

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

**SÜPERİLETKEN DAĞITIM ŞEBEKESİ
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ: KOCAELİ
RABAK FİDER UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kevser GÖK

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Türker Fedai ÇAVUŞ

Ocak 2020

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜPERİLETKEN DAĞITIM ŞEBEKESİ
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ: KOCAELİ
RABAK FİDER UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kevser GÖK

Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 15.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



**Prof. Dr.
Ali Fuat BOZ
Jüri Başkanı**



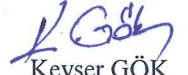
**Doç. Dr.
Cenk YAVUZ
Üye**



**Dr. Öğr. Üyesi
Türker Fedai ÇAVUŞ
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.


Kevser GÖK

20.12.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Türker Fedai ÇAVUŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam boyunca her konuda destekçim olan aileme, eşim Orhan GÖK'e ve oğlum Yiğit Gökay GÖK'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
ELEKTRİK ÜRETİM, İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMİ	3
2.1. Elektrik Üretim, İletim ve Dağıtım Sisteminin Genel Yapısı.....	3
2.2. Elektrik Dağıtım Sistemi	4
2.2.1. Açık şebeke	5
2.2.2. Kapalı şebeke	5
2.2.2.1. Ring şebeke	6
2.2.2.2. Ağ şebeke	6
2.3. Enerji Kalitesi, Kayıplar ve Alınabilecek Önlemler	7
2.3.1. Kayıplar	7
2.3.1.1. Şebeke kayıplarının azaltılması	9
2.3.2. Enerji kalitesi	10

BÖLÜM 3.

KISA DEVRE ANALİZİ	13
3.1. Kısa Devre Akımı.....	13
3.2. Kısa Devre Akım Kaynakları ve Dalga Şekilleri	15
3.2.1. Kısa devrenin olduğu yerin jeneratöre göre durumu	16
3.3. Kısa Devre Çeşitleri	18

BÖLÜM 4.

SÜPERİLETKENLER	20
4.1. Süperiletkenlik	20
4.2. Süperiletkenliğin Tarihçesi	21
4.3. Süperiletkenlik Parametreleri	22
4.3.1. Kritik sıcaklık (T_c)	22
4.3.2. Kritik manyetik alan (H_c)	23
4.3.3. Kritik akım yoğunluğu (J_c)	24
4.4. I. ve II. Tip Süperiletkenler	25
4.4.1. I. tip süperiletkenler	25
4.4.2. II. tip süperiletkenler	26
4.5. Süperiletkenler ile İlgili Literatür Araştırması	27
4.5.1. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri	27
4.5.2. Süperiletken arıza akım sınırlayıcıları	30
4.5.3. Güç iletim ve dağıtım sistemlerinde süperiletken uygulamalar	36
4.5.4. Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemi	47
4.5.5. HTS kablo projeleri	50

BÖLÜM 5.

UYGULAMA VE SONUÇLAR	54
5.1. DigSilent Power Factory Programı	54
5.2. DigSilent Programının Temel Özellikleri	54
5.3. DigSilent Programında Çalışmanın Gerçekleştirilmesi	55
5.4. Rabak Fideri Modellemesi ve Analizi	55

5.4.1. Rabak fideri tek hat şeması	55
5.4.2. Rabak fideri verileri	57
5.5. Analiz Sonuçları	59
5.5.1. Kısa devre analizi sonuçları	67
5.6. Çalışma İle İlgili Sonuçlar ve Yorumlar	69
5.7. Tartışma ve Öneriler	72
 KAYNAKLAR	 75
ÖZGEÇMİŞ	80



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Amper
Al	: Alüminyum
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
Hg	: Cıva
HTS	: Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisliği Enstitüsü
J_c	: Kritik Akım Yoğunluğu
K	: Kelvin
LTS	: Düşük Sıcaklık Süperiletkeni
SFCL	: Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcı
StatCom	: Reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan converter tabanlı FACTS cihazlarından biri
T_c	: Kritik Sıcaklık
VDE 102	: Almanya’da bilgi teknolojileri, elektrik, elektronik ile ilgili ürünler için oluşturulmuş standart

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektrik enerjisinin tüketiciye ulaştırılması	3
Şekil 2.2. Açık (radyal) şebeke	5
Şekil 2.3. Ring şebeke	6
Şekil 2.4. Ağ (gözlü) şebeke	7
Şekil 2.5. Elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemi	11
Şekil 2.6. Elektrik enerji kalitesinde bozulmaya sebep olan bazı durumlar	11
Şekil 3.1. Jeneratörden uzak kısa devre akımı dalga şekli	16
Şekil 3.2. Jeneratöre yakın kısa devre akımı dalga şekli	17
Şekil 3.3. Kısa devre çeşitleri	18
Şekil 4.1. Süperiletkenlik deneyi	20
Şekil 4.2. Cıvanın sıcaklık–direnç eğrisi	21
Şekil 4.3. Normal iletken ile süperiletken malzemenin elektrik direnci–sıcaklık ilişkisi	22
Şekil 4.4. Meissner etkisi	23
Şekil 4.5. Meissner etkisinin özeti	24
Şekil 4.6. Bir süperiletkenin sıcaklık, manyetik alan ve akım yoğunluğu arasındaki ilişkisi	25
Şekil 4.7. I. ve II. tip süperiletkenlerin kritik sıcaklık ve kritik manyetik alan altındaki davranışları	26
Şekil 4.8. Manyetik alan artışına I. ve II. tip süperiletkenlerin tepkisi	27
Şekil 4.9. Enerji sistemlerinde süperiletken uygulaması	36
Şekil 4.10. SMES sistemi	48

Şekil 5.1. Rabak tek hat şeması	56
Şekil 5.2. Başlangıç kısa devre gücü grafiği	68
Şekil 5.3. Başlangıç kısa devre akımı grafiği	68
Şekil 5.4. Maksimum kısa devre akımı grafiği	68
Şekil 5.5. Hattın yüklenme grafiği	70
Şekil 5.6. Voltaj grafiği	71
Şekil 5.7. Güç kaybı grafiği	71



TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Süperiletken kablo parametreleri	55
Tablo 5.2. Transformatör verileri	57
Tablo 5.3. Rabak yük verileri	57
Tablo 5.4. Rabak hat verileri	58
Tablo 5.5. Normal şebekede hatlara ait analiz sonuçları	59
Tablo 5.6. Durum II'deki hatlara ait analiz sonuçları.....	60
Tablo 5.7. Durum III'deki hatlara ait analiz sonuçları.....	61
Tablo 5.8. Normal şebeke için gerilim tespiti	62
Tablo 5.9. Durum II için gerilim tespiti	63
Tablo 5.10. Durum III için gerilim tespiti	63
Tablo 5.11. Normal şebeke ile durum II'ye ait şebekelerde meydana gelen kayıplar	64
Tablo 5.12. Normal şebeke ile durum III'e ait şebekelerde meydana gelen kayıplar	66
Tablo 5.13. Kısa devre analizi sonuçları	67

ÖZET

Anahtar kelimeler: Elektrik dağıtım, gerilim düşümü, kayıplar, kısa devre analizi, süperiletkenler, DigSilent Power Factory

Elektrik enerjisi, üretildiğinden itibaren son kullanıcıya ulaştırılana kadar birçok farklı aşamadan geçmektedir. Bu aşamalar da elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtım süreçlerinde enerji kayıplarını meydana getirmektedir. Bir elektrik şebeke sisteminin verimli, ekonomik, güvenilir ve sürekli halde işletilebilmesi için elektrik kayıplarının minimum düzeye indirgenmesi, enerjinin kalitesini bozan tüm parametrelerin düzeltilmesine ilişkin çözüm yollarının bulunması gerekmektedir.

Bu çalışmada bir orta gerilim dağıtım şebekesine ait fiderin bilgisayar ortamında modellenmesi yapılmış ve bu sisteme ait tüm parametrelerin analizleri elde edilmiştir. Modelleme ve analiz işlemleri DigSilent Power Factory olarak bilinen, güç sistem analizleri yapılabilen bir program aracılığıyla yapılmıştır.

Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada DigSilent programında İzmit Trafo Merkezinin Rabak Fideri modellenmesi yapılmış ve bu fidere ait bazı analizler yapılmıştır.

İkinci aşamada Rabak Fideri'nde bulunan yeraltı tüm Alüminyum iletkenleri süperiletkenlerle değiştirilerek tekrar DigSilent Power Factory programında modelleme yapılmış ve yine bu modele ait analizler yapılmıştır.

Son olarak üçüncü aşamada ise Rabak Fideri süperiletkenlerle yeniden tasarlanmıştır. Yeni tasarıma ait analizler yapılmıştır.

Tüm bu analizler sonucunda modellere ait tüm parametreler incelenmiş ve diğer iki aşamadaki model parametreleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda süperiletken kullanıldığında sistemin verimliliğinin arttığı, gerilim düşümünün ve kayıpların azaldığı gözlemlenmiştir.

INVESTIGATION OF SUPERCONDUCTOR DISTRIBUTION NETWORK PARAMETERS: KOCAELI RABAK FEEDER APPLICATION

SUMMARY

Keywords: Electrical distribution, voltage sag, losses, short circuit analysis, superconductors, DigSilent Power Factory

Electrical energy passes through many different stages from its production until it is delivered to the end user. These stages also cause energy losses in the transmission and distribution processes of electrical energy. In order to operate an electrical network system efficiently, economically, reliably and continuously, it is necessary to minimize the electricity losses and to find solutions for the correction of all the parameters that disrupt the quality of the energy.

In this study, a medium voltage distribution network was modeled in the computer program and all the parameters of this system were analyzed. Modeling and analysis operations were carried out through a program known as DigSilent Power Factory, which can be perform power system analysis.

The study consists of three stages. In the first stage, the modelling of Rabak Feeder of İzmit Substation was modeled in DigSilent program and some analyzes of this feeder were made.

In the second stage, all of the underground aluminium conductors in Rabak Feeder were replaced with superconductors, and the modeling was performed again in DigSilent Power Factory program and analyzes of this model were performed.

Finally, in the third stage, Rabak Feeder has been redesigned with superconductors. The analysis of the new design was made.

As a result of all these analyzes, all parameters of the models were examined and comparisons were made with the model parameters in the other two stages. As a result of the comparisons, it has been observed that the efficiency of the system increases, voltage sags and losses are reduced when superconductor is used.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç aşamadan geçerek tüketiciye ulaştırılmaktadır. Enerji üreten santraller tüketim merkezlerinden çok uzağa kurulmaları sebebiyle, üretilen elektrik enerjisi yüksek gerilim hatlarıyla yerleşim birimlerine ya da sanayi bölgelerinin yakınlarına kadar iletilmekte ve sonrasında trafo merkezlerinde gerilim seviyelerinin talebe uygun olarak ayarlaması yapılarak dağıtımı gerçekleştirilmektedir. Enerjinin üretilmesinin yanında, üretilen enerjinin mümkün olduğu kadar kayıpsız ve güvenilir şekilde aktarılması, iletim ve dağıtım aşamalarındaki en önemli süreçtir. Son zamanlarda başta dağıtım sistemleri olmak üzere, iletim ve dağıtım sistemlerindeki hat kayıplarının en aza indirilmesi, üretilen enerjinin verimli şekilde işletilebilmesi, kısacası tüm gerilim seviyelerindeki enerji kalitesi iyileştirme çalışmaları bütün dünyada olduğu gibi Türkiye’de büyük önem kazanmıştır.

Günümüz şartlarında elektrik enerjisi insanoğlunun ana ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir. Bu sebeple farklı kaynaklardan elektrik enerjisi elde edilmiş ve en az kayıpla kullanıcıya ulaştırılmaya çalışılmıştır. Elektrik enerjisinin üretim merkezinden tüketiciye ulaştırılması aşamasında en önemli noktalardan biri elektrik enerjisinin mümkün olabilecek en az kayıpla iletilmesi, diğer bir husus da elektrik enerjisinin en kaliteli şekilde kullanıcılara iletilmesidir. Bu sebeplerden dolayı enerji kalitesi kavramı ortaya çıkmaktadır. Enerji kalitesi kavramı, elektrik enerjisinin sürekliliği, akım ve gerilim eğrilerinin sinüs dalgasına yakınlığı, frekansın sabit kalması gibi durumları kapsamaktadır. Bir ülkedeki elektrik enerji kalitesi kavramının mükemmele yakınlığı o ülke için gelişmişlik düzeyinin o kadar yüksek olması şeklinde düşünülebilir [1].

Tüm bu sebeplerden dolayı yıllardır kayıpsız enerji iletimi konusunda birçok çalışma yapılmıştır ve günümüzde de bu çalışmalar hızla devam etmektedir. Kayıpsız enerji iletimi konusunda belki de en önemli çalışma süperiletkenlerin keşfidir. Süperiletkenlik kavramı herhangi bir iletkenin elektrik direncinin belirli koşullarda (kritik sıcaklık ve kritik manyetik alan) sıfır olmasıdır. İlk kez 1911 yılında Hollandalı Fizikçi Heike Kamerlingh Onnes yaptığı bilimsel çalışma esnasında (4,1 K) cıvanın belirli şartlarda süperiletkenlik özelliği gösterdiğini keşfetmiştir. 4,1 K sıcaklığına soğutulan cıva tüm elektriksel direncini kaybetmiştir. Daha sonraki yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar birçok elementin ve çok fazla alaşımın da birbirlerinden farklı kritik sıcaklık ve manyetik alanda süperiletken özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Her geçen gün de bu maddelere yenileri eklenmektedir. Günümüzde halen normal şartlar altında süperiletken özellik gösteren madde bulunamasa da bazı özel şartlar oluşturularak süperiletkenlerin eşsiz özelliğinden faydalanılmaktadır. Süperiletkenlik kavramı enerji tasarrufu, enerji kalitesi ve kayıpsız enerji iletimi adına devrim niteliğinde imkanlar sunmaktadır.

Yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin (HTS) keşfi, süperiletkenlerin elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemlerine uygulanması konusundaki birçok çalışmayı da beraberinde getirmiştir. Çalışmalar da süperiletkenlerin iletim ve dağıtım şebekesinde kullanılmasıyla birçok avantaj ve kolaylık sağlamıştır.

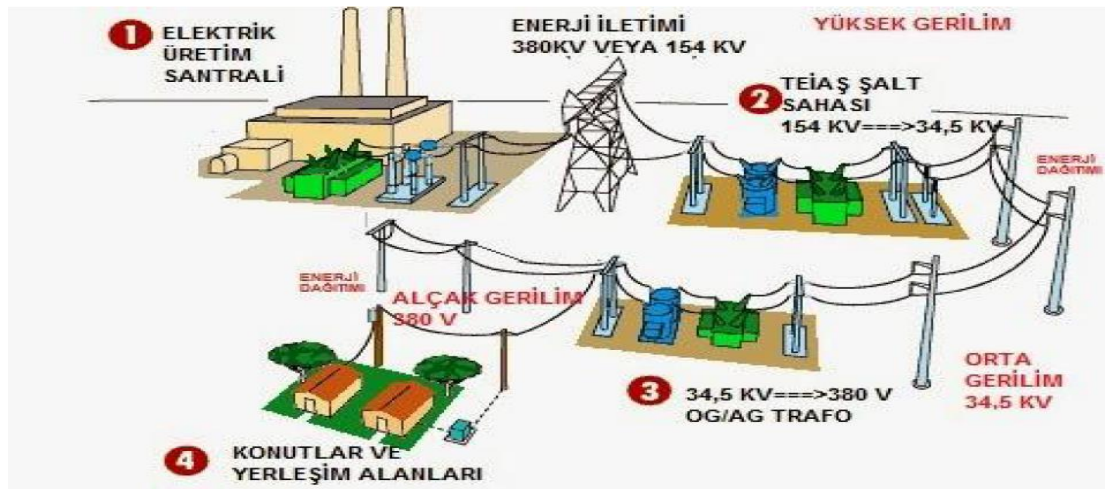
Bu çalışmada, kısaca süperiletkenlerin bir dağıtım sistemine dahil edilmesi neticesinde sistem parametrelerinin değişimleri incelenmiştir. Çalışmada Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş.'ne bağlı İzmit TM'nin Rabak Fideri ele alınmış olup, DigSilent Power Factory programında bu dağıtım şebekesinin tasarımı yapılmıştır. Program yardımıyla akım-gerilim değerleri, kısa devre akımları ve yüklenme yüzdeleri analiz edilmiştir. Daha sonra süperiletken aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada da yine bir önceki aşamada olduğu gibi DigSilent Power Factory programı yardımıyla analizler yapılmış, veriler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin karşılaştırması yapılmış, yorumlar ve öneriler sunulularak çalışma tamamlanmıştır.

BÖLÜM 2. ELEKTRİK ÜRETİM, İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMİ

2.1. Elektrik Üretim, İletim ve Dağıtım Sisteminin Genel Yapısı

Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç aşamadan geçerek tüketiciye ulaştırılmaktadır. Elektrik enerjisinin üretildiği santraller tüketicilerin bulunduğu bölgelerin yakınına kurulamamaktadır. Bu sebeple bir üretim santralinde üretilen elektrik enerjisi iletim hatlarıyla TEİAŞ trafo merkezlerine, bu merkezlerden de dağıtım sistemine iletilmektedir. En son da dağıtım sistemi aracılığıyla kullanıcılara elektrik enerjisi verilmektedir. Elektrik enerji sistemi tüm kullanıcıları besleyecek şekilde tasarlanır [2].

Elektrik enerjisinin depolanamama özelliğinden dolayı elektrik enerjisi üretildiği andan itibaren tüketicilere ulaştırılması gerekmektedir. Santrallerde üretilen elektrik enerjisinin abonelere ulaştırılması (üretim, iletim ve dağıtım) aşamalarını içeren basit sistem Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Elektrik enerjisinin tüketiciye ulaştırılması [3].

Elektrik üretim santrallerinde elde edilen enerji öncelikle mekanik enerjiye dönüşür. Bu enerji generatörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür ve generatörlerden üretilen gerilim güç transformatörlerinde yükseltilerek iletim şebekesine ulaştırılır. Buradan da sanayi bölgeleri, yerleşim yerlerinin yakınındaki dağıtım merkezlerine iletilir. En son olarak da dağıtım merkezlerinden itibaren abonelere dağıtımı yapılır.

