Numunelerin Yüksek Basınç Ve Sıcaklık Altında Üretimi; Manyetik Ve Mekanik Karakterizasyonu. TÜBİTAK Proje No: 113F205; Ankara.
- Ginzburg, V.L. and Andryushin, E.A. 2004. Superconductivity, World Scientific Publishing Co., Pte. Ltd. Singapore.
- Ginsberg, D. M. 1994. Physical properties of high temperature superconductors IV, World Scientific, 509, Singapore.

- González, J. C. 2005. Coated Conductors and Chemical Solution Growth of YBCO Films: A Micro-Raman Spectroscopy Study. Doctora thesis, Departament de Materials Magnètics i Superconductors, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, 150, Spain.
- Goodhand, C. 2013. 33 kV superconducting fault current limiter. Interim Closedown Report, CET 1001/LNCF-T1-001.
- Grid, A. 2011. Network Protection and Automation Guide. Alstom Grid, 508, France.
- Gromoll, B., Ries, G., Schmidt, W., Kraemer, H. P., Seebacher, B., Utz, B., Nies, R., Neumueller, H. W., Baltzer, E., Fischer, S. and Heismann, B. 1999. Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films 100kVA Functional Model, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 9, 656-659.
- Hassenzahl, W., and Tsukamoto, O. 2011. Electric power application of superconductivity, In: H. Rogalla and P. H. Kes (Eds.), 100 years of superconductivity, 769-797, Taylor and Francis Group, New York.
- Hobl, A., Elschner, S., Bock, J., Kramer, S., Janke, C., and Schramm, J. 2012. Superconducting fault current limiters: a new tool for the “grid of the future” (4 pp.). In CIRED 2012 workshop: Integration of renewables into the distribution grid (p. 0296).
- Hull J.R., Murakami M. 2004. Application of bulk high-temperature superconductors, // Proceedings of the IEEE. V.92, No10. – P. 1705-1718.
- Hyun, O. B., Kim, H. R., Sim, J., Yung, Y. H., Park, K. B., Kang, J.S., Lee, B. W., Oh, I. S. 2005. 6.6 kV resistive superconducting fault current limiter based on YBCO films, IEEE Trans. Appl. Supercond. 15, 2027–2030.
- Inoue, Y., Kurahashi, H., Fukumoto, Y. and Shimada, M.. 1995. Critical current density and n-value of NbTi wires at low field, IEEE Trans. Appl. Supercond., 5:1201–1204.
- Ito, D., Yoneda, E. S., Tsurunaga, K., Tada, T., Hara, T. and Ohkuma, T. 1992. 6.6 kV/1.5 kA class superconducting fault current limiter development, IEEE Transactions on Magnetism, 28, 438-441.
- Iwasa, Y. 1994. Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues, Plenum Press, 421, New York.
- Kamihara, Y., Watanabe, T., Hirano, M. and Hosono, H., 2008. Iron-Based Layered Superconductor La [O_{1-x}F_x]FeAs (x = 0.05-0.12) with T_c = 26 K, J. Am. Chem. Soc., 130, 11, 3296-3297.
- Kang B. W., Goyal, A., Lee, D. R., Mathis, J. E., Specht, E. D., Martin, P. M., Kroeger, D. M., Paranthaman, M. and Sathyamurthy S. 2002. Comparative study of thickness dependence of critical current density of YBa₂Cu₃O_{7-δ} on (100)