2.2. Elektrik Dağıtım Sistemi

Elektrik dağıtım sistemi, iletim şebekelerinden aldığı enerjiyi belli gerilim seviyelerine indirerek abonelere ulaştıran şebeke sistemidir. Santrallerde üretilen elektrik enerjisinin son kullanıcılara ulaşmasını sağlayan şebekelerin dağıtım tipine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir.

Teknik olarak şebekeler dağıtım türüne göre açık ve kapalı şebeke olarak iki ana grupta incelenebilir. Bu iki ana grubun içerisinde de farklı şebeke sistemleriyle elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı gerçekleştirilir.

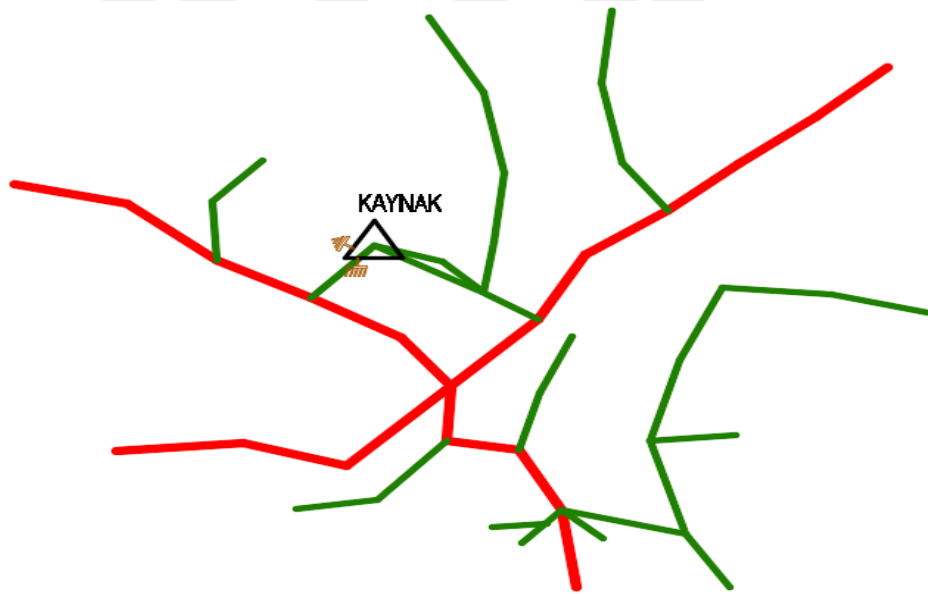
Elektrik enerjisinin kullanıcılara iletilmesi aşamasında şebekenin belli özellikleri içermesi gerekmektedir. Bu özellikler aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Elektrik enerjisinin santralden abonelere kadar kesintisiz bir şekilde ulaştırılması sağlanmalıdır. Özellikle sanayi bölgelerinde en ufak kesinti bile çok büyük zararlara yol açabilmektedir.
- Elektrik şebekesinin basit, anlaşılır, sağlam ve güvenilirliğinin yüksek olması gerekmektedir. Doğal afetlere karşı dayanıklı olması gerekmektedir.
- Şebekede oluşan arızalardan abonelerin etkilenmemesi gerekmektedir. Bu yüzden enerji hatlarının çeşitli yerlerinde arızalara karşı koruma elemanları bulunması gerekmektedir.
- Bir dağıtım hattındaki tüm abonelere ulaşan elektrik enerjisinin aynı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Gerilimin yüksek ya da düşük olması abonelerin cihazlarının zarar görmesine sebep olmakta, aynı zamanda frekanstaki değişimler yine cihazların ömürlerinin kısılmasına ve düzgün çalışmamasına

sebepe olmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı bir dağıtım şebekesi boyunca gerilimin ve frekansın sabit olması gerekmektedir [3].

2.2.1. Açık şebeke

Açık şebekeler çok kullanılan bir şebeke türüdür (Şekil 2.2.). Radyal ya da dallı şebeke de denir. Tek bir kaynaktan abonelere enerji iletimi yapılır. Besleme şekli ağaç dallarına benzediği için bu isim verilmiştir. Bu şebeke türünün tesis edilmesi, bakımı ve işletmesi kolaydır. Gelişime açık olan bölgelerde uygulanır. Bu şebeke tipinde arızanın meydana geldiği noktadan itibaren şebekenin devamındaki son kullanıcıya kadar tüm abonelerin arızadan etkilenmesi ve dağıtım şebekesi boyunca gerilimin sabit kalamayıp, trafodan uzaklaştıkça gerilim düşümü meydana gelmesi; bu şebeke türündeki dezavantajlardır.



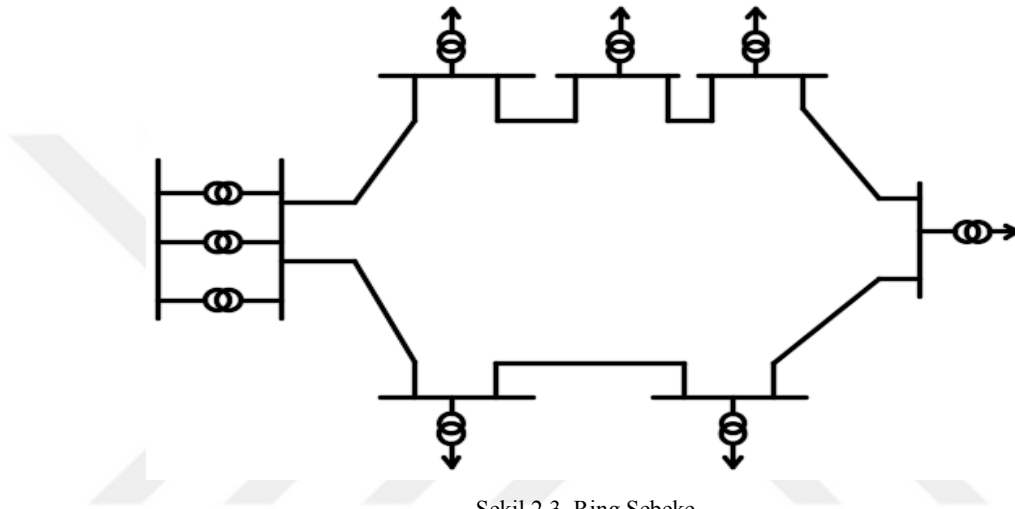
Şekil 2.2. Açık (radyal) şebeke.

2.2.2. Kapalı şebeke

Kapalı şebekeler iki şekilde tesis edilirler. Bunlar ring ve ağ şebekelerdir.

2.2.2.1. Ring şebeke

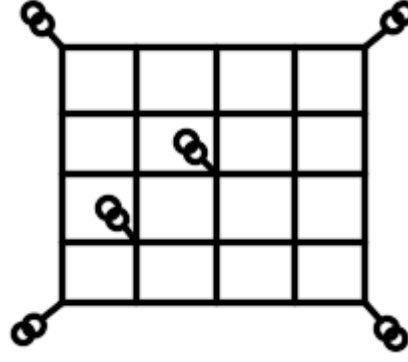
Bu şebeke türünde aboneler birden fazla kaynaktan ve iletim hattından beslenebilmektedir (Şekil 2.3.). Arıza durumlarında enerji, alternatif besleme sağlandığından, kesintisiz şekilde iletilir. Bu tip şebekelerde arıza durumlarında, şebeke arıza noktasından açılır ve alternatif besleme hattından aboneler enerjilendirilir. Dolayısıyla aboneler enerji kesintisi yaşamamış olurlar.



Şekil 2.3. Ring Şebeke.

2.2.2.2. Ağ şebeke

Ağ (gözlü) şebekelerde abonelere verilen enerji bir veya birden fazla yerden verilir (Şekil 2.4.). Ağ şebeke sistemleri de ring şebekelerde olduğu gibi arıza durumlarında sadece arıza olan yerin enerjisi kesildiğinden enerji kesintisiz olarak verilir. Bu şebeke sisteminde gerilim düşümü çok az olur. Bazen sadece tek bir trafo ile besleme yapılabilir. Ancak bu durumda trafoda arıza meydana geldiğinde tüm sistem enerjisiz kalır. Ağ şebeke sisteminin dezavantajları ise sistemin tesis edilmesi, işletilmesi ve bakımı zor ve kısa devre akım etkisinin büyük olmasıdır.



Şekil 2.4. Ağ (gözlü) şebeke.

2.3. Enerji Kalitesi, Kayıplar ve Alınabilecek Önlemler

Günümüzde elektrik enerjisi en çok kullanılan enerji türüdür. Elektrik enerjisinin özellikle sanayinin en temel ögesidir. Elektrik kullanım seviyesi bir ülke için gelişmişlik düzeyini gösterir. Günden güne elektrik enerjisine olan talebin artması, teknolojik gelişmeler ve sanayileşme elektrik enerjisinin üretimi, kesintisiz, kayıpsız ve kaliteli olarak abonelere ulaştırılması büyük önem kazanmıştır. Elektrik enerjisinin üretim merkezlerinden tüketicilere ulaştırılabilmesi için kullanılan iletim ve dağıtım şebekelerinde kayıplar meydana gelmektedir. Tüketicie ulaştırılan enerji gibi kayıp enerji de üretim santrallerinde üretilen enerjidir. Bu da göstermektedir ki kayıp enerjinin üretilmesi için çok fazla kaynak kullanılır ve bu da büyük maddi kayıplara sebep olur. Aynı zamanda da enerji kaybına tekabül eden akımlar şebekeyi oldukça fazla yüklerler ve gerilimin düşmesine sebep olması yanında, hatların ve trafoların enerji taşıma kapasitelerini azaltırlar. Ayrıca mevcut kurulu gücün bir kısmı kayıp enerjiyi karşılamak üzere kullanılır ve böylece tüketilen enerjinin üretimi de azalmış olur [4].

2.3.1. Kayıplar

Elektrik enerjisi üretildiği santralden itibaren tüketiciye ulaştırılma aşamasında ve üretilen enerjinin üretildiği anda kullanılamaması, aynı zamanda da depolanamaması sebebiyle kayıplara maruz kalmaktadır.

Elektrik enerjisinin dağıtımında meydana gelen kayıpları teknik kayıplar ve teknik olmayan kayıplar şeklinde ikiye ayırabiliriz.

Teknik kayıplar dağıtım şebekesinde kullanılan malzemelerden kaynaklanır. Bu kayıpları aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz;

Meydana geliş yerlerine göre kayıplar;

- Transformatör kayıpları (demir (nüve) kayıpları, omik kayıplar.)
- Hatlardaki kayıplar (kablolardaki dielektrik kayıplar, kaçak akım kayıpları, korona kayıpları ve omik kayıpları.)
- Sayaçlarda, ölçü transformatörlerinde, rölelerde yüksek gerilim kondansatörlerinde ölçü aletlerinde vb. meydana gelen kayıplar.)

Şebeke kayıpları cinsine göre;

- Yükten bağımsız kayıplar: (Boştaki kayıplar) Bu kayıplar gerilim altında bulunduğu zamanlarda şebekede yük olsun veya olmasın her daim meydana gelirler. Büyüklükleri yükten bağımsızdır.
 - a. Transformatörlerdeki demir kayıpları,
 - b. Havai hatlarda bulunan izolatörlerde meydana gelen (kaçak akımlar) kayıplar ve ışıma ile meydana gelen kayıplar (korona kayıpları), kablolarda ve kondansatörlerdeki dielektrik kayıplar,
 - c. Gerilim trafolarının primer sargılarında bulunan sayaç, röle ve ölçü aletlerinde bulunan bobinlerde meydana gelen kayıplar vb.
- Yüke bağlı kayıplar: Şebeke yüklendiği zamanlarda meydana gelirler. Bu kayıplar yükün büyüklüğüne bağlıdır ve akımın karesi ile orantılıdır [4].

Teknik olmayan kayıplar ise elektrik enerjisinin kaçak olarak kullanılmasından kaynaklı kayıplardır. Bu kayıpların da ülkemize maliyeti oldukça yüksektir. Bu kayıpları azaltmak için de birçok çalışma yapılmaktadır.

Elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemlerinin tasarlanırken en çok önem verilmesi gereken konu kuşkusuz kayıplardır. Dünya üzerindeki diğer ülkelerle kıyaslandığı takdirde, ülkemizin elektrik enerji sisteminde üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında meydana gelen kayıplar oldukça yüksektir. Dünya genelinde kabul görmüş ortalama maliyetlere bakıldığında; sistem maliyetlerinin %50'si üretim aşamasından, %20'si iletim aşamasından ve %30'u ise dağıtım aşamasından oluştuğu görülmektedir. Tam tersi kayıplara bakıldığında ise toplam üretilen elektrik enerjisinin %30'u kaybolmaktadır. Bu istatistikler göre, santrallerde üretilen enerjinin büyük bir kısmı yok olmaktadır [6].

Tüm bunlar, sistem tasarlayıcılar için şunu göz önünde bulundurmaları gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. Bir elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinde meydana gelen kayıpların nerelerden kaynaklandığı bilindiği takdirde bu konuda çalışmalar yapılarak kayıpların azaltılması ve daha ekonomik enerji elde edilmesi sağlanabilir. Yine sistemde meydana gelen kayıpların dağılımının nasıl olduğu, hangi zamanlarda arttığının bilinmesi kayıpların azaltılması için üretilecek çözüm yöntemlerinde fayda sağlayacaktır.

2.3.1.1. Şebeke kayıplarının azaltılması

Elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinde çeşitli sebeplerden dolayı kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıpları minimuma indirmek için bazı önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemler şöyle sıralanabilir:

- a. İletim ve dağıtım hatlarında uygun malzemelerin kullanılması.
- b. İletim ve dağıtım şebekelerinde reaktif güç kompanzasyonunun yapılması.
- c. İletim ve dağıtım şebekelerinde yük akışının sürekli kontrolünün sağlanması ve bu yönde otomasyonun yapılması. Dengesiz yüklenmenin önlenmesi ve boşta hat bekletilmemesi.
- d. Dağıtım şebekelerinde gerilim seviyelerinin olabildiğince yüksek tutulması, gerilim optimizasyonun sağlanması.

- e. Dağıtım şebekelerinde oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda şebekenin en az etkilenecek şekilde devre dışı kalmasının sağlanması.

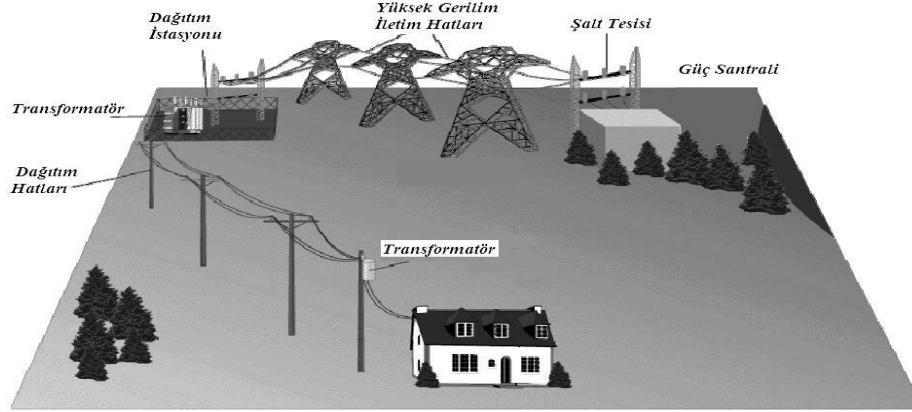
Yukarıda bahsedilen önlemlerin alınması ve uygulanması, ilgili şebekelere ilave maliyetler getirebilir. Bu maliyetler ile birlikte kayıp enerji maliyetleri kıyaslandığında, ilave maliyetlerin kayıp maliyetlerinden çok daha düşük olduğu görülebilir. Murat Kurt'un 2001 yılında hazırladığı "Elektrik Şebekelerinde Güç ve Enerji Kayıplarının Azaltılması Metotları" adlı yüksek lisans tezinde elektrik enerji kayıplarının azaltılması metodları incelenmiş, bu metodların enerji sistemlerindeki uygulamaları üzerinde durulmuş ve enerji sistemlerinin tasarımı esnasında bu yöntemlerin uygulanmasının elektrik enerjisi kayıplarını önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir [7].

Başka bir çalışmada da Celal Yaşar ve arkadaşları bir dağıtım transformatörü bölgesindeki kayıpların incelemesini yapmışlardır. Dağıtım sistemlerindeki iyileştirmenin güç kaybında azalma meydana getireceğini öne sürerek alternatif çalışmalar geliştirmişler, yaptıkları tasarımların maliyetlerini çıkarmışlar ve güç faktörünün kayıplar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta yeraltı sistemlerinin kaçaklar açısından daha avantajlı olduğunu tespit etmişlerdir. Bunlara ek olarak elektromekanik sayaçlar yerine elektronik sayaçların kullanılmasında enerji kaybının fazla olduğunu göstermişler ve çözüm olarak tasarımlarının daha uygun hale getirilmesini önermişlerdir. Ayrıca güç faktörü açısından da abonelerin güç faktörlerinin 1'e yakın olmasının istenmesini belirterek, kompanzasyon sistemlerinin önemi üzerinde durmuşlardır [8].