- SrTiO₃ and on rolling-assisted biaxially textured substrates, *J. Mater. Res.*, 17, 1750-1757.
- Kang, H., Lee, C., Nam, K., Yoon, Y. S., Chang, H. M., Ko, T. K. and Seok, B. Y. 2008. Development of a 13.2kV/630A (8.3MVA) High Temperature Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18, 628-631.
- Kinder, H. , Berberich, P. , Prusseit, W. , Rieder-Zecha, S. , Semerad, R. , Utz, B. 1997. YBCO film deposition on very large areas up to 20×20 cm², *Physica C*, 282–287, 107-110.
- Kittel, C. 1996. *Introduction to Solid State Physics*. 7th Edition, USA.
- Kraemer, H. P., Schmidt, W., Utz, B. and e. al. 2003. Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive fault current limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13(2), 2044–2047.
- Kreutz, R., Bock J., Breuer, F., Juengst, K. P., Kleimaier, M., Klein, H.-U., Krischel, D., Noe, M., Steingass, R. and Weck, K. H. 2005. System technology and test of curl 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-T_c superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. on Appl. Superconduct.*, 15, 1961-1964.
- Lee, B. W., Park, K. B., Sim, J., Oh, I. S., Lee, H. G., Kim, H. R. and Hyun, O. B. 2008. Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18, 624- 627.
- Lee, G. H., Park, K. B., Sim, J., Kim, Y. G., Oh, I. S., Hyun, O. B. and Lee B. W. 2009. Hybrid Superconducting Fault Current Limiter of the First Half Cycle Nonlimiting Type, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 1888-1891.
- Lei, F., Ruifeng, G., Wanrong, Z., and Xiaoping, Y. 2011. Type and characteristic analysis of fault current limiter, In *Proc. of first international conference on electric power equipment e switching technology (ICEPE-ST)*, Xi'an, China (pp. 356-361).
- Leung, E. M., Rodriguez, I., Albert, G. W., Burley, B., Dew, M., Gurrola, P., Madura, D., Miyata, G., Muehleman, K., Nguyen, L., Pidcoe, S., Ahmed S., Dishaw G., Nieto C., Kersenbaum I., Gamble B., Russo C., Boenig H., Peterson D., Motowildo L., and Haldar P.. 1997. High Temperature Superconducting Fault Current Limiter Development, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7, 985-988.
- Leung, E., Burley, B., Chitwood, N., Gurol, H., Miyata, G., Morris, D., Ngyuen, L., O'Hea, B., Paganini, D., Pidcoe, S., Haldar, P., Gardner, M., Peterson, D., Beonig, H., Cooley, J., Coulter, Y., Hults, W., Mielke, C., Roth, E., Smith, J., Ahmed, S., Rodriguez, A., Langhorn, A., Gruszczynski, M. and Hoehn, J. 2000. Design and Development of a 15kV, 20kA HTS Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 10, 832-835.

- Li, X., Rupich, M. W., Thieme, C. L. H., Teplitsky, M., Sathyamurthy, S., Thompson, E., Buczek, D., Schreiber, J., Moranville, K., Lynch, J., Inch J., Tucker, D., Savoy, R. and Fleshler S. 2009. The Development of Second Generation HTS Wire at American Superconductor, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19, 3231-3235.
- Lin Ye, M Majoros, A M Campbell, T Coombs, D Astill, S Harrison, M Husband, M Rindfleisch and M Tomsic. 2007. Experimental studies of the quench behaviour of MgB₂ superconducting wires for fault current limiter applications, Supercond. Sci. Technol., 20, 621-628.
- London, H. and London, F. 1935. The electromagnetic equations of the Superconductors. Proceeding of Royal Society. A149, 71.
- Louie J. Powell. 2001. IEEE 242-2001 Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, 2001. doi:10.1109/IEEESTD.93369.
- Majoros, M., Ye, L. and Campbell, AM. 2007. Modeling of transport AC losses in superconducting arrays carrying anti-parallel currents, IEEE TRANS. ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 17(2), 1803-1806.
- Malozemoff, A. P., Fleshler, S., Rupich, M., Thieme, C., Li, X. and Zhang, W. 2008. Progress in high temperature superconductor coated conductors and their applications, Superconductor Science and Technology, 21, 034005-034007.
- Malozemoff, A. P., Fleshler, S., Rupich, M., Thieme, C., Li, X., Zhang, W., Otto, A., Maguire, J., Folts, D., Yuan, J., Kraemer, H. P., Schmidt, W., Wohlfart, M. and Neumueller, H. W.. 2008. Progress in High Temperature Superconductor Coated Conductors and their Applications, Superconductor Science and Technology, 21, 1-7.
- Martini, L. 2016. Superconductivity for the fault current mitigation: the HTS Fault Current Limiter devices, ESAS Summer School 2016, Bologna, Italy.
- Meerovich, V., Sokolovsky, V., Jung, G., and Goren, S. 1995a. Inductive superconducting current limiter: state of art and prospects, In Institute of Physics Conference Series: Applied superconductivity, 148, 603-606.
- Meerovich, V., Sokolovsky, V., Jung, G., and Goren, S. 1995b. High-T_c superconducting inductive current limiter for 1 kV/25 A performance, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 5(6), 1044-1048.
- Meerovich V., Sokolovsky V. 2004. Superconducting Fault Current Limiters// "Advanced Studies on Superconducting Engineering", second edition Ed: I Vajda and L Farkas, Supertech Laboratory Budapest University of Technology and Economics.-P. 308-338.
- Meissner, W. and Ochsenfeld, R. 1933. Superconductivity. Naturwiss. 21.

- Morandi, A. 2013. State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system, *Physica C*, 484, 242-247.
- Moriconi, F., De La Rosa, F., Darmann, F., Nelson, A. and Masur L. 2011. Development and Deployment of Saturated-core Fault Current Limiters in Distribution and Transmission Substations, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21, 1288-1293.
- Moriconi, F., De La Rosa, F., Singh, A., Chen, B., Levitskaya, M., and A. Nelson. 2010. An Innovative Compact Saturable-core HTS Fault Current Limiter - Development, Testing and Application to Transmission Class Networks, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-8.
- Mukhopadhyay, S. C. 2014. A lecture on Current Limiter, School of Engineering and Advanced Technology Massey University.
- Mumford F., Usoskin A. 2009. Inductive and Resistive HTS Fault Current Limiters: Prototyping, Testing, Comparing, AREVA T and D Research and Technology Centre, Stafford, UK.
- Nagarathna M C, Prof. H. Vijay Murthy, Shashikumar R. A. 2015. Review on Super Conducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power System, *International Journal of Engineering Research and General Science* 3, Issue 2, Part 2.
- Neklepaev, B.N. 1978. Coordination and optimization of fault current level, in power systems (in Russian). Moscow: Energya.
- Noe, M and Steurer, M. 2007. High-temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status, *Superconductor Science and Technology*, 20, R15-R29.
- Noe, M. 2008. Superconducting Fault Current Limiters and Magnetic Levitation, *European Summer School on Superconductivity*, Prizztech Magnet Technology Centre, Finland.
- Noe, M. and Steurer M. 2007. High-temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status, *Superconductor Science and Technology*, 20, R15-R29.
- Oda, S., Noda, S., Nishioka, H., Mori, M., Baba, J., and Shirai, Y. 2011. Current limiting experiment of transformer type superconducting fault current limiter with rewind structure using BSCCO wire in small model power system, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21, 1307-1310.
- Onnes, H. K. 1911. Disappearance of The Electrical Resistance of Mercury of Helium Temperature, *Akad. Van Wetenschappen*, 14,113.
- Ootani, Y., Yazawa, T., Kurita, T., Nomura, S., Ohkuma, T., Hobara, N., Takahashi, Y., Inoue K. 2004. Cryostat for 66 kV/750 A high-T_c superconducting fault current limiter magnet, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 14, 855-858.