2.3.2. Enerji kalitesi

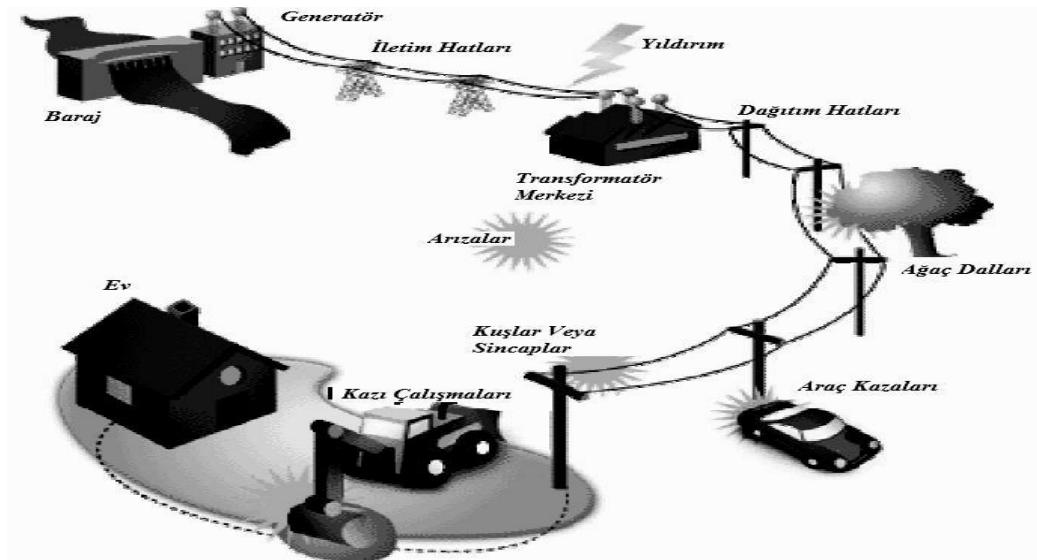
Önemli bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımının yapılmasının yanında, sürekli (kesintisiz) ve kaliteli olması temel amaçlardır. Enerji kalitesi kavramı gerilimin sinüzoidal şekle en yakın halde olması ve aynı zamanda da frekansın sabit kalmasıdır. Ters açıdan bakıldığında da gerilimin düzensizliği, dalgalanması, frekans değişimi ve kesintiler enerji kalitesizliği şeklinde açıklanabilir.

Şekil 2.5.'te görüldüğü üzere elektrik enerjisinin kalitesi, üretimden başlayarak tüketiciye kadar tüm aşamalarda sağlanması sağlanmalıdır.



Şekil 2.5. Elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemi [1].

Kaliteli enerji için öncelikle enerjinin sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir. Daha sonraki aşamada gerilimin ve frekansın sabit kalması gerekmektedir. Ayrıca fazlar arası gerilimlerin de dengeli olması, gerilimde ve akımda oluşan harmoniklerin de belli seviyenin üzerine çıkmaması gereklidir. Şekil 2.6.'da enerji kalitesini bozan bazı durumlar gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Elektrik enerji kalitesinde bozulmaya sebep olan bazı durumlar [1].

Enerji kalitesi üzerine Türkiye’de birçok çalışma yapılmış ve bazı fikirler ortaya konmuştur. Bunların bazıları aşağıda açıklanmıştır. Enerji kalitesi yönünde daha önce yapılan çalışmalardan biri olan Ahmet Gemci tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinde Kahramanmaraş’a ait dağıtım şebekesinde akım ve gerilim harmonikleri, kırpışma, gerilim yükselmesi ve düşmesi gibi çeşitli enerji kalitesi parametrelerini yönetmelikler çerçevesinde inceleyerek, analizlerini gerçekleştirmiştir. Sonuçta yeni tesis edilecek kısımlar için yönetmelikler çerçevesinde topraklama ve kompanzasyonunun standartlara uygun yapılması gerektiği, büyük işletmelere ait trafoların bakımlarının düzenli yapılması gerektiği, ani yük değişimlerine engel olmak için kullanılan teçhizatlarının bakımlarının da periyodik olarak yapılması gerektiği şeklinde fikirler öne sürmüştür [2].

Bir diğer çalışma; Hasan Eroğlu’na ait olan “Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi” adlı yüksek lisans tez çalışmasıdır. Eroğlu bu çalışmasında bir elektrik dağıtım şebekesinde gerçekleştirilen ölçümleri incelemiş ve harmoniklerin bu dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri üzerine yorumlar yapmıştır [1].

BÖLÜM 3. KISA DEVRE ANALİZİ

Doğal afetler (deprem, yıldırım düşmesi, buzlanma vb. atmosferik olaylar), hayvanlar, kir, nem, yanlış manevralar ve buna benzer tüm olaylar ile oluşabilecek aşırı akım ve gerilim elektrik enerji sistemlerinde bulunan elemanların düzgün çalışmasına engel olmaktadır. Enerji sistemlerinde bu tür olaylar ve durumlar sonucunda oluşabilecek aşırı gerilimler malzemelerin yalıtım sınırının aşılmasına sebep olarak kısa devre durumlarını oluşturabilmektedir. Elektrik sistemleri ve bu sistemi oluşturan malzemeleri gerilim düşümü ve akım taşıma kapasitelerinin yanında kısa devre açısından da değerlendirilmelidir. Kısa devre akımları olarak adlandırılan ve bir enerji sisteminde arıza meydana geldiği anda oluşan aşırı akımlar, sisteme ve sistem elemanlarına zarar vererek aynı zamanda can güvenliğini de tehdit etmektedir. Bu sebeple bir elektrik sistemi tasarlanırken, sistemde oluşabilecek kısa devre arıza akımlarının iyi hesaplanması ve sistemde kullanılacak tüm malzemelerin bu sisteme ve canlılara zarar vermeyecek şekilde seçilmesi, hem sistem hem de can güvenliği açısından çok önemlidir.

3.1. Kısa Devre Akımı

Bir elektrik sisteminde kısa devrenin olduğu düğüm noktasından kısa devre süresince akan akımdır. Kısa devre akımı nominal akımdan yaklaşık dört kat daha yüksek olduğu için bir sistemde uzun süre kısa devre durumu yaşanması, sistemde bulunan elektriksel malzemelerde hasarlara ve zorlanmalara yol açmaktadır. Bu sebeple sistemde hasar meydana gelmemesi ve herhangi bir can kaybına yol açmaması için arızalı kısmın sistemden en kısa sürede ayrılması gerekmektedir. Bu sistemden ayrılma süreleri yüksek gerilim ve alçak gerilim için farklılık göstermektedir. Yüksek gerilimlerde koruyucu ekipman olarak kullanılan kesicilerin kesme süresi, alçak gerilim koruyucu ekipmanlarına göre çok daha kısa sürede olması gerekir.

Bir sistemdeki kısa devre durumu ile ilgili bazı tanımlar aşağıda verilmiştir.

Simetrik kısa devre akımı; kısa devre akımının güç-frekans eğrisindeki bileşenidir.

Kısa devre branşman akımları; elektrik sisteminin farklı kollarında veya branşmanlarında akan kısa devre akımlarıdır.

Devamlı kısa devre akımı (I_k); bu akım kısa devre müddetince akmaktadır ve devamlı kısa devre akımı olarak ortaya çıkmaktadır. Ani kısa devre akımı zamanla küçülür ve sabit bir değere ulaşır.

Başlangıç kısa devre akımları (I''_k); kısa devrenin meydana geldiği ilk andaki kısa devre akımının ortalama karekök (etkin) değeridir.

Maksimum asimetrik kısa devre akımı (I_s); kısa devrenin olduğu anın ardından oluşan kısa devrenin en büyük tepe değeridir.

$$I_s = \sqrt{2} \cdot X \cdot I''_k \quad (3.1)$$

X=reaktans değerini ifade etmektedir.

Simetrik açma akımı (I_a); elektrik devredeki açma-kapama sistemlerinin kısa devre durumundaki açma şartlarında, kontakların ilk birbirinden ayrılmadığı andaki akacak olan simetrik kısa devre akımının ortalama karekök (etkin) değeridir.

$$I_a = \mu I''_k \quad (3.2)$$

μ değeri açmadaki gecikme zamanını göstermektedir. İlgili eğriden t_m 'ye bağlı olarak alınabilir. t_m değeri de kısa devrenin oluştuğu an ile kısa devrenin ortadan kalkması için kesicilerin devreyi açmaya başladığı andaki zaman farkını göstermektedir. Eğer kısa devre jeneratörden uzak bir kısa devre ise $\mu=1$ alınır.

Kapama akımı (I_e); simetrik açma akımının yaklaşık 2,5 katıdır. ($I_e=2,5I_a$).

Nominal işletme gerilimi (U_n , U_N =nominal gerilim; U_h =işletme gerilimi (fazlar arası)); elektrik malzemelerinin üretildikleri çalışma gerilimidir.

Sistem nominal gerilimi; bir sistemin dizayn edildiği iletkenler arası gerilimdir. Genellikle sistem nominal gerilimi ile işletme gerilimi birbirine eşittir. Jeneratör veya trafoların nominal çıkış gerilimleri genelde sistem nominal geriliminin 1,05 katı kadar seçilir.

Kısa devre başlangıç gerilimi (U''); kısa devre olduğu andaki kısa devre olmasına etki eden jeneratördeki gerilimdir.

Simetrik açma Gücü (S''_{ka}); simetrik açma akımının oluşturduğu güçtür.

$$S''_{ka} = \sqrt{3} I_a U_n \quad (3.3)$$

Jeneratöre yakın kısa devre; kısa devrenin olduğu yerdeki ani oluşan kısa devre akım büyüklüğünün senkron jeneratör nominal akımının katlanmasıdır.

Jeneratöre uzak kısa devre; kısa devrenin olduğu yerdeki ani üç fazlı kısa devre akımının iki katından küçük olması halidir [9].

3.2. Kısa Devre Akım Kaynakları ve Dalga Şekilleri

Kısa devrenin oluşmasına etki eden kaynaklar şunlardır;

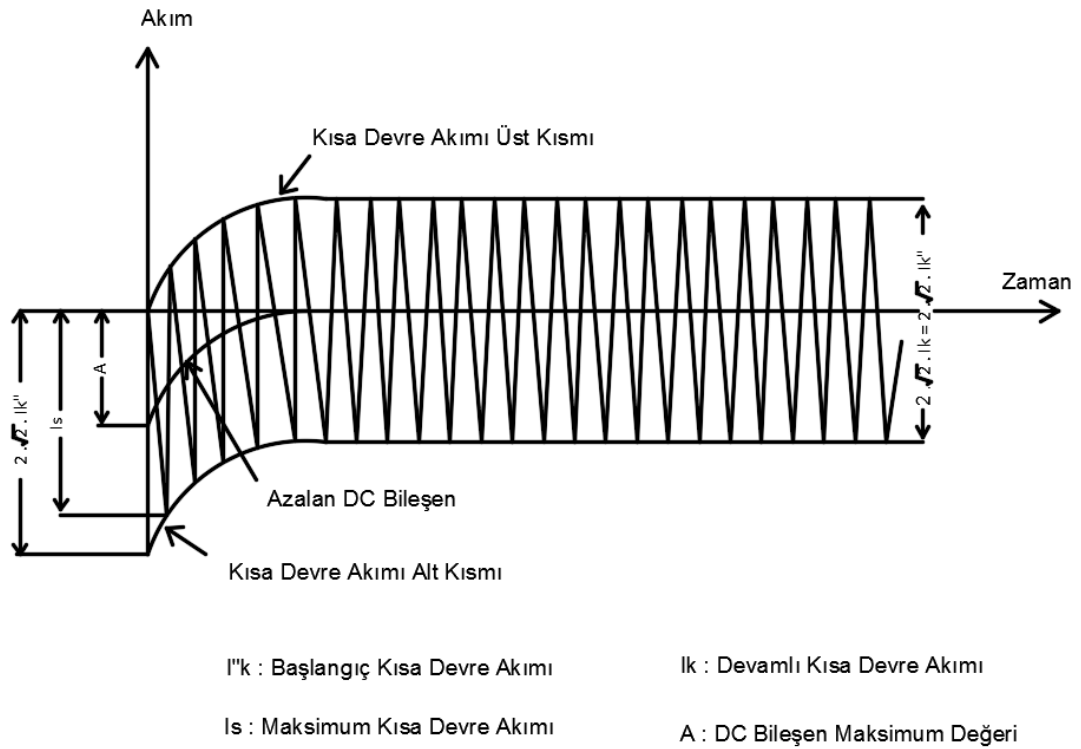
- a. Enterkonnekte şebeke
- b. Senkron makinalar (jeneratör, motor, senkron kapasitör)
- c. Asenkron makinalar (jeneratör, motor)

Kısa devre olduğu anda senkron ve asenkron motorlar, kısa devre oluşmasına bir jeneratör gibi etki ederler.

3.2.1. Kısa devrenin olduğu yerin jeneratöre göre durumu

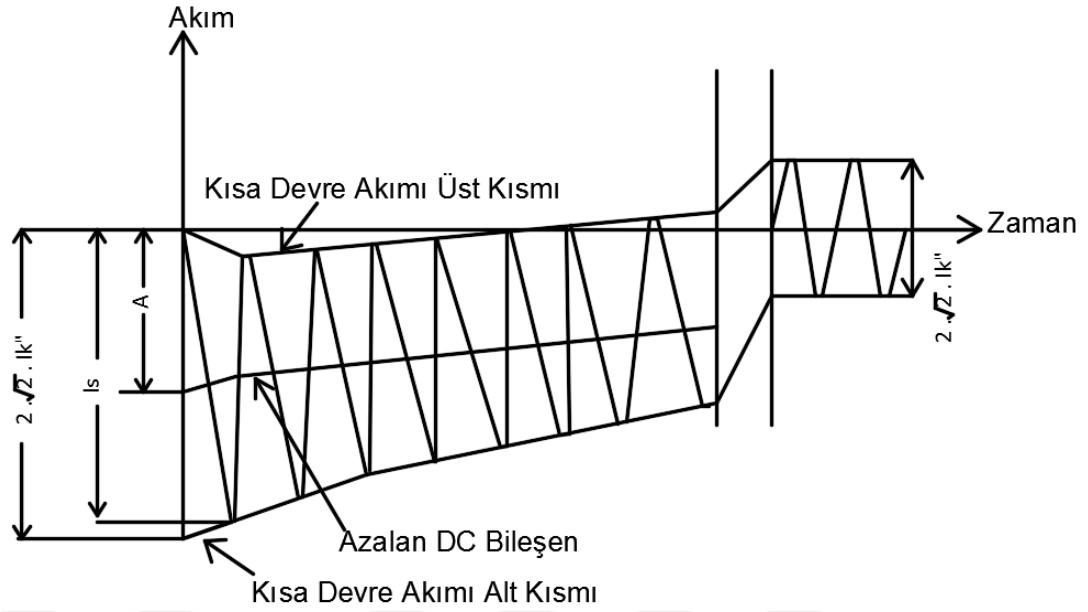
Kısa devre akım dalga şekilleri, kısa devrenin jeneratörden yakın ve uzak olmasına göre farklılık göstermektedir.

Şekil 3.1.'de jeneratörden uzakta oluşan kısa devre dalga şekli gösterilmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere kısa devre akımı zamanla değişmez ve $I''_k = I_k = I_a$ olur.



Şekil 3.1. Jeneratörden uzak kısa devre akımı dalga şekli.

Şekil 3.2.'de jeneratör yakınında oluşan kısa devre akımının dalga şekli gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere simetrik kısa devre akımının I''_k başlangıç değeri, devamlı kısa devre akımı (I_k) değerine eşit olana kadar azalır. Jeneratöre yakın kısa devre durumunda $I''_k > I_k$ olur. Eğer kısa devre devamlı kısa devre durumuna ulaşmadan devre kesilirse simetrik kısa devre açma akımı I_a , ani kısa devre akımı I''_k 'dan daha küçük olur veya $I''_k > I_a \geq I_k$ olmaktadır.



Şekil 3.2. Jeneratöre yakın kısa devre akım dalga şekli.

Kısa devre akım dalga şekilleri yukarıda verilen durumların formüllerle ifade edilerek yorumlanması bu kısımda açıklanmıştır. I_{NG} jeneratör nominal akımı olmak üzere devamlı kısa devre akımını aşağıdaki formüllerle ifade edebiliriz.

Üç fazlı kısa devre akımı:

$$I_k = \lambda I_{NG} \quad (3.4)$$

İki fazlı kısa devre akımı:

$$I_k = \lambda \sqrt{3} I_{NG} \quad (3.5)$$

Faz-toprak kısa devre akımı:

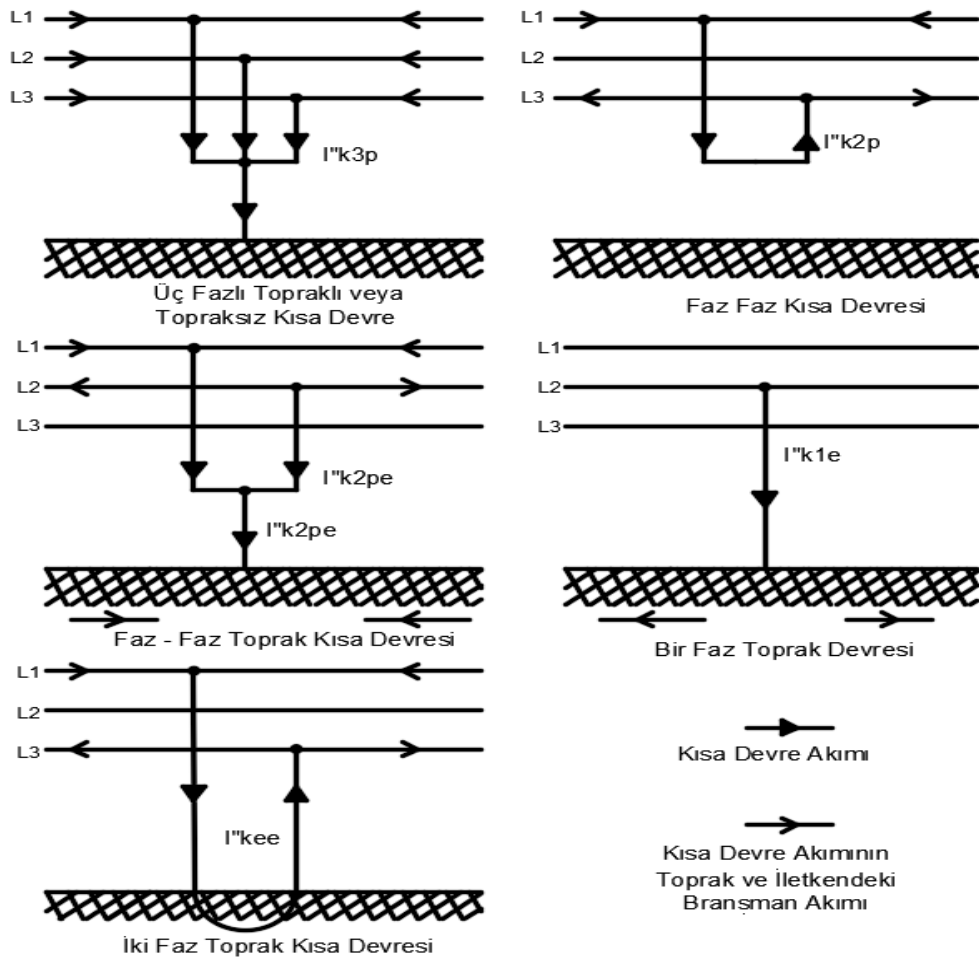
$$I_k = \lambda 3 I_{NG} \quad (3.6)$$

λ bir sabit olmak üzere, bu değer I''_k/I_{NG} oranına bağlı olarak jeneratörün X_d reaktansına bağlı olarak grafikten (VDE 102'ye göre) seçilir. Jeneratörden uzak kısa devre için $I''_k=I_k$ alınabilir. Hesaplanan I_k değerine bağlı olarak jeneratöre uzak ve yakın kısa devre için aşağıdaki yorumları yapabiliriz.

$I''_k/I_{NG} > 2$ ise bu kısa devre jeneratöre yakın kısa devre; $I''_k/I_{NG} < 2$ ise bu kısa devre jeneratöre uzak kısa devredir. Bu yorumlarda bahsedilen uzaklık terimi elektriksel uzaklığı ifade etmektedir.

3.3. Kısa Devre Çeşitleri

Üç fazlı sistemlerde, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi kısa devre durumları oluşabilir.



Şekil 3.3. Kısa devre çeşitleri.

Şekil 3.3.'te gösterilen kısa devre akımları için formülleri Z (empedans) ohm cinsinden aşağıda verilmiştir. Üç fazlı topraklı veya topraksız kısa devre akımı:

$$I''_{k3p} = \frac{c \cdot U_h}{\sqrt{3} |Z_1|} \quad (3.7)$$

Denklemdaki c değeri maksimum ve minimum kısa devre akımlarını hesaplamak için kullanılan sabit bir değerdir. Maksimum kısa devre akımını hesaplamak için $c=1,1$, minimum kısa devre akımını hesaplamak için ise $c=0,95$ olarak alınır.

Faz-faz kısa devre akımı:

$$I''_{k2p} = \frac{c \cdot U_h}{|Z_1 + Z_2|} \quad (3.8)$$

İki-faz toprak kısa devre akımı:

$$I''_{k2pe} = \frac{\sqrt{3} c \cdot U_h}{|Z_1 + Z_2 + Z_0 \frac{Z_1}{Z_2}|} \quad (3.9)$$

Bir-faz toprak kısa devre akımı:

$$I''_{k1pe} = \frac{\sqrt{3} c \cdot U_h}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} \quad (3.10)$$

formülleriyle hesaplanır. Bu formüllerde kullanılan Z değerleri kısa devre noktasında karşımıza çıkan empedans değerlerini ifade etmektedir. Z_1 =empedansın pozitif bileşenini; Z_2 =empedansın negatif bileşenini; Z_0 =empedansın sıfır bileşenini; $|Z_1 + Z_1 + \dots|$ =seri şekilde bağlanmış empedansların mutlak değerini ifade etmektedir. Ayrıca kısa devre gücü aşağıda verilen eşitlik kullanılarak (Denklemler 3.11) hesaplanır.

$$S''_k = \sqrt{3} U_n U''_{k3p} \quad (3.11)$$

BÖLÜM 4. SÜPERİLETKENLER

4.1. Süperiletkenlik

Bir iletkenin üzerinden akım geçirebilmek için uygulanan gerilim uygulama gerekliliğine direnç denir. İletkenden akım geçmesi sonucunda iletken ısınır. Bu durumda direnç değerine bağlı olarak uygulanması gereken gerilim ve kayıp enerji de bu oranlarda değişir. Fakat bazı iletkenlerde bu durum çok farklı bir hal almaktadır. Bu iletkenler, kritik sıcaklık denilen özel bir sıcaklığa kadar soğutulduğu anda içerisindeki elektronların enerjilerini ısıya çevirme yetenekleri kaybolarak direnci sıfıra düşmektedir. Bu durumda yukarıda da bahsedildiği üzere herhangi bir gerilim uygulamadan akım iletmek mümkün hale gelir. Ve bu süreçte de enerji kaybı yaşanmaz. Tüm bu bilgiler çerçevesinde bu maddeler için kritik sıcaklıkta süperiletkenlik özelliği gösterdiği söylenebilir.

Süperiletkenlik kavramı yukarıda da bahsedildiği gibi bir iletkenin belirli şartlarda elektriksel direncinin sıfır olması olarak tanımlanmaktadır. Bu belirli şartları da kritik bir sıcaklık ve kritik bir manyetik alan oluşturmaktadır. Bazı iletkenlerin ve alaşımların belirli yani kritik bir sıcaklığa soğutulduğu anda direnci yok olmakta ve süperiletkenlik özelliği göstermektedirler.



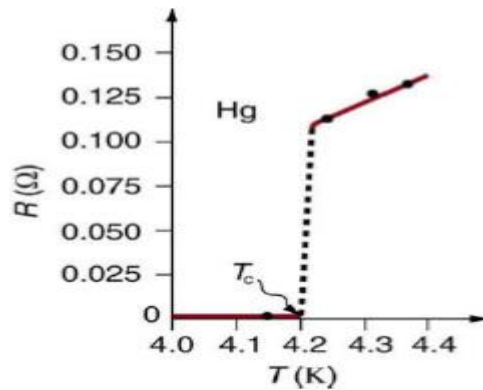
Şekil 4.1. Süperiletkenlik deneyi [12].

Süperiletkenlik gösteren bir madde, yüksek sıcaklıklarda normal elektriksel dirence sahip olup, maddenin kritik sıcaklığına kadar soğutulduğunda direnci sıfıra düşerek süperiletken durumuna geçmektedir. Bu tip malzemelere gerilim uygulandığında herhangi bir dirençle karşılaşmadığından akım sürekli akar ve herhangi bir kayıp da oluşmaz. Diğer malzemelerde bu durum farklıdır. Akım malzemeden geçerken enerji açığa çıktığından kayıplar meydana gelir.

4.2. Süperiletkenliğin Tarihçesi

Süperiletkenlik ile ilgili çalışmalar 1908 yılında Hollandalı Fizikçi Heike Kamerlingh Onnes Leiden'deki laboratuvarında Helyum'u sıvılaştırması ile başlamıştır. Onnes yaptığı deneyde, soğuk telin direncinin azalacağını düşünerek sıcaklığı olabildiğince düşürmüştü ve çok saf bir cıva telinden akım geçirmeye çalışmıştır. Bu esnada da cıva telinin direncini ölçmüştür. Bu ölçüm sonucunda cıvanın direncinin belirli bir kritik sıcaklıkta (4,19 K'de) aniden sıfıra ($<10^{-27}\Omega m$) düştüğünü gözlemlemiştir. Bu buluş ile artık süperiletkenlik çalışmaları başlamıştır. Sonraları Onnes birçok iletkenin ve metal alaşımın da farklı sıcaklıklara kadar soğutulduğunda süperiletken özellik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Bu buluş ile Heike Kamerlingh Onnes 1913 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştır.

Şekil 4.2.'de cıvanın sıcaklık-direnç grafiği gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi cıva elementinin 4,2 K sıcaklıkta aniden direncinin sıfıra düştüğü yani bu sıcaklıkta süperiletken özellik göstermektedir.



Şekil 4.2. Cıvanın sıcaklık-direnç grafiği [10].

Onnes, bu keşfin ardından 1912 yılında ekstenel manyetik alan uyguladığı anda süperiletkenliği yok ederek normal haline geri döndürmüştür. 1913’de kurşun elementinin 7,2 K sıcaklığında süperiletken özellik gösterdiğini keşfetmiştir. Daha sonraları birçok element ve alaşımın da süperiletken özellik gösterdiği bulunmuş fakat 1941 yılında Niyobyum elementinin 9,2 K sıcaklıkta süperiletken olduğu keşfedilerek önceki çalışmalara nazaran yüksek sıcaklık süperiletkeni keşfi ortaya çıkmıştır.

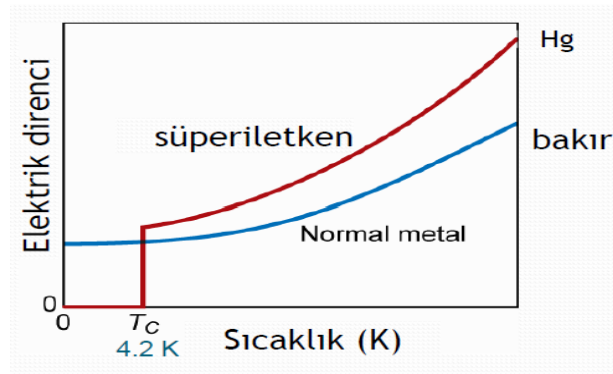
Onnes’in buluşundan sonra süperiletkenlik çalışmaları devam etmiş ve 1933 yılında Meissner ve Ochsenfeld, süperiletkenlerin Süperiletkenler belli bir değerden daha düşük manyetik alanları dışarılamışlardır keşfetmişlerdir.. Bu özellik, “Meissner Etkisi” (diamanyetizma) olarak bilinmektedir.

4.3. Süperiletkenlik Parametreleri

4.3.1. Kritik sıcaklık (T_c)

Birçok saf metalin sıcaklıkları düştükçe elektriksel dirençleri de düşer ve her bir metal için karakteristik bir değere sahip olur. Bazı malzemelerin ise soğutulma esnasında dirençleri aniden sıfıra kadar düşer. İşte bu malzemelerin dirençlerinin sıfıra düştüğü, süperiletkenlik özelliği gösterdiği sıcaklığa kritik sıcaklık (T_c) denir.

Şekil 4.3.’de cıva elementinin kritik sıcaklık eğrisi ile normal metallerin elektriksel direnç–sıcaklık eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Normal iletken ile süperiletken malzemenin elektrik direnci–sıcaklık ilişkisi [13].

4.3.2. Kritik manyetik alan (H_c)

Bir süperiletken kritik sıcaklığının altına kadar soğutulup, çevresindeki manyetik alan arttırıldığında uygulanan manyetik alan süperiletkenin çevresinde kalır. Bütün süperiletken malzemelerin süperiletken durumunda olduğu kritik bir sıcaklık ve manyetik alan değerleri vardır. Malzeme bu bölgenin dışında süperiletkenlik özelliğini kaybeder. Bir malzemeye kritik sıcaklığın üzerinde bir sıcaklıkta manyetik alan uygulandığı zaman malzeme süperiletken özellikte olmadığından uygulanan manyetik alan ile yaklaşık eşit manyetik alana sahip olur. Şekil 4.4.'te süperiletkene mıknatıs tarafından uygulanan manyetik alanın süperiletkende bir manyetik alan meydana getirerek birbirini itmesi durumu gösterilmiştir.

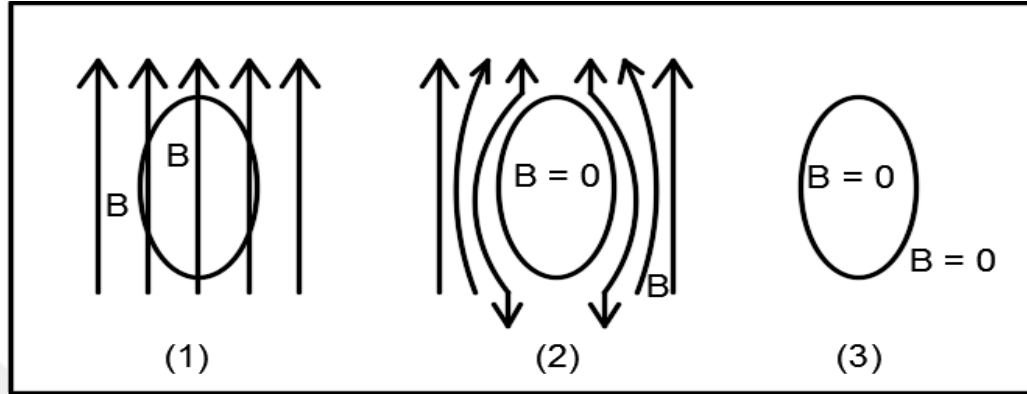


Şekil 4.4. Meissner etkisi [11].

Eğer sıcaklık malzemenin kritik sıcaklığına kadar soğutulursa, bu esnada uygulanan manyetik alan çizgileri süperiletken tarafından yüzeye doğru dışlayacak, malzeme içinde manyetik alan sıfır olacaktır. Bunun sebebi süperiletkenin kendi yüzeyinde uygulanan manyetik alan ile eşit fakat zıt yönlü bir manyetik alan oluşturarak diamanyetik özelliğe sahip olmasıdır. Bu olaya “Meissner Etkisi” denir [14].

Şekil 4.5.'te Meissner olayı ayrıntılı şekilde ifade edilmiştir. (1) numaralı durumda malzeme kritik sıcaklık değerinin üzerinde bir sıcaklıkta süperiletken durumundadır. Ve süperiletkenin içerisinde de dışarısında olduğu gibi aynı B büyüklüğünde bir manyetik alan geçmektedir. Daha sonra (2) numaralı şekilde sıcaklık, kritik sıcaklığın

altına kadar düşürülür. Bu durumda da süperiletken içerisindeki manyetik alan yani $B=0$ olur ve manyetik alan malzemenin dışarısına itilir. (3) numaralı durumda ise manyetik alan kaldırılır. Malzemenin içerisinde ve dışarısında manyetik alan $B=0$ olur.



Şekil 4.5. Meissner etkisinin özeti.

Şekillerde gösterildiği üzere bir süperiletken malzemenin süperiletkenlik durumunda göstermiş olduğu diamanyetiklik özelliğine kritik manyetik alan (H_c) denir.

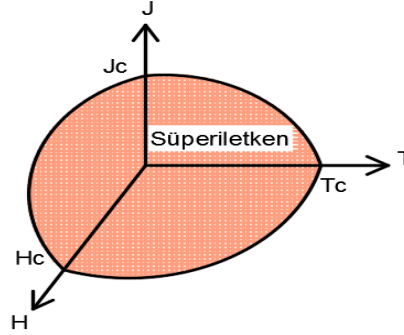
4.3.3. Kritik akım yoğunluğu (J_c)

Bu parametre süperiletkenliğin tanımını oluşturan en önemli parametre olarak gösterilebilir. Bir süperiletken malzemenin süperiletkenliği bozulmadan taşıyabileceği maksimum akım değerinin birim kesit miktarına oranı olarak ifade edilmektedir. r yarıçaplı silindirik bir yapıdaki süperiletken için akım yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle (Denklem 4.1) ifade edilir.

$$J_c = \frac{2 B_c}{\mu_0 r} \quad (4.1)$$

Formülde geçen B_c =kritik manyetik alanı ifade etmektedir. Bir malzemenin süperiletkenlik özelliğini gösterebilmesi için yukarıda bahsedilen üç parametrenin de aynı anda sağlanması gerekmektedir. Bu özelliklerden herhangi birinde aşılma olması

durumu malzemenin süperiletkenlikten çıkması anlamına gelir. Bu parametrelerin arasındaki ilişki Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Bir süperiletkenin sıcaklık, manyetik alan ve akım yoğunluğu arasındaki ilişkisi.

Günümüzde yapılan çalışmalar, bu parametrelerin daha uygun çalışma aralığına getirilmesini amaçlamaktadır.

4.4. I. ve II. Tip Süperiletkenler

Süperiletkenliğin keşfinden itibaren uzun bir müddet süperiletkenlerin tek tipte olduğu düşünülmüştür. Fakat ilerleyen yıllarda süperiletkenler, manyetik alandaki davranışlarına göre ikiye ayrılmıştır.

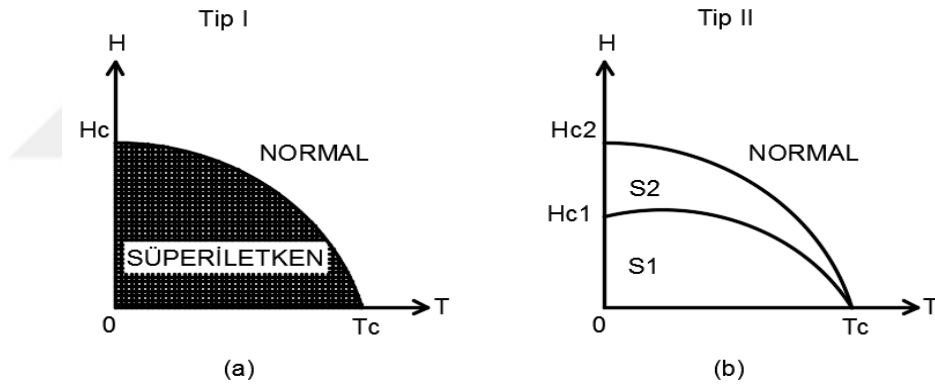
4.4.1. I. tip süperiletkenler

Süperiletkenler, süperiletkenlik gösterdiği H_c olarak bilinen belirli bir manyetik alan değerine sahiptirler. I. tip süperiletkenlik, bu H_c kritik manyetik alan değerinin belirli bir değere yükseltilmesiyle malzemede süperiletkenlik özelliğinin yok olması, normal hale geçiş yapması durumudur. Süperiletken, Meissner etkisinden çıkarak manyetik alanı içerisine nüfuz ettirir. Bu tip süperiletkenler, süperiletkenliğin keşfedildiği zamanlardaki iletkenlerdir. Daha sonra I. Tip süperiletkenler olarak adlandırılmışlardır. Örneğin; cıva, kalay, kurşun vb.

4.4.2. II. tip süperiletkenler

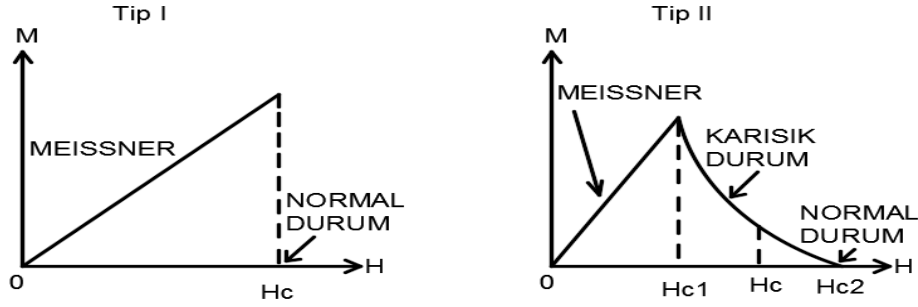
Bu tip süperiletkenlerde H_{c1} ve H_{c2} olarak adlandırılan iki adet manyetik alan değeri vardır. H_{c1} manyetik alan değerine kadar süperiletken I. tip ile aynı özelliktedir. Bu değerden H_{c2} değerine kadar ise manyetik akı süperiletkenin içerisine sızmakta olup, H_{c2} değerinden sonra ise malzeme normal faza geçiş yaparak süperiletkenlik özelliğini kaybetmektedir.