- Paasi J. and Korpela A. 1999. Influence of microcracks and anisotropic conductivity on critical current and exponent n in silver-sheathed HTS tapes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9:2215–2218.
- Paul, W., Chen, M., Lackner, M., Rhyner, J., Braun, D., Lanz, W. 2001. Fault current limiter based on high temperature superconductors: different concepts, test results, simulations, applications, *Physica C*, 354, 27-33.
- Paul, W., Lakner, M., Rhyner, J., Unternahrer, P., Baumann, Th. and Chen, M. 1997. Test of a 1.2 MVA high- T_c superconducting fault current limiter, *Institute of Physics Conference Series*, 158, 1173-1178.
- Paul, W., Lakner, M., Rhyner, J., Unternahrer, P., Baumann, Th. and Chen, M. 1997. Test of a 1.2 MVA high- T_c superconducting fault current limiter, *Institute of Physics Conference Series*, 158, 1173-1178.
- Pei, X. 2012. Superconducting Fault Current Limiter with Integrated Vacuum Interrupter. Doctora Thesis, The University of Manchester, the Faculty of Engineering and Physical Sciences, 243, United Kingdom.
- Poole, C. P. 2000. Handbook of superconductivity, Academic Press, 267, San Diego.
- Prikhna, T. A., Gawalek, W., Goldacker, W., Savchuk, Y. M., Noudem, J. and Soldatov, A. 2011. High-pressure synthesized nanostructural MgB₂ materials with high performance of superconductivity, suitable for fault current limitation and other applications, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21, 2694-2697.
- Prikhna, T.A., Gawalek, W., Savchuk, Ya.M., Sergienko, N.V., Moshchil, V.E., Sokolovsky V., Vajda, J., Tkach, V.N., Karau, F., Weber, H., Eisterer, M., Joulain, A., Rabier, J., Chaud, X., Wendt, M., Dellith, J., Danilenko, N.I., Habisreuther, T. S., Dub N., Meerovich, V., Litzkendorf, D., Nagorny, P.A., Kovalev, Schmidt, L.K. Ch., Melnikov, V.S., Shapovalov, A.P., Kozyrev, A.V., Sverdun, V.B., Kosa, J. and Vlasenko A.V. 2010. Nanostructural Superconducting Materials for Fault Current Limiters and Cryogenic Electrical Machines, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 117(1), 7-14.
- Rabbers, J. J., Haken, B. and Kate, H. H. J. 2004. Hysteresis loss and the voltage-current relation in BSCCO tape superconductors, *Physica C: Superconductivity and its applications*, 401:165–170.
- Raju, B. P., Parton, K. C., and Bartram, T. C. 1982. A current limiting device using superconducting D.C. bias: application and prospects, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, 3173-3177.
- Rose-Innes, A. C. and Rhoderick, E. H. 1994. Introduction to Superconductivity.
- Rowley, A. T. 1995. Superconducting fault current limiters. *The Institution of Electrical engineers*, IEE, 3-10.

- Rupich, M. W., Schoop U., Verebelyi, D. T., Thieme C. L. H., Buczek, D., Li, X., Zhang, W., Kodenkandath T., Huang, Y., Siegal, E. Carter, W., Nguyen, N., Schreiber, J., Prasova, M., Lynch, J., Tucker, D., Harnois, R., King, C. and Aized, D. 2007. The Development of Second Generation HTS Wire at American Superconductor, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 17, 3379-3382.
- Rupich, M. W., Schoop, U., Verebelyi, D. T., Thieme, C., Zhang, W., Li, X., Kodenkandath, T., Nguyen, N., Siegal, E. and Buczek, D. 2003. YBCO coated conductors by an MOD/RABiTS/spl trade/process. IEEE Trans. Appl. Supercond., 13: 2458–2461.
- Schmidt, H., Campman, K.L. 1997. Applied Physics Letters.
- Schmidt, W., Kraemer, H. P., Neumueller, H. W., Schoop, U., Verebelyi, D. and Malozemoff, A. P. 2007. Investigation of YBCO Coated Conductors for Fault Current Limiter Applications, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 17, 3471-3474.
- Schoop, U., Rupich, M. W., Thieme, C., Verebelyi, D. T., Zhang, W., Li, X., Kodenkandath, T., Nguyen, N., Siegal, E. and Civale, L. 2005. Second generation HTS wire based on RABiTS substrates and MOD YBCO, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15:2611–2616.
- Seeber, B. 1998. Handbook of Applied Superconductivity, Institute of Physics Publishing, 1992, Bristol and Philadelphia.
- Singh, R.K., L. Ganapati, P. Tiwar, J. Narayan. 1989. Pulsed laser deposition and characterization of high-Tc YBa₂Cu₃O_{7-x} superconducting thin films, Journal of Applied Physics Letter, 55:2351.
- Smith, A. C., Oliver, A., Pei, X., Husband, M., and Rindfleisch, M. 2012. Experimental testing and modelling of a resistive type superconducting fault current limiter using MgB₂ wire, Superconductor Science and Technology, 25, 125018.
- Sokolovsky V., Meerovich V., Vajda I. and Beilin V. 2004. Superconducting FCL: design and application. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, vol. 14, pp. 1990-2000.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Beilin, V., and Vajda, I. 2003. Application of an HTS thin film switching element in the inductive current limiter, Physica C, 386, 480-484.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Vajda, I., and Beilin, V. 2004. Superconducting FCL: design and application, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14, 1990-2000.