Şekil 4.7.'de manyetik alanın artmasıyla I. ve II. tip süperiletkenlerin verdiği tepki gösterilmektedir. (a) şekli I. tip süperiletkeni, (b) şekli de II. tip süperiletkeni ifade etmektedir. (b) şeklinde S1 ve S2 süperiletkenliği ifade etmektedir. B_c =kritik manyetik akı, T_c =kritik sıcaklıktır. Malzeme S2 aralığında süperiletken ile normal iletken arası özellik göstermektedir. Bir karışım aralığıdır.



Şekil 4.7. I. ve II. tip süperiletkenlerin kritik sıcaklık ve kritik manyetik alan altındaki davranışları.

Şekil 4.8.'de I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerin manyetik alanın durumuna göre mıknatıslanma eğrileri gösterilmiştir. H_{c1} ve H_{c2} manyetik alan değerleri arasında yeni bir durum olan karışık durum meydana gelmektedir. Bu durumda manyetik akı yoğunluğu $B \neq 0$ olup Meissner etkisi tam olarak oluşmamış olup, manyetik alan iletkenin içerisine sızarak ve bu olaya girdap denilmektedir.



Şekil 4.8. Manyetik alan artışına I. ve II. tip süperiletkenlerin tepkisi.

4.5. Süperiletkenler ile İlgili Literatür Araştırması

Süperiletkenlerin 1911 yılında Onnes tarafından keşfedilmesiyle yeni bir dönem başlamıştır. Onnes'in Helyum'u sıvılaştırması ile birlikte Fizik'te de yeni çalışmalar başlamıştır. 1911 yılından sonra da birçok malzemenin süperiletkenlik gösterdiği keşfedilmiş olup, yapılan çalışmalar kritik sıcaklık değerini en yüksek seviyeye, oda şartlarına yaklaştırmaya çalışmak olmuştur. Özellikle iletim ve dağıtım şebekelerinde süperiletkenlerin kullanılabilmesi kayıpları yok etmek ve enerjiyi istenilen voltaj seviyesinde taşıyabilmek açısından çok önemlidir. Bu yüzden de bu konuda birçok çalışma yapılmıştır.

4.5.1. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri

Üretim ortamındaki artan kısıtlamalar, çevresel duyarlılığa, enerji piyasalarındaki yükselen eğilimlere ve artan güvenilirlik gereksinimlerine verilen vurgu ile birleştiğinde, enerji endüstrisinde iletim ve dağıtım sistemleri için yeni teknolojiler geliştirmeye zorlanmaktadır. Bu yeni teknolojilerin aralarında birçok temel özelliği olması gerekir: esneklik, çevre dostu olma, yüksek verimlilik ve güvenilirlik. Yüksek Sıcaklık Süperiletken (HTS) kablo sistemleri bu kilit özelliklerin tümünü içerebilir.

Yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin keşfi, güç iletim ve dağıtım sistemlerine uygulamasına olan ilginin artmasına neden olmuştur. Henry L. ve arkadaşlarının 1989 yılında yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin kararlılık tahminleri üzerine bir çalışma yapmışlar ve bu çalışmada yeni yüksek sıcaklık süperiletken oksitlerin stabilitesini tip

II süperiletkenler için son 25 yılda geliştirilen yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin Tip II süperiletkenlerden çok daha yüksek bir stabiliteye sahip olduklarını çalışmada göstermişlerdir [15].

1991 yılında M. A. Hilal ve arkadaşlarının yüksek sıcaklık süperiletken birleşimleri üzerine yaptığı başka bir çalışmada yüksek sıcaklık süperiletkenleri (HTS) ile düşük sıcaklık süperiletkenleri arasındaki bağlantı özellikleri ve akım yoğunluğu anizotropisinin farklılıklarını ortaya koymuştur. Mevcut yoğunluğun enine, c eksenine boyunca ve uzunlamasına yönlerde ab düzleminde farklı kritik değerlere sahip olduğu yüksek sıcaklık süperiletken için kritik bir durum modeli varsayılmış ve süperiletkenlerde kritik akımdan daha düşük akım değerlerinde kayıpların meydana geldiği görülmüştür. Analiz boyunca iki boyutlu bir model göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçta da süperiletken kayıplarının HTS'de LTS'ye göre daha yüksek olduğu ortaya çıkarılmıştır [16].

S. Mukoyama ve arkadaşlarının 1999 yılında yaptıkları çalışmada HTS'yi güç kablosunda kullanmışlardır. Çalışmada yüksek sıcaklık süperiletken bantlarının katlama sırasındaki sarım aralıklarının ayarlanmasıyla 1 m uzunluğunda bir iletken imal etmişlerdir. Bu iletkenin iç katı dış kattan daha uzun sarım aralığına sahiptir. Deneysel sonuç münferit olarak katmanlarda akan akımların neredeyse aynı olduğunu ve bu iletkenin tek biçimli olmayan akım dağıtım iletkenlerinden daha düşük AC kayıplarına sahip olduğunu göstermiştir [17].

2003 yılında Brain K. Johnson ve arkadaşları süperiletkenlerin iletim ve dağıtım uygulamalarındaki etkinleştirilmesinde teknolojilerinin değerlendirilmesi çalışması yapılmıştır. Bu değerlendirme çalışmasında aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin keşfi, güç iletim ve dağıtım sistemlerine uygulanmasına olan ilginin artmasına neden olmuştur. Güç sistemlerinde süperiletkenliğin yaygın olarak kullanılmasından önce üstesinden gelinmesi gereken birkaç teknik zorluk vardır. Bunlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Geliştirilmiş süperiletken malzemeler, verimlilik,
2. Ucuz soğutma sistemleri,
3. Süperiletkenlikten normal durum iletkenlerine verimli geçişler,
4. Güç elektroniği.

Makalede bu sorunlar üzerine ayrıntılı bilgiler verilmiş olup, süperiletken güç teknolojilerinin yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamak için geliştirilmesi gereken temel etkinleştirme teknolojilerine bir bakış sunmuşlardır [18].

Haziran 2004 yılında Seungyon Cho ve arkadaşları da HTS kullanarak HTS güç kablosundaki AC akım dağılımının hesaplaması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada AC, HTS akım kablosunun tasarımı için önemli bir parametre olarak kullanılmıştır. AC akım kablosunun direnci skin effect etkisinden etkilendiğinden, AC akım kablosunda DC akım kablosuna oranla daha yüksek ısı açığa çıktığını yaptıkları deneysel çalışmada da 1260 A AC akımın 25 mm yarıçap ve 1,5 m uzunluğundaki AC akım kablosunda akarken, DC akım kablosuna göre yaklaşık %15 oranında artış yaşandığını tespit etmişlerdir. Akım dağılımının düzensizliğini ve skin effect etkisine bağlı olarak ortaya çıkan AC kaybını azaltmak için, bir AC akım kablosu, orijinal akım kablosundan daha küçük kesitlere sahip birkaç akım hattına bölünmüştür. Bu durumda, karşılıklı endüktansın etkisi önemli bulunmuştur. Bu nedenle, akım uçları sonlu aralıklarla dizildikçe, karşılıklı endüktansın etkisiyle AC kaybının ve akımın arttığı tespit edilmiştir. Bu artışlardan kaçınmak için, bölünmüş akım tellerinin bükülmesi, akım telleri dizisinin tek akım kablosu gibi davrandıklarını gösteren etki giderilerek dikkate alınmıştır [19].

Günümüze en yakın çalışma Mayıs 2019 tarihinde A. P. Drozdov ve arkadaşlarının yayınladığı makaledir. Yüksek basınç altında ve 250 K sıcaklıkta süperiletken özellik gösteren yoğunluk fonksiyonel teorisine dayanan ilk prensip hesaplamaları bu tür tahminleri mümkün kılmıştır ve konak atomun (kalsiyum, itriyum, lantan) oluşan bir kafesin merkezinde olduğu klatrat benzeri bir yapıya sahip yeni bir süperiletken hidrit ailesi önermişlerdir. Önceki en yüksek kritik sıcaklık ile karşılaştırıldığında yaklaşık

50 Kelvin artışı, yakın gelecekte oda sıcaklığında süperiletkenlik elde etme hedefine yönelik cesaret verici bir adımdır [52].

4.5.2. Süperiletken arıza akım sınırlayıcıları

Elektrik güç sistemlerinde zaman zaman farklı sebeplerle arızalar oluşabilmektedir. Bu arızaların meydana geldiği zamanlarda oluşan yüksek akımlar sistemde tehlikeli durumları oluşturabilmektedir. Bu akımların oluşturduğu termal ve dinamik etkilerden sistemdeki elemanların korunabilmesi için arıza akımlarının belli seviyede sınırlanması gerekmektedir. Süperiletken arıza akım sınırlayıcıları güç sistemlerindeki arıza seviyelerini kontrol altında tutmak için kullanılan yöntemlerden biridir. SFCL, reaktörlerin veya yüksek empedanslı trafoların tersine normal çalışma esnasında sisteme empedans eklemekten arıza akımını sınırlandırabilir. Süperiletken arıza akım sınırlayıcıların çalışma prensibi, süperiletken malzemenin çalışma durumu ve süperiletken olmayan durumu arasında geçiş yapabilme yani faz değiştirebilme özelliğine dayanmaktadır.

SFCL, kritik sıcaklığı altında soğutulmuş mevcut süperiletken malzemenin yük akımının akmasına direnç göstermemesi nedeniyle, normal çalışmada sistemde bir kayıp meydana getirmez. Arıza meydana geldiği zaman akım artar ve süperiletken malzemenin faz değişimine neden olan eşik değerin üstüne çıkar. Bu durumda arıza akımının ilk yarım periyodu içerisinde sisteme direnç gösterilmeye başlanır ve arıza akımı ilk tepe değerine ulaşmadan azaltılmış olur. Yani SFCL, arıza akımının ilk periyodu içerisinde arıza akımı seviyesini azaltma yeteneğine sahiptir. Arıza akımının ilk periyotta bastırılması, kararlı bir şekilde yüksek güç taşıyan güç sisteminin geçici durum kararlılığının artması ile sonuçlanır. Bu işlem sırasında süperiletken malzeme ısınır. Kısa bir toparlanma aşamasından sonra süperiletken malzeme soğutularak süperiletkenlik durumu tekrar sağlanır ve SFCL normal çalışmasına dönmüş olur [51].

Özetle, süperiletken arıza akımı sınırlayıcısı (SFCL), kesicinin anma değeri ile arıza akımı arasındaki uyumsuzluğu çözmek için kullanılan bir yöntemdir. SFCL, arıza

akımını düşürerek güç sistemleri üzerindeki olumsuz etkiyi azaltır ve sonuçta devre kesicilerin kapasitesini azaltabilir. Ayrıca, voltaj düşüşlerinin iyileştirilmesi gibi ek avantajlar da sağlayabilir.

Bu bölümde süperiletken arıza akım sınırlayıcıları üzerine yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir.

1993 yılında T. Hara ve arkadaşları da süperiletken malzemeler üzerine yaptıkları araştırmalarda konuya yeni bir bakış açısı kazandırmışlardır. Süperiletkenleri elektrik güç sistemlerinde kullanılmak üzere 6,6 kV/1500 A sınıfı süperiletken hata akım sınırlayıcısı tasarlamışlardır. Öncelikle bu makale sınırlayıcı bobin ile paralel olarak bağlanmış indüktif olmayan bir AC süperiletken bobinle birleştirilmiş (tetik bobini) içeren akım sınırlayıcı yeni bir süperiletken türü önermiştir. Ayrıca model elektrik enerjisi sistemi için bu tip süperiletken akım sınırlayıcıları uygulamaları oluşturulmuş, 400 V/100 A sınıfı model süperiletken akım sınırlayıcıları imal etmişler ve kısa devre akımlarına ve fazlarına göre geniş aralıkta çeşitli akım sınırlama testleri yapmışlardır. Bu şekilde elde edilen sonuçlarla mevcut tipte akım sınırlayıcı performansına sahip model sistemine uygulanması için yeterli görülmüştür. Ayrıca artan kapasite göstergesiyle prensipte gerçek güç sistemlerine uygulanabilirlik validasyon testlerinin izin verdiği bir ölçüde 6,6 kV/1500 A sınıfı süperiletken tetikleyici bobin geliştirmişler ve bu bobinin 1/30 faktöründe kısa devre akımlarını bir sınırlayıcı ile sınırlandırabildiğini göstermişlerdir. Çalışmada akım sınırlayıcı bir süperiletken tetik bobini ve paralel bağlanmış bir akım sınırlama bobininden oluşan yeni tipte bir süperiletken akım sınırlayıcı modeli geliştirilmiş ve üretilmiş, prototip olarak imal edilmiş ve çeşitli gerçekleri belirlenmiş akım sınırlayıcı ile çok büyük kısa devre akımlarını bastırma amaçlı yeni tip süperiletken tasarlanmıştır.

6,6 kV güç sistemine enerji sağlayan bir trafo merkezinin birkaç transformatörünün bu tür akım sınırlayıcılar vasıtasıyla belirtilen tipte süperiletken akım sınırlayıcısının uygulanması için umut verici bir modelin ön analizi belirtmişler, böylece bireysel trafoların bağlanmasına izin verilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca, yukarıda bahsedilen model sistemine uygulanarak bir 400V/100A sınıfı model süperiletken akım

sınırlayıcı üretmişler ve bu mevcut sınırlayıcının çalışma özelliklerini kısıtlamalar dikkate alınarak değerlendirmişlerdir. Sonuçlar kısa devre akımının ve kısa devre fazının büyüklüğü değiştiğinde ve akım sınırlandırmanın güvenilirliğinin yanı sıra sistemin tekrar tekrar çalışması, mevcut akım sınırlayıcıların model sistemine uygulanabilirliği açısından bir sorun teşkil etmediğini göstermişlerdir.

Bu sonuçlara dayanarak, 1500 A sınıfı bir süperiletken model olarak 6,6 kV aynı voltajda çalışan tetik bobin sistemi geliştirilmiş ve 200 MVA kısa devre jeneratörü kullanılarak bu bobinin mevcut sınırlayıcı performansı değerlendirmişlerdir. Mevcut akım sınırlayıcının kurulumu, 54,5 kA'lık bir olası kısa devre akımını 1/30 (1800 A) faktörle sınırlamakta başarılı olduğunu elde edilen sonuçlar doğrulamışlardır [20].

Lin Ye ve arkadaşları 2002 yılında IEEE dergisinde süperiletken arıza akım sınırlayıcılarının elektrik güç sistemleri üzerinde uygulama çalışmaları konusu üzerine bir makale yayımlamışlardır. Bu makale, SFCL'lerin kullanılmasıyla güç sistemi kararlılığının iyileştirilmesine yönelik ayrıntılı bir teorik analiz sunmaktadır. SFCL'ler; jeneratör rotorları tarafından meydana gelen arızalardan sonra hızlanmalarını engelleyerek, elektrik güç sistemlerinin geçici kararlılığını arttırmada ve güç kalitesini iyileştirmede etkilidirler. Bu makalede, farklı voltaj seviyelerindeki güç sistemlerinde süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarını kullanmak için temel uygulama yönergeleri özetlenmiştir. SFCL'lerin güvenli ve doğru kullanımını sağlamak için, SFCL'ler ve güç sistemleri arasındaki etkileşime dair gelecekteki bazı düşünceler de sunulmaktadır. Çalışma ayrıca SFCL'lerin farklı türlerinin seçimi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Güç sistemlerinin geçici kararlılığını arttırmak için, en büyük önlemlerden biri, şebekenin eşdeğer reaktansının azaltılmasıdır. Yüksek voltajlı güç sistemlerinde, hatların ve transformatörlerin reaktif dirençleri, aktif dirençlerinden çok daha büyüktür. Hata durumlarında, (örneğin endüktif blendajlı çekirdek SFCL gibi) SFCL'lerin reaktans tipi kullanılıyorsa, reaktanslar arıza akımını sınırlamak için şebekeye manyetik olarak eşleşecektir. Sistemin artan zaman sabiti nedeniyle kısa devre akımı yavaşça kaybolmaktadır. Bu nedenle, endüktans değerinin, mevcut koruyucu cihazlarla işbirliği içinde özenle seçilmesi gerektiği belirtilmektedir. Rezistif SFCL ile karşılaştırıldığında, ekranlı çekirdek SFCL yalnızca AC akımları için

uygulanabilir olmanın ve çok daha büyük boyut ve ağırlığa sahip olmanın dezavantajını gösterir. Öte yandan fren dirençleri gibi rezistif tip SFCL'ler, sadece arıza akımını kısıtlamakla kalmaz aynı zamanda arıza durumunda jeneratörlerin elektriksel gücünü tüketir. Rezistif tip SFCL, aşırı kinetik enerjiyi baskılayarak güç sistemlerinin geçici kararlılığını arttırabilir.

Düşük voltajlı güç sistemleri için, özellikle dağıtım sisteminde, besleme kablolarının dirençleri onların reaktanslarından daha büyüktür. Eğer besleme kablosunun sonunda arıza meydana gelirse, arıza akımı seviyeleri besleme kablosunun dağıtılmış kapasitansları nedeniyle uygun kesici kesme değerlerini aşacak şekilde yükselebilir. Açık devre kesicilerini kullanmak ve besleme kablolarının kullanım alanlarının artmasını önlemek için reaktans ya da rezistif tip SFCL'ler arıza akımlarını limitlemek için besleme pozisyonlarının sonuna montaj edilebilir.

Çalışmanın sonunda teorik analiz ve dijital simülasyonlar; güç şebekesinde SFCL'ler kullanılmasının güç sisteminin kararlılığını arttırdığını göstermiştir. SFCL'ler bara bağlantı pozisyonları gibi stratejik noktalarda kullanılırsa, voltaj düşüşleri azaltılabilir ve bara voltajı bir hata sırasında kabul edilebilir bir seviyede tutulabilir, böylece güç kalitesi de artar.

Bu çalışmada Lin Ye ve arkadaşları SFCL'lerin faydalarını şu şekilde açıklamışlardır: Her barada arıza durumunda büyük bir artış olmadan ayrı baralar birbirine bağlanabilir, devre kesici yükselmeleri olmadan barada artan talepleri karşılamak için büyük bir trafo kullanılabilir, yeni güç seviyesinde voltaj regülasyonunu sürdürmek için ve trafoya zarar vermeyi sınırlamak için düşük empedanslı bir trafo kullanılabileceği yönünde görüş sunmuşlardır [21].

Ağustos 2009 yılında yine IEEE dergisinde yayınlanan bir çalışmada Yukinaga Morishita ve arkadaşları, "Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcı" kavramını DC dağıtım şebekesi üzerinde kesici uygulamalarında göstermiştir. Bu makalede hata akımının süperiletken bir hata akımı sınırlayıcısı (SFCL) ile sınırlandırılmasını ve bu sınırlı

akımın daha sonra bir dc devre kesicisi tarafından kesilmesini öneren bir çalışma sunulmuş olup, SFCL ile DC kesici ve bunların birlikte kullanımlarını ayrı ayrı incelemişlerdir. Bu yazıda, öncelikle çeşitli gazlar ve LN₂ kullanarak DC devre kesicilerinde DC kesinti performansı araştırılmıştır. Daha sonra, bir süperiletken kablodaki kısa devre akımının sınırlanması için SFCL kullanarak, DC akım sınırlama performansı araştırılmıştır. Sonunda, SFCL ve DC devre kesicinin kombinasyonu üzerinde çalışılmış ve etkinliği gösterilmiştir. Sonuçlar, H₂'nin DC kesinti performansının LN₂'den daha üstün olduğunu doğrulamıştır. Bunun sebebi, kesinti voltajının sınırı yüksek ve ark süresi kısa olmasıdır. Ayrıca, H₂ devre kesicinin DC kesinti performansının, çalışma basıncını yükselterek ve bir mıknatıs kullanarak geliştirildiği doğrulanmıştır. Öte yandan, LN₂ kesicisinin DC kesinti performansı puffer tipi tasarım kullanılarak geliştirilmiştir, ancak yine de H₂ devre kesicininkinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, bir LN₂ puffer kesici kullanan ekipmanın boyutu, H₂ kesicisinininkinden daha büyük olması sebebiyle, H₂ kesicisinin, sadece boyut dikkate alındığında daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, aşırı kısa devre akımının kesilmesi için bir SFCL kullanılması gerekli olduğu belirtilerek, H₂ kesicisi için SFCL, H₂ kesicisinin dışına bağlanmıştır. Buna karşılık, SFCL ve LN₂ puffer kesicisinin ara kısmı aynı ekipman parçası içinde birleştirilebilmesi sebebiyle, SFCL ve LN₂ puffer kesici kombinasyonu, H₂ kesicisi için mümkün olmayan bir minyatürleştirme derecesi sağlayacak şekilde entegre edilebileceği görüşü sunulmuştur [22].

Haziran 2011 yılında bu kez SFCL'lerin güç dağıtım sistemindeki gerilim düşümlerine etkileri üzerine Jong-Fil Moon ve arkadaşları bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada direnç tipi SFCL, deneysel sonuçlara göre PSCAD/EMTDC yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Dağıtım sistemindeki azalmanın mekanizması açıklanmıştır. Daha sonra 6 vaka incelenmiştir. Gerilim büyüklükleri ve sarkma süreleri, arıza yerine ve SFCL'nin empedans değerine göre analiz edilmiştir. Daha sonra, Kore'nin tipik güç dağıtım sistemi modellenmiştir. SFCL başlangıç noktalarından besleyicilerin bitiş noktalarına kadar çeşitli yerlere monte edildiğinde, bir hata meydana geldiğinde müşterinin yüklerinin Teknoloji Endüstrisi Konseyi Bilgi (ITIC) eğrisi kullanılarak voltaj düşüşünün iyileştirilmesi değerlendirilmiştir. Tüm durumlar için düşüşler,

yüklerin kolayca açılmasını tespit etmek için birkaç yükün ITIC eğrileriyle sunulmuştur. Son olarak, sıfırlanan yükler, sıfırlama OCR (over-current relay) ve yeniden kapamayı (recloser) içeren tüm durumlar için sunulmuştur. Sonuç olarak, SFCL'nin kurulumu sarkmaların voltaj büyüklüğünü önemli ölçüde iyileştirdiği ve düşme (sag) süresini kötüleştirdiği tespit edilmiştir. Kötüleşen sarkma süresi, OCR ve recloser cihazının sıfırlanmasıyla iyileştirilebileceği ve gelecekte, koruyucu koordinasyonu göz önünde bulundurularak OCR'nin sıfırlanması gerektiği yönünde görüşle çalışma sonlandırılmıştır [23].

2012 yılında yine süperiletken hata akımı sınırlayıcıları ve bunların elektrik güç sistemine uygulanması üzerine Antonio Morandi tarafından yapılan bir çalışma Physica dergisinde yayımlanmıştır. Bu makalede, uygulamalar için geliştirilmiş süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarının performans durumu açıkça özetlenmiş ve bu cihazın güç sistemlerinin tasarım ve işletim paradigması üzerindeki potansiyel etkileri analiz edilmiştir. Özellikle, FCL'lerin daha fazla orta gerilim baralarının bağlanmasına izin vermek için bir araç olarak kullanılması, kritik müşteri tarafından indüklenen voltaj bozulmalarına karşı artan dayanımı tartışılmıştır. Daha fazla dağıtılmış üretim tesisinin dağıtım şebekesine entegre etme imkanı da göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçta bu çalışmada süperiletken arıza akım sınırlayıcılarının bilimsel olarak durumu analiz edilmiş ve daha gelişmiş malzemelere olan ihtiyaca (YBCO (yttrium Barium Copper Oxide) kaplanmış iletkenler) işaret edilmiştir. Yenilikçi FCL kavramı da tartışılmış ve MgB_2 'nin (Magnezyum Diborid) potansiyeli özetlenmiştir. Güç sistemlerinde FCL'lerin tasarım ve işletimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Özellikle bu cihazın kullanımı MV barasının daha fazla birbirine bağlanmasına izin vermek için indüklenen voltaj bozulmalarına karşı artan bağışıklık ortaya konmuştur. Özetle dağıtım şebekesine FCL aracılığıyla daha fazla dağıtık üretim entegre edilebilme durumu ortaya konmuştur [24].

Lin Ye ve arkadaşları 2017 yılında süperiletken arıza akım sınırlayıcısının elektrik dağıtım şebekelerinde uygulamaları üzerine bir yazı yayımlamışlardır. Bu yazıda, elektromanyetik geçici programa dayalı kısa devre analizi, bir elektrik dağıtım şebekesine kurulan SFCL'nin çalışma davranışını araştırmak için kullanılmıştır.

Sistem çalışmaları, SFCL'nin sadece arıza akımını kabul edilebilir bir değerle sınırlamakla birlikte aynı zamanda voltaj düşüşünü de azaltılabileceğini göstermiştir. Geçici geri kazanım voltajı (TRV), hatayı gidermek için devre kesici açıldıktan sonra SFCL'nin varlığıyla dikkate değer ölçüde azaltılabileceği ve geliştirilebileceği yönünde görüş sunulmuştur [25].

4.5.3. Güç iletim ve dağıtım sistemlerinde süperiletken uygulamaları

Süperiletkenlerin keşfedilmesinin ardından hızla çalışmalar devam etmiş ve güç sistemlerine de entegrasyonu sağlanmaya başlamıştır. Özellikle süperiletkenler ile kayıpların azaltılması fikri birçok bilim insanının bu yöne çevrilmesine sebep olmuştur. Şekil 4.9.'da enerji sistemlerinde süperiletken uygulanmasına yönelik Amerika'da gerçekleştirilen projeden bir resim paylaşılmıştır.



Şekil 4.9. Enerji sistemlerinde süperiletken uygulaması [47].

C. Matheus ve arkadaşları süperiletken kabloları endüstriyel dağıtım şebekesine uygulama çalışmasında Bayer Endüstri Hizmetleri'nde hem geleneksel kablolar ile hem de süperiletken kablolar ile endüstriyel bir dağıtım ağı planlamıştır. Sonuçlar, süperiletken kullanımının teknik ve ekonomik açıdan mümkün olduğunu göstermiştir. Ayrıca süperiletken kablolarla konvansiyonel kabloların birebir değiştirilmesinin ekonomik faydalar sağlamadığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, 110 kV seviyesindeki konvansiyonel kablolarla 25 kV seviyesindeki süperiletken kablolar yer değiştirilirse, süperiletken kablolar özellikle geleneksel kablolardaki transformatörler ve kesiciler

üzerindeki maliyet açısından daha pahalı olabileceği belirtilmiştir. Süperiletken kablolar ve soğutma sistemleri için iyimser bir maliyet tahminiyle, süperiletken ağların yıllık maliyetleri, geleneksel ağa göre %20'nin altında olduğu, 25 kV seviyesinin 5/10 kV seviyeyle değiştirilmesi durumunda, 25 kV seviyesindeki ucuz ekipman maliyetleri ve dolayısıyla daha düşük tasarruf potansiyeli nedeniyle yapılan varsayımlar altında hiçbir maliyet tasarrufunun mümkün olamayacağı gözlenmiştir. Sonuç olarak, Bayer Endüstri Hizmetleri şebekesindeki en ilginç uygulama 110 kV seviyesindeki geleneksel kablolarla 25 kV seviyesindeki süperiletken Triax kabloların yer değiştirmesi olduğu ve burada tartışılan çözümlerin dışında, planlanan zamandaki standartlar tamamen göz ardı edilmeden kalınırsa, bu 25 kV'luk ağ daha basit bir şekilde planlanabileceği yönünde görüş sunulmuş ve bunun araştırılacağı belirtilmiştir [26].

Paul M. Grant 1997 yılında süperiletkenlik ve elektrik gücü üzerine hazırladığı bir çalışmada süperiletkenliğin elektrik gücüyle bir araya gelmesinden bahsetmektedir. Bu çalışmada süperiletkenliğin keşfinden itibaren elektrik işletmesinin geleceğinde büyük rol oynayacağı yönünde görüşler belirtmiş olup, süperiletkenlik için yüksek geçiş sıcaklıklı malzemelerin ortaya çıkışı, pratik tel geliştirme yoluyla güç teknolojisine uygulanmasında ve elektrik endüstrisinin yeniden düzenlenmesi, yeniden yapılandırma ve gelişmiş ülkelerle rekabet ve geliştirmekte olan ülkelerde ise patlayıcı büyüme bir rönesansa yol açtığından bahsetmektedir. Çalışmada Amerika'nın elektrik güç sistemini ele almıştır. Ve süperiletkenlikte meydana gelen tüm gelişmelerden bahsetmiştir. Süperiletken trafolarla, güç kablolarına ve depolama cihazlarına daha fazla ağırlık vererek, yüksek voltajlı iletim kablolarının azaltılması ihtiyacının olacağı yönünde tahminlerde bulunmuştur. Makalede, özellikle HTSC tel fiyatlandırması ve uygulamaya yönelik performans özellikleriyle ilgili olarak, birçok önemli konuda uygulanan süperiletkenlik topluluğu içinde açık tartışmayı öne sürmüştür. Sonuç kısmında tüm göstergelerin süperiletkenlikle elektrik gücünün dinamik olarak yeni bir aşamaya girdiği yönünde görüşlerini belirtmiş ve bu yönde çok çalışmalar yapılması gerektiğini belirtmiştir [43].

N. Amemiya ve arkadaşları 1995 yılında harici manyetik alana maruz kalan çok filamentli süperiletkenlerde AC kayıpları ve akım dağılımlarının analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çok katlı süperiletkenlerdeki akım dağılımının zamansal gelişimi elektrik devresi modeli ile hesaplanmıştır. Dış manyetik alanın eksenel olarak dağılmış boyuna bileşeninden büyük ölçüde etkilendiğinden taşıma akımı ve uzunlamasına manyetik alan, doymuş bölgedeki histerezis kaybını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Yönü, taşıma akımının yönü ile aynı olan bazı büyüklükteki boyuna manyetik alan, çok eksenli süperiletkene saat yönünde bükülmüş olarak uygulandığında, bu bölgedeki histerezis kaybını bastırmak için doymuş bölgenin kaybolduğu tespit edilmiştir. Eksenel olarak dağıtılmış uzunlamasına manyetik alan, akım dağılımındaki eksenel varyasyona yol açmakta olup, bu durum da ek kuplaj kaybına neden olduğu görülmüştür. Bu çalışmada taşıma akımının ve uzamsal olarak kayıplara yayılmış olan dış manyetik alanın boyuna bileşeninin etkisi incelenmiştir. Taşıma akımı ve ve uzunlamasına manyetik alandan kaynaklanan ek kayıplar, enine manyetik alandan kaynaklanan kayıplarla karşılaştırıldığında ihmal edilemez olduğu ortaya çıkarılmıştır [27].

Kayıpların azaltılması bir sistem için çok önemlidir. Bu yüzden de bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin; 1999 yılında IEEE dergisinde yayımlanan Tetsuya Fukunaga ve arkadaşlarının çalışmasında süperiletken bant ve kabloların akım dağılımları ve AC kayıpları konusundadır. Süperiletken bantlar ve kablolar için kendi alanlarındaki alternatif akım kayıpları sayısal hesaplamalar kullanılarak incelenmiştir. Hesaplama, rastgele kesit geometrisine sahip düz süperiletkenler için akım dağılımları ve kendi alanındaki kayıpları, akım genliğinin bir parametresi olarak hesaplanır. 7 filamanlı bantlar için, kayıplar 7 filament numunelerinde deneysel olarak da gözlenen filament konfigürasyonlarına bağlıdır. Kablolarda, kayıp değerleri, bant dizilişlerinden büyük ölçüde etkilenir. Bir tip aynı banttıan oluşan değiştirilmiş kabloların kayıpları, birbirinden farklıdır. Bu sonuçlar, bant ve kablo yapısının optimizasyonunun, yani kablolardaki süperiletken çekirdeklerinin düzenlenmesi, kablolardaki kayıp üretimlerini azaltmak için yararlı olduğunu göstermektedir [28].

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri, kablo tasarımında oldukça fazla kullanılmış olup, AC kayıpların azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. 2004 yılında Akira Watabe ve arkadaşları koaksiyel çok katmanlı yüksek sıcaklık süperiletken kablonun AC kayıp ve akım dağılım karakteristiklerinin nümerik analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, koaksiyel çok katmanlı kablo iletkenlerindeki katmanlar arası akım dağılımlarını ve AC kayıplarını hesaplamak için sayısal bir model geliştirilmiştir. Dört katmanlı kablolardaki katmanlar arası akım dağılımları ve AC kayıpları, bükümlü çitler ve kabloların büküm yönlerinin çeşitli kombinasyonları için sayısal olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde, katmanlar arası akım dağılımını eşitlemek ve AC kaybını azaltmak için büküm aralığı kombinasyonları incelenmiştir. Sayısal sonuçlarla, katmanlar arası akım dağılımının uygun büküm aralığı kombinasyonu seçilerek, tek tip olabileceği gösterilmiştir. Sayısal sonuçlar ayrıca, katmanlar arası akım dağılımının eşitlenmesine rağmen, farklı büküm konfigürasyonlarına sahip kablolardaki AC kayıpların farklı olduğunu göstermiştir. Bu analitik sonuçlar, kayıpların ve bükülmüş parçalardaki akım dağılımları ve kabloların yönüne olan dikkate değer bağımlılığını göstermiştir. Kablonun büküm yapılandırmasını tasarlamak için katmanlar arası akım dağılımını AC kaybıyla birlikte analiz etmek önemlidir. Optimize edilmiş kablo yapıları sayısal sonuçlarla tartışılmıştır [29].

A. P. Malozemoff ve arkadaşlarının 2002 yılında yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin güç uygulamaları üzerine yayımladıkları makalede, HTS uygulamaları için açık kalan teknik zorlukların yanı sıra, kilit avantajlar da gözden geçirilmiştir. HTS'nin prototipleşen uygulamalarından bahsetmişlerdir. Özetle HTS ekipmanın avantajları vardır ve tüm dünyada aktif olarak prototipleştirilmektedir. DC HTS telindeki ilerleme göz önüne alındığında, bu kabloyu kullanan HTS kablosu ve dönen makineler ilk önce tam ticari hale gelecektir şeklinde görüş sunmuşlardır [46].

William V. Hassenzahl ve arkadaşlarının 2004 yılında hazırladığı “Süperiletkenliğin Elektrik Enerjisi Uygulamaları” adlı makalesinde dört süperiletken güç uygulamasının tarihsel gelişimini ve teknoloji durumunu ele almaktadır: kablolar, süperiletken manyetik enerji depolaması (SMES), hata akımı sınırlayıcıları ve transformatörler. Makalede süperiletken kablolar, enerjinin AC ve DC iletimi, arıza akım sınırlayıcılar

ve SMES sistemlerinin ayrıntılı olarak geçmişten makalenin yazıldığı güne incelemeleri yapılmış ve karşılaştırmalar da yapılarak yorumlanmıştır. HTS güç kablosuyla ilgili olarak yapılan projelerden de makale bahsetmektedir. SCFCL'lerin elektrik şebekelerinde, endüstriyel sistemlerde ve yalıtılmış güç sistemlerinin tüm voltaj seviyelerinde uygulanabilirliğinin teknik ve ekonomik faydalar sağlayacağından bahsetmişlerdir. SCFCL'lerin orta gerilimlerde kullanılmasının teknik olarak mümkün olduğunu ve bazı projelerin zaten yüksek gerilimlerde ilk prototipleri hedeflediğini göstermiştir. Çalışma sonucunda süperiletkenlerin 15 yıl boyunca hizmet sisteminde önemli bir şekilde kullanılacağı yönünde bir görüş sunmuşlardır [44].