- Stenvall, A., Korpela, A., Lehtonen, J., and Mikkonen, R.. 2007. Two ways to model voltage-current curves of adiabatic MgB2 wires. *Supercond. Sci. Technol.*, 20:859–864.
- Tinkham, M. 1996. *Introduction to Superconductivity*. McGraw-Hill, Inc., 2nd Edition, United States of America.
- Tixador, P. 1995. Experimental results on an hybrid superconducting current limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 5, 1055-1058.
- Tixador, P. 2010. Development of superconducting power devices in Europe, *Physica C*, 470, 971-979.
- Ulbricht, A. 1979. Test results of resistive SC power switch for 40 MW switching power at a voltage of 47 kV, *IEEE Transactions on Magnetism*, 15, 172-175.
- Usoskin, A., Rutt, A., Withnell, T., Schlenga, K., Steurer, M. and Pamidi, S. 2011. Physical principles and applications of inductive HTS shielded fault current limiting devices with suppressed cryogenic losses, In 10th EPRI conf, TLH. Talk #2, BEST.
- Ürgüplü, Z. 2008. *Elektroteknik Bilgi Bankası. Bizim Büro Basımevi Yay. Dağ. Tic. Ltd.Şti. Sayfa: 211, 212, 214, Türkiye.*
- Verhaege T., Cottevieille, C., Estop, P., Quemener, M., Tavergnier, J. P., Bekhaled, M., Bencharab, C., Bonnet, P., Laumond, Y., Pham, V. D., Poumarède, C., Thérond, P. G. 1996. “Experiments with a high voltage (40 kV) superconducting fault current limiter”, *Cryogenics*, 36, 521-526.
- Verhaege, T., Tavergnier, J. P., Agnoux, C., Cottrevieille, C., Laumond, Y. and Bekhaled, M. 1993. Experimental 7.2 kVrms/1 kArms/3 kA peak current limiter system, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 3, 574-577.
- Vershinin, Y. N., Meerovich, V. M., Naumkin, I. E., Novikov, N. L., and Sokolovsky, V. L. 1989. A comparative analysis of nonlinear reactors with shields from low-temperature and high-temperature (about 90 K) superconductors, *Electric Technology USSR (UK)*, 1,1-9.
- Warnes, W. and Larbalestier, D. 1987. Determination of the average critical current from measurements of the extended resistive transition. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23:1183–1187.
- Wesche, R. 1998. *High-Temperature Superconductors: Materials, Properties and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts USA.
- Wilson, M. N. 1983. *Superconducting Magnets*, Clarendon Press, 352, Oxford.
- Wu, M. K., and Ashburn, J. R., 1987. *Phys. Rev. Letters*.