2005 yılında T. Hamajima ve arkadaşları tarafından yapılan trifaze HTS kablosunun üç fazlı akım dağılım analizi çalışması IEEE Transactions on Applied Superconductivity dergisinde yayımlanmıştır. Daha önce zırlı olan ve olmayan tek fazlı bir koaksiyel kablodaki akım dağılımlarını analiz etmiş olan grup bu çalışmada üç fazlı kablolar üzerinde çalışmışlardır. Üç fazlı kablolar genellikle üç tek fazlı kablodan oluşur. Bununla birlikte, konsantrik üç fazdan oluşan üç eksenli bir kablo, azaltılmış HTS bantları ve sızıntı alanı nedeniyle, üç koaksiyel kabloya kıyasla daha fazla avantaja sahiptir. Üç eksenli kabloda diğer fazları dikkate alarak ana katman akımını ve akım yoğunluğu dağılımını yöneten denklemleri türetiriz. Akım ve akım yoğunluğu dağılımları, yarıçap, büküm aralığı ve bükülme yönü gibi kablo yapım parametrelerinin açık fonksiyonları olarak tanımlanmaktadır. Yeterli kablo yapısı parametrelerini seçerek homojen akım ve akım yoğunluğu dağılımlarını hesaplamışlardır. Üç eksenli kablonun kompaktlığı ve azalan HTS bantları gibi büyük avantajları olduğu için, kablonun tabaka akımlarını düzenleyen temel denklemleri üç faz dikkate alarak türetmişler ve daha sonra, homojen tabaka akım dağılımları için büküm aralığı ve yönü gibi kablo parametrelerini belirlemek için ilişkileri yönlendirmişlerdir. Önerilen teori, her faz için iki katmandan oluşan basit üç eksenli kabloya uygulanmıştır. B fazındaki çoğu iç katmanın büküm eğimi ve yönü ayrı ayrı belirlenmiştir. İkinci katmanın bükümünün ters yönde olduğu ve b fazındaki birinci katmana ters orantılı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, kablodaki tüm katmanların mevcut yoğunluğu ile ilgili temel denklemleri türetmişler ve her biri için 2 katmandan oluşan

basit üç eksenli kablo bileşimine uygulamışlardır. Sonuçların homojen katman akımlarıyla benzer olduğunu göstermişlerdir [30].

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri ile ilgili bir çalışma da Benjamin Wade McConnell ve arkadaşları tarafından 2005 yılında “Doğru Akım Elektrik Güç İletimi ve Dağıtımı için Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri Uygulamaları” başlıklı çalışmadır. Bu makale, DC iletim ve dağıtım uygulamalarının tarihçesini ve yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin, modern kriyojenik sistemlerin ve kriyojenik güç elektroniğinin potansiyel sağlayan teknolojiler olmasının nedenlerini tartışmaktadır. Bu yüksek akım, süperiletken DC sistemlerinin elektrik şebekesine entegrasyonundan sonra ortaya çıkan ekonomik ve performans iyileştirmeleri, beklenen potansiyel operasyonel faydalarla birlikte sunulmaktadır. Olası kablo ve doğrultucu-invertör konfigürasyonları, hem iletim hem de dağıtım şebekelerinde DC kablo teknolojisine önemli ölçüde nüfuz etmek için aşılması gereken teknik ve ekonomik zorluklarla birlikte özetlenmiştir. Son olarak, gelecekteki elektrik şebekesinde yüksek akım DC iletimi ve DC dağıtımı için büyük ölçekli uygulamalar elde etmek için gereken adımlar özetlenmiştir.

Bu makaledeki analiz, DC iletim ve dağıtım teknolojisinin HTS malzemelerinin uygulamasından önemli ölçüde fayda sağlayabileceğini göstermektedir. Ek olarak, bu analizde yapılanlar gibi değerlendirmeler, HTS teknolojisinin DC iletim ve dağıtımına nihai olarak başarılı bir şekilde uygulanması için gereken destekleyici teknolojiye ilave araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu da belirlemektedir. Bunları aşağıda verildiği gibi özetlemiştir.

- Yüksek akım ve orta gerilim (50–100 kV) çalışması için tasarlanmış inverterlerde olası maliyet düşüşlerinin gösterilmesi,
- Kriyo soğutucuların azaltılmış sermaye maliyeti,
- Kriyostat maliyetlerinde azalma,
- Gerekli geçici ve statik dielektrik performansın gösterilmesi,
- Dalgalanma ve yük değişiminden kaynaklanan AC kayıplarının ihmal edilebilir veya yönetilebilir olduğunun doğrulanması,

- Sahaya ve uygulamaya bağı olabilecek enerji dışı faydalar oluşturmaktır [31].

Aralık 2005 yılında DC düperiletken kablolarla elektrik enerjisi iletiminin fizibilitesi üzerine Pritindra Chowdhuri ve arkadaşı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada iki güç değeriindeki (3 GW ve 500 MW) DC süperiletken kabloların elektriksel özellikleri incelenmiştir. İki güç değeriinin her biri için iki tasarım dikkate alınmıştır. İlk tasarımda, kriyojenin besleme akımı, yüksek voltajlı yüksek sıcaklık süperiletken silindiri ile çevrilidir. Kriyojenin return akımı sistemin topraklanmış tarafındadır. İkinci tasarımda, kriyojenin hem supply hem de return akımları kablonun topraklı tarafındadır. Bu kabloların iki elektriksel özelliği incelenmiştir:

1. Arıza akımları,
2. Akım harmonikleri.

DC akım ileten kabloların çalışmasında ne hata akımının ne de akım harmoniklerinin sorun yaratmadığı sonucuna varılmıştır. Ne hata akımı ne de akım harmonikleri sabit durum çalışmasını etkilemez veya DC süperiletken kablonun performansını düşürmediği belirtilmiştir. Kablo sisteminin topraklanmış tarafındaki kriyojenin hem GO hem de RETURN akışlarına sahip olan tasarım, kablo sisteminin maliyet etkinliğinin yanı sıra güvenilirliğini de arttıracığı belirtilerek, bu tasarımın optimize edilebilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu da ayrıca belirtilmiştir [32].

Satoshi Fukui ve arkadaşları, yüksek sıcaklık süperiletkenleri ile ilgili yaptıkları çalışmada bir üç fazlı AC güç aktarımını yapabilmek için çok katmanlı üç eksenli HTS kablosunun kayıp ve akım dağılım karakteristiklerini analiz etmişlerdir. Bu makalede, üç eksenli çok katmanlı üç fazlı kablo iletkenlerinde katmandan katmana akım dağılımları ve AC kayıpları üzerine sayısal çalışmalar sunulmuştur. Simülasyonlar, kablo büküm konfigürasyonunun tabaka-tabaka akım dağılımı ve 3 fazlı AC işlemi altındaki AC kaybı üzerindeki etkisini araştırmak için, büküm aralığının çeşitli kombinasyonları ile 2 katmanlı ve faz konfigürasyonlarının üç eksenli kabloları için gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçlardan, düzgün katmandan katmana akım dağılımları için büküm adım kombinasyonlarının bulunabileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte,

sayısal sonuçlar, AC kaybının, tabakadan tabakaya akım dağılımını eşitleyerek azaltılamayacağını da göstermiştir. Bunun nedeni, süperiletken katmanlar boyunca mevcut yoğunluk profillerinin sayısal verilerinden açıklığa kavuşturulur. Kablo tasarımı için, sadece akım dağılımının eşitlenmesini değil, aynı zamanda AC kaybının en aza indirilmesini de dikkate alarak uygun büküm konfigürasyonunun seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Sonuçlar ayrıca, tabakadan tabakaya akım dağılımının eşitlenmesinin beklenmedik bir şekilde AC kaybının azaltılması için etkili olmadığını göstermiştir. AC kaybının minimize edilmesi ile birlikte akım dağıtım kontrolünü göz önünde bulundurarak kablonun optimal yapısını tasarlayanın gerekli olduğu görüşü sunulmuştur [33].

2006 yılında A. P. Malozemoff'ın hazırladığı elektrik şebekelerinde kullanılması için üretilen yeni nesil süperiletken ekipman üretimi konulu çalışma, IEEE'de yayımlanmıştır. Bu çalışmada özellikle HTS güç kabloları ve arıza akım sınırlayıcılar konusunda geliştirilen teknolojilerden bahsedilmektedir. Hazırladığı makalede 2006 yılına kadar yapılan projeler hakkında bilgiler verilmektedir. HTS güç ekipmanları konusunda büyük adımlar atıldığından ve ticarileşmeye hazır olduğundan bahsedilmektedir. Ayrıca HTS kablolarının, HTS motorlarının ve jeneratörlerinin ticari seviyelerde olduğuna dikkat çekilmektedir. Transformatörlerin yanı sıra FCL'ler de yeni nesil HTS kablo işlevselliği gerektirdiğini, yüksek direnç stabilizatörleri ve düşük kayıplı elektrik teli sistemleri üzerinde çalışmaların aktif olarak yürütüldüğünü belirtilmiştir. Elektrik şebekesindeki acil ihtiyaçlar göz önüne alındığında, pratik HTS güç ekipmanının gelişiminin önemli bir etki yaratması beklendiği şekilde çalışma özetlenmiştir [45].

Haziran 2011 yılında Doan A. Nguyen ve arkadaşlarının da süperiletken kablolarda akım dağılımı ve AC kayıp ölçümü üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu makale, Yüksek Sıcaklık Süperiletken (HTS) kabloları için katmanlar arasındaki AC kaybını ve akım dağılımını ölçmek için yeni deneysel tesisini ve tekniklerini sunmaktadır. Tesis, yüksek akım trafoları ile faz başına 5 kA'ya kadar üç fazlı akımlar sağlayabilen 45 kVA'lık bir üç fazlı güç kaynağı ile güçlendirilmiştir. Sistem, HTS kablolarındaki AC kaybı mekanizmalarını daha iyi anlamak için 20-500 Hz arasındaki

herhangi bir frekanstaki ölçümler için uygundur. Bu yazıda, HTS ekranlama katmanı olan ve olmayan çeşitli HTS kablolarında gerçekleştirilen AC kaybı ölçümleri için teknikleri ve sonuçları rapor etmişleridir. Ekranlama katmanı olmayan kablolarda, manyetik alanların geri dönüş akımlarından kayıp ölçümlerine etkisini kontrol etmeye özen gösterilmesi gerektiği belirtilmiştir. Eksenel manyetik alanın dalga formu, iki katmanlı bir kablonun içine yerleştirilmiş küçük bir toplama bobini ile de ölçülmüştür. Bu yazıda, aynı zamanda kablonun AC kaybı davranışını doğrudan etkileyen çok önemli bir parametre olan iki katmanlı bir kablodaki katmanlar arasındaki akım paylaşımını ölçmek için sistem kullanılmıştır. Kapsam, ölçülen kabloların özelliklerini tartışmak yerine, çeşitli HTS kablolarında ac kaybını ve akım paylaşımını ölçmek için deneysel teknikler sunmaya odaklanmaktadır. HTS ekranlama katmanı olan bir kablo için, blendaj, geri dönüş akımı için kullanılabilir. Bu kurulumla, toplam kablo AC kayıpları ya çıkartıcı ya da ilave tekniklerle ölçülebilir. Manyetik bağlanma nedeniyle, her iki yöntem de kalkanda veya çekirdekte oluşan gerçek AC kayıplarını sağlayamadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ilave teknik, her katmanda tüketilen enerjiyi sağlayabildiği ve HTS blendajsız bir kablo için, geri dönüş akımının konumu ve yönü, AC kaybı ölçümlerinin sonuçlarını güçlü bir şekilde etkilediği belirtilmiştir. Gerilim döngüsünün yeri ve yönü de kayıp ölçümlerinin doğruluğu için önemlidir. Dönüş akımının farklı konumlarına sahip olan deneyler, dönüş akımı tarafından oluşturulan manyetik alanların HTS kablosuna uygulanacağını ve önemli hatalara neden olacağını göstermiştir. Son olarak, iki katmanlı bir kablodaki akım paylaşımı, kablonun içine yerleştirilmiş bir toplama bobini ile ölçülebilen eksenel alanın dalga biçimlerinden belirlenebileceği belirtilmiştir [34].

Mark Stemmler ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları çalışmada kentsel alan dağıtım şebekelerinde YG kablolarını süperiletken kablolar ile değiştirmiş ve bu çalışmada yalnızca süperiletken kablo sistemlerinin kullanılmasıyla mümkün olabilecek tamamen yeni bir dağıtım kavramını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, süperiletken ve geleneksel kablolar dahil olmak üzere çeşitli farklı kablo seçenekleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, süperiletken 10 kV kabloların, kentsel alanlarda basitleştirilmiş 110/10 kV trafo merkezlerine giden geleneksel 110 kV kabloları değiştirmek için teknik ve ekonomik olarak uygun araç olduğu ortaya çıkmıştır.

Toplamda, konsantrik orta gerilim HTS kablo sistemlerinin kullanılması, kentsel alan güç kaynağı için yeni ve oldukça çekici şebeke konseptleri sağlayacağı görüşü sunulmuştur [35].

2013 yılında Mustafa Ali Elsherif tez çalışmasında süperiletken teknolojilerinin Elektrik Güç Sistemlerindeki uygulamalarından bahsetmiştir. Çalışma, İngiltere gibi ülkelerde artan güç talebinin çoğu zaman dağıtım şebekelerinde artan güç kayıplarına ve voltaj kontrol sorunlarına neden olabildiğini belirterek yola çıkmıştır. Geleneksel elektrik iletkenleri ve transformatörler göz önüne alındığında, dağıtım şebekelerinde bu sorunların azaltılmasının zorluğundan, dikkatlice yerleştirilmiş ve işletilen dağıtılmış nesil ve dağıtılmış kontrol teknikleri gibi dağıtım ağlarındaki kayıpları azaltabilecek birkaç yöntemin varlığından bahsetmiştir. Ayrıca Yüksek Sıcaklık Süperiletken (HTS) kabloların, sıvı azotun (77 Kelvin) kaynama noktasına kadar soğutulduğunda sıfır direnç gösterdiğinden, dağıtım ağlarında bu sorunları ele alma potansiyeline sahip olduğundan da bahsetmesinin ardından tez, HTS kablolarının ve HTS trafolarının güç kayıpları, voltaj değişiklikleri, arıza seviyeleri ve DG üzerindeki etkisini İngiltere dağıtım ağının mevcut bir bölümü üzerinde incelemiş ve bunu konvansiyonel kablolar ve hatlardan faydalananlarla karşılaştırmıştır. Bu çalışma IPSA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, başka bir çalışma parçası, soğutma sistemlerinin güç gereksinimlerini içeren HTS kablolarındaki ve HTS transformatörlerindeki güç kayıplarını hesaplamış olup, bu daha sonra bunları geleneksel dağıtım ve iletim şebekelerinde meydana gelen güç kayıpları ile karşılaştırmıştır. Ayrıca tez, HTS kablolarının ve HTS transformatörlerinin konvansiyonel kablo ve transformatörlerle karşılaştırma maliyetlerini tanıtmakta ve HTS kablo ve transformatörleri için gelecekte öngörülen maliyetleri dikkate almaktadır. Bu bilgi, gelecekteki alternatif süperiletken ağ tasarımı potansiyelinin teknik ve ekonomik değerlendirmesini sağlamak için kullanılmıştır. Bir AC süperiletken dağıtım ağında, çeşitli dağıtım jeneratörleri de dahil olmak üzere reaktif güç paylaşımı için bir yöntem de önerilmiştir. Ayrıca bu tez, elektrik dağıtım şebekelerinin kritik kentsel alanlara yüksek güç yoğunlukları sağlama yeteneğini arttırma ve ilave varlıklara duyulan ihtiyaçtan kaçınma olasılığını göstermiştir. Bu çalışmaları IPSA ve Matlab yazılımı kullanarak gerçekleştirmiştir. Son olarak,

süperiletken ekipman kurmanın pratik etkilerini araştırmak ve süperiletken ağ varlıklarının özelliklerini düşük güç kaybı, düşük sermaye maliyeti ve düşük risk seviyesi açısından en iyi şekilde kullanan yeni ağ tasarımlarını belirlemek için araştırmalar yapılmıştır. 2013 yılında, gelecekteki 33 kV süperiletken dağıtım şebekesi tasarımının toplam maliyeti, mevcut geleneksel dağıtım şebekesi tasarımından 842,1 milyon Euro daha yüksek olacağını ortaya koymuş ve 2030 yılında gelecekteki 33 kV süperiletken ağ tasarımı, mevcut geleneksel ağ tasarımından 16,86 milyon Euro daha düşük olacağını belirtmiştir. Sonuç olarak, bu sonuçlar HTS varlıklarını büyük dağıtım ağı tasarımında kullanmanın, farklı voltaj seviyelerinde çalıştırmanın gelecekte milyonlarca pound tasarruf edilebileceğini göstermiştir [42].

Büyük arıza akımları altında yüksek sıcaklık süperiletken kablolarının sıcaklık ve akım dağılımı üzerine 2015 yılında Zhen Ming Li ve arkadaşları tarafından bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada MATLAB ve ANSYS yazılımına dayanan bir model, büyük hata akımına maruz kalan HTS kablosunun sıcaklık ve akım dağılımını simüle etmek için kullanılmıştır. Arıza akımı 25 kA olarak seçilmiş ve süresi 1 sn olarak belirlenmiştir. Hesaplanan sonuçlar grafiklerle sunulmuş ve ayrıntılı olarak yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda; arıza akımı HTS kablosundan geçerse, HTS kablosunun sıcaklığı ve akım değerinin büyük oranda değişeceği belirtilmiş olup, dış iletken tabakasının sıcaklığının; iç iletken tabakanın, önceki zırh tabakasının ve koruma tabakasınınkinden biraz daha yüksek olduğu belirtilmiştir. İletken katmanının süperiletken filminden geçen akım, sıfıra çok hızlı bir şekilde düşebildiği ve bununla birlikte, iletken katmanının metal katmanından geçen akımın küçük genlikle artacağı ve iletken katmandan geçen toplam akımın sürekli azalacağını öne sürmüşlerdir. Bu dört iletken tabaka için akım değişiminin eğilimi ve genliği her zaman neredeyse aynı olduğu sonucuna varılmıştır [36].