- Wu, X. D., Foltyn, S. R., Arendt P., Townsend, J., Campbell, I. H., Tiwari, P., Jia, Q. X., Willis, J. O., Maley, M. P., Coulter, J. Y. and Peterson, D. E.. 1995. Preparation of high quality YBa/sub 2/Cu/sub 3/O/sub 7-/spl delta// thick films on flexible Ni-based alloy substrates with textured buffer layers, IEEE Trans. Appl. Supercond., 5, 2001-2006.
- Xin, Y., Gong, W., Niu, X., Cao Z., Zhang, J., Tian, B., Xi, H., Wang, Y., Hong, H., Zhang, Y., Hou, B. and Yang, X.. 2007. Development of Saturated Iron Core HTS Fault Current Limiters, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 17, 1760-1763.
- Xin, Y., Gong, W., Niu, X., Cao, Z., Xi, H., Zhang, J., Wang, Y., Tian, B., and Hou, B. 2006. Development of Superconducting Fault Current Limiters, International Conference on Power System Technology, 1-5.
- Yazawa, T., Yoneda, E., Matsuzaki, J., Shimada, M., Kuriyama, T., Nomura, S., Ohkuma, T., Sato, Y., Takahashi, Y. 2001. Design and test results of 4.6 kV high-Tc superconducting fault current limiter, IEEE Trans. Appl. Supercond., 11, 2511-2514.
- Ye L, Majoros M, Campbell AM. and 2007. MgB2 sample tests for possible applications of superconducting fault current limiters, IEEE Trans Appl Supercond., 17(2), 2826-2829.
- Yılmaz, M. 2008. $Y_{0.6}Gd_{0.4}Ba_{2-x}Nb_xCu_3O_{7-\delta}$ ve $Y_{0.6}Gd_{0.4}Ba_2Cu_{3-x}Nb_xO_{7-\delta}$ süperiletkenlerinin yapısal ve süperiletkenlik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 178, Konya.
- Yim, S. W., Yu, S. D., Kim, H. R., Kim, M. J., Park, C. R., Yang, S. E., Kim, W. S., Hyun, O. B., Sim, J., Park, K. B. and Oh, I. S. 2010. Construction of Testing Facilities and Verifying Tests of a 22.9kV/630A Class Superconducting Fault Current Limiter, Physica C: Superconductivity, 470, 1611-1614.
- Yin, X., Gong, W., Niu, X., Gao, Y., Guo, Q., Xiao, L., Cao, Z., Hong, H., Wu, A., Li, Z., Hu, X., Tian, B., Zhang, J., He Y., Wang, Y., Cui, J., Ding, S., Wang, J., Ren, A. and Ye F. 2009. Manufacturing and Test of a 35kV/90MVA Saturated Iron-core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-grid Operation, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19, 1934-1937.
- Yuan, X., Tekletsadik, K., Kovalsky, L., Bock, J., Breuer, F. and Elschner, S. 2005. Proof-of-concept prototype test results of a superconducting fault current limiter for transmission-level applications - Applied Superconductivity, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 15, 1982-1985.
- Zhang, G. M., Schwartz, J., Sastry, P., Lin, L. Z., Xiao, L. Y., and Yu, Y. J.. 2004. The effects of bending strain on the critical current and AC loss of BSCCO/Ag tapes. Supercond. Sci. Technol., 17:1018–1021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sahure Geçer

Doğum Yeri : Kırıkkale

Doğum Tarihi : 04 Mart 1981

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kırıkkale Lisesi (1999)

Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü (2005)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
(Eylül 2008 – Eylül 2011)

Aldığı Burslar

Hatalı Akım Sınırlayıcı İçin Uygun Nano-Yapılı Süperiletken Külçe MgB₂ ve Eriyik Y-Ba-Cu-O Halka Numunelerin Yüksek Basınç Ve Sıcaklık Altında Üretimi; Manyetik Ve Mekanik Karakterizasyonu (Şubat 2014-Ekim 2014)

TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Burs Programı (Kasım 2014-Mayıs 2017)

Yayınlar (SCI)

Gecer, S., Ertekin, E., Yanmaz, E., Kosa, J., Safran, S., Özgüzel, R., Kilicarslan, E.S., Kilic, A. and Gencer, A. 2016. Switching and Decoupling Effects in a Single-Phase Transformer Using Extra DC Current. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26(3), Article number 7422687.

Ertekin, E., **Gecer, S.**, Yanmaz, E., Safran, S., Kosa, J., Kilicarslan, E.S., Kilic, A., Amemiya, N. and Gencer, A. 2016. Test of 6-kVA Three-Phase Flux Transfer-Type Current-Limiting Transformer, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, DOI: 10.1007/s10948-016-3623-y.