Son olarak günümüze en yakın çalışma olan 2019 yılında Boyang Shen ve arkadaşları tarafından elektrik iletiminde HTS çapraz iletken kablolarının AC kayıplarının araştırılması üzerine yapılmıştır. Bu makale, elektrik enerjisi iletimi için kullanılıp kullanılamayacağını değerlendirmek amacıyla, yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) çapraz iletken (CroCo: CrossConductos) kablolarda alternatif akım (AC) kaybı

analizini sunmaktadır. HTS CroCo kablolarının modellenmesi, Karlsruhe Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde monte edilmiş bir kabloya ve AC kaybı hesaplama, sonlu elemanlar metodu olan COMSOL Multiphysics paket programında uygulanan H-formülasyon modeline dayanmaktadır. AC kayıp hesaplamaları izole tek fazlı ve üç fazlı CroCo kabloları için yapılmıştır. Üç fazlı çalışma sırasında belirli bir CroCo kablo fazının AC kaybı açısal bağımlılığı incelenmiştir. CroCo kablolarındaki bireysel bantların akım dağılımları incelenmiştir. Sonuçlar, tipik üç fazlı çalışma sırasındaki tek fazlı CroCo kablosunun AC kaybının, izole edilmiş tek fazlı ve Norris elipsinden daha yüksek olduğunu, ancak üç fazlı akımla çalışan bir kablodan daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu yazının simülasyon sonuçları, eşmerkezli bir bant düzenlemesinden elde edilen geleneksel çözümlerle karşılaştırıldığında, CroCo kablosunun çok büyük AC kayıplarına ve verimsiz bant kullanımına sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kablonun bir kesiti sınırlı olması gerekiyorsa, kullanımının avantajlı olabileceği yönünde yorum yapılmıştır [37].

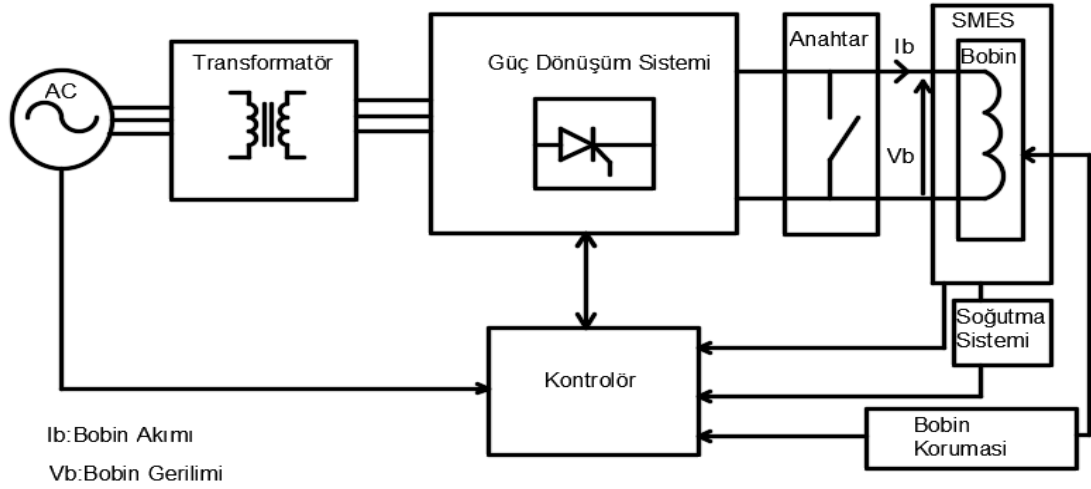
4.5.4. Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemi

Süperiletken manyetik enerji depolama sistemi anlaşıldığı üzere enerjinin depolanabilme durumu olup en önemli enerji depolama tekniklerinden biridir. Bu teknolojilerde enerji, halka şeklinde sarılmış süperiletken tellerden oluşan bir bobinden oluşur. Üretilen fazla elektrik kritik sıcaklığın altına soğutulmuş süperiletken bobine verilir ve her an kullanıma hazır bir şekilde manyetik alan olarak depolanır. Sistemin verimi %90 veya daha fazla olup ve cevap süresi milisaniyeler civarındadır.

Süperiletken bobinde depolanan enerji aşağıdaki eşitlik kullanılarak (Denklem 4.2) ifade edilmiştir.

$$Enerji = \frac{1}{\mu_0} \text{Manyetik Alan}^2 \times \text{Hacim} \quad (4.2)$$

Şekil 4.10.'da bir SMES sistem bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 4.10. SMES sistemi [38].

Sistemde depolanan enerji bobinin endüktans ve akım değerine bağlı olup, sisteme deşarj edilerek her an kullanılabilir. SMES sistemlerinin uygulama alanlarının geniş olması (yük akışı, frekans kontrolü, sistem kontrolü, sistem kararlılığı, enerji yönetimi vb.) çevreye de herhangi bir zararı olmaması ve en önemlisi de yüksek verimlilik gibi üstün özellikleri düşünüldüğünde enterkonnekte sistemlerin içerisinde uygulanabilecek enerji depolama birimi olarak düşünülmektedir. SMES sistemleri üzerine yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

2006 yılında IEEE Task Force on Benchmark Models for Digital Simulation of FACTS and Custom-Power Controllers, T&D Committee tarafından yapılan bir çalışmada SMES sisteminin detaylı olarak modellenmesi yapılmıştır. Bu makale, SMES sisteminin simülasyonu için ayrıntılı bir model sunmaktadır. Model, güç sisteminde ayrıntılı bir SMES cihaz simülasyonu için kılavuzlar sağlamanın yanı sıra, çeşitli simülasyon araçlarının, kontrol stratejilerinin, algoritmaların ve gerçekleştirme yaklaşımlarının karşılaştırılması için bir temel oluşturması için tasarlanmıştır.

Bu yazı, bir SMES bobini ve akım kesicinin geçici bir modellemesi olarak kabul edilmiş olup, SMES bobini, her bir bölümün seri kapasitansı, şönt kapasitansı, kendi kendine ve diğer bölümlere karşı ortak endüktanslarla temsil edildiği bölümler olarak modellenmiştir. Modellerin hesaplanması, hesaplama çabasını azaltmak için tüm bobini temsil edecek şekilde geliştirilmiştir.

SMES bobininin gerilim dağılımı ve geçici analizi, normal akım kesici işlemi, akım kesici GTO'larında herhangi bir açık veya kısa devre hatası ve bypass anahtarlama işlemi sırasında üretilen SMES bobinine geçen geçici yüksek gerilimleri bulduğu belirtilmiştir.

Bu makale ayrıca bir StatCom'un SMES sistemine entegrasyonunun modellenmesini ve kontrolünü ve sistem salınımlarına dinamik tepkisini sunmaktadır. StatCom-SMES kombinasyonunun güç sistemi salınımlarını sönümlemede çok etkili olabileceği gösterilmiştir. StatCom-SMES bir yük alanı yerine bir üretim alanının yakınında bulunuyorsa, sistemin daha etkili bir şekilde sönümlenmesi ve daha hızlı stabilizasyonu sağlanabileceği belirtilmiş ve enerji depolaması eklemenin, StatCom'un performansını artıracak ve tek başına çalışan StatCom'un MVA derecelendirme gereksinimlerini azaltabileceği ortaya konmuştur. FACTS kontrol cihazlarının kamusal sistemlere kurulması maliyet ve fayda analizi için önemli olduğu yönünde görüş sunulmuştur. StatCom'un SMES için gerçek bir güç akışı sağladığına dikkat çekerek, SMES kontrol cihazının StatCom kontrol cihazından bağımsız olduğunu da ayrıca belirtmişlerdir [38].

SMES ile ilgili bir diğer çalışma da 2009 yılında Koji Shikimachi ve arkadaşları tarafından "Güç Sistemi Kontrolü için 2 GJ Sınıfı YBCO SMES Sistem Koordinasyonu" adlı çalışmadır. Bu çalışmada 100 MVA/2 GJ sınıfı yük dalgalanması dengelemesi için SMES sistemi arasındaki koordinasyon IBAD/CVDYBCO kablo kullanılarak yapılmıştır. SMES sistemi, 180 kompakt, yüksek manyetik alanlı çok üniteli bobinlerden oluşan bir toroidal tip YBCO bobini, bir soğutma ortamı kullanmayan iletken soğutma yöntemini kullanan büyük bir bobin soğutma sistemini ve nispeten düşük akım ve düşük voltaj ile çoklu ünite bobin bağlantısı sağlayan çok hücreli bir güç dönüştürücüsünü içermektedir. Her bir cihaz ve tüm sistem için çalışmalar yapılmıştır. Bu makaledeki çalışma ile YBCO telini kullanarak 100 MVA/2 GJ sınıfı güç sistemi yük dalgalanma telafisi SMES sisteminin her bir cihazını geliştirmek ve koordine etmek mümkün hale gelmiştir. Bununla birlikte, güç sistemi kontrolü ve 2 GJ sınıfı YBCO SMES gerçekleştirmek için YBCO SMES'in yüksek

akım kapasitesi, yüksek dayanım gerilimi, yüksek kasnak gerginliği direnci, söndürme koruması için termal stabilite ve yüksek verimli iletken soğutma gibi alanlarda daha ileri teknolojilerin geliştirilmesi gerektiği yönünde görüş sunulmuştur [39].

4.5.5. HTS kablo projeleri

HTS'nin keşfedilmesinden itibaren birçok alanda kullanılmış ve geliştirilmeye de devam etmektedir. HTS'lerin elektrik kablo sistemlerinde de kullanılmaya başlanması birçok çalışmayı da beraberinde getirmiştir. HTS kablo projeleri dünya genelinde uygulanmaya başlamış ve şebekeye de irtibatları sağlanmıştır. Bu şebekelerden bazıları da ABD'de yer almaktadır. Detroit'te uygulanan HTS kablo projesi başarısız olmuş fakat diğer projeler teknik olarak başarılı olmuştur. Çin, Güney Kore, Japonya ve Almanya gibi ülkelerde diğer HTS kablo projeleri gerçekleştirilmiştir. İhtiyaç eksikliğinden dolayı bazı projeler iptal edilmiştir. Tüm bu projelerde yaşanan tıkanıklık sebebiyle ağ sorunlarının önlenmesinde kentsel alanlarda gelecekteki güç talebini karşılama için HTS kablolarının kullanılması önerilmiştir. Bu projelerden en önemlileri aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Carrollton, GA'da, canlı yüke güç sağlayan ilk HTS kablosu kurulmuştur. Bu proje Southwire Company tarafından uygulanmış olup, HTS kablosunun performansını test etmek için zemine bir sistem ile üç fazlı HTS kablosu monte edilmiştir. Ocak 2000'de, 30 metrelik HTS kablo sistemi tam yükte 40000 saatin üzerinde tamamen başarılı bir şekilde çalışmış ve 12,47 kV'da 1,25 kA taşıma kabiliyetine sahip olduğunu kanıtlamıştır.

1999'da Pirelli Şirketi tarafından Detroit'te ikinci bir HTS kablo sistemi kurulumu başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Projede HTS kablosu Frisbie trafo merkezine yeraltında kurulmayı amaçlıyordu ve yeraltı HTS kablosu kurulması deneyimleyen ilk proje olmuştur. HTS kablosu Frisbie trafo merkezinin iki tarafını birbirine bağlamak için 24 kA'ın 24 kV'luk hatta çalışmasını hedefleyerek 120 m boyunca 20 m çapındaki tünellerden geçirilmiştir. HTS kablosunun sorunlarından dolayı testi tamamlanamamış

olup, proje HTS kablosunun kurulumu esnasında herhangi bir sorun olmadığını ve HTS kablolarının yeraltına yerleştirilebileceğini göstermiştir.

ABD, Çin ve Japonya’da kurulan üç tane yeraltı HTS kablo projeleri büyük elektrik tedarikçilerinin şebekelerine kurulmuş ve işletilmiştir.

Bir HTS kablo projesi de Amerika Columbus’da diğer ABD şirketleri arasında Southwire önderliğinde Bixby trafo merkezinde kurulmuştur. Bu HTS kablosu 200 metrenin üzerinde 3000 A akım 13,2 kV voltaj değerini taşımak için tasarlanmıştır. 2006 yılında bu HTS kablo sistemi kusursuz olarak çalışmış ve 36000 eve enerji vermiştir. Proje, kablo sisteminin izlenmesi ve iki adet 1 kW tüplü soğutucunun kurulmasıyla 2009 yılında da devam etmiştir. Bu proje sistemi çalıştırma maliyetini düşürmeye, HTS kablosunun uzunluğunu arttırmaya ve herhangi bir kesinti veya hasar olmadan yeraltında bir HTS kablosunu başarıyla kurmaya çalışmıştır. Sumitomo Şirketi tarafından ikinci bir HTS kablo projesi ABD’nin Albany şehir merkezine kurulmuştur. Kablo Albany’deki iki trafoyu birbirine bağlamış ve 800 A’i 350 m boyunca 34,5 kV voltaj seviyesinde vermek için tasarlanmıştır. HTS kablosu, soğutma sistemleri arasında 100 m boyunca çalışabilmiştir. Bu HTS kablo sistemi 2006 yılında saat 21:00’de çalışmaya başlamış ve herhangi bir kesinti olmadan 7000 saat boyunca şebekeye bağlanmıştır. Test sonuçları tamamen başarılı olmuş ve herhangi bir arıza veya hasar meydana gelmemiştir. Ek olarak, HTS kablosu, kurulumdan sonra 6000 A’e kadar uygulanan doğru akımla süperiletkenlik özelliklerini doğrulamak üzere test edilmiştir. Testin sonuçları, çalışma veya kurulum işlemi sırasında HTS kablosunda hasar olmadığını göstermiştir. Bu proje ile elde edilen gelişmeler, o zamana kadar uygulanan en uzun HTS kablo sistemi olması, gelecekte ticarileştirme fırsatı sağlanması ve fiyat ve performans özelliklerini geliştirmek amacıyla iki YBCO (İttriyum Baryum Bakır Oksit) ve BSCCO (Bizmut Stronsiyum Kalsiyum Bakır Oksit) HTS kablosunu test ettirilmiştir.

Üçüncü HTS projesi de, 2008 yılında ABD’nin Long Island’daki Nexans Şirketi tarafından yürütülmüştür. Bu HTS kablo sistemi, iki trafo merkezi arasına kurulmuş ve 620 m boyunca 138 kV voltaj değerinde 2400 A taşımak üzere tasarlanmıştır.

Uygulandığından beri, sistem başarılı bir şekilde çalışmıştır. Tam kapasitede çalışırken, HTS kablo sistemi, 570 MW'a kadar güç aktarabilmiş ve bu da 300000 eve güç vermesi için yeterli olmuştur. Bu proje 620 metrede dünyanın en uzun HTS kablosunun kurulmasını sağlamıştır [41].

2004 yılından bu yana Çin'de 35 kV/2 kA HTS kablo projesi kurulmuş ve işletilmiştir. Çin'deki Kunming, Yunnan, endüstriyel müşterilere ve 100000 civarında bir nüfusa güç sağlamak için Puji trafosuna kurulmuştur [48].

Japonya'nın Yokohama kentinde, bir başka HTS kablo projesi Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI), Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Örgütü (NEDO) tarafından desteklenmiştir. Bu proje 2007 yılında başlamış ve canlı bir şebekeye başvurmadan önce HTS kablosunun performansını araştırmak beş yılı almıştır. Bu projenin temel amacı, HTS kablo sisteminin (66 kV/200 MVA) gerçek şebekedeki güvenilirliğini ve kararlılığını teyit etmektir [42].

Özellikle kentsel alanlarda, geleneksel güç sistemlerinin karşılaştığı sorunları çözmek için gerçek şebekelere uygulamak amacıyla, dünya genelinde çeşitli HTS kablo projeleri yürütülmektedir. Ayrıca bu projelerin temel olarak kablo maliyetlerini düşürmek ve uzunluklarını arttırmak için HTS kablolarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Projelerden biri de New Orleans'da Southwire Company tarafından yürütülmektedir. HTS kablo sistemi 13,8 kV'da iki trafo merkezini bağlamaktadır. Southwire, New Orleans şehir merkezine yakın elektrik yükü problemini çözebilmesi için 1,8 mil mesafedeki iki trafo merkezini bağlamak için 13,8 kV HTS kablo kullanılması hedeflenmiştir. Ayrıca, projenin 2011 yılında çalışması planlanmış, ancak proje iptal edilmiştir. Çünkü artık bu yüke daha fazla güç verilmesi gerekmiyordur. Bu proje, HTS kablosunun 620 m'den daha büyük uzunlukta üretilbileceğini kanıtlamıştır [49].

Başka bir proje, Çin'de gerçek şebekeye uygulamak için 22,9 kV HTS kablosu geliştirmeyi amaçlamıştır. Kablo, 100 m uzunluğunda 22,9 kV'da 1,25 kA'yı iletebildiğini kanıtlamak için test edilmiştir. Bu proje, 2006'dan 2009'a kadar teste

başlayan 2002’de Sumitomo Electric Industries tarafından üretilmiştir. Testler, HTS kablusunun başarıyla kurulduğunu ve en yüksek güç kapasitesinde herhangi bir hata veya hasar olmadan çalıştırıldığını göstermiştir. Bu proje, Güney Kore’deki Seul gibi büyük şehirlerdeki kentsel alanlarda, gelecekteki talebi karşılamak için uygulama fırsatı vermiştir. Ayrıca, kablo düşük voltaj ve düşük güç kayıpları ile toplu güç iletebilir; bu nedenle, 22,9 kV HTS kablolarını kullanarak 154 kV ağları kaldırarak şebekeleri düşük voltajda güç sağlayacak şekilde yeniden yapılandırma imkanı sunmuştur [50].

Bu projeler HTS kablolarına küresel ilgi uyandırmıştır. HTS kablolarının sağladığı temel fırsat, artan güç taleplerini karşılamak için kentsel bir çevrelerde kritik yerlere büyük miktarda güç aktarma yeteneğinin bir sonucudur. Ayrıca düşük voltaj seviyesinde, daha az güç kaybıyla yüksek güç sağlamak için dağıtım ağının yeniden yapılandırılması imkanını sağlamaktadır. Bu da şebekelerin orta gerilim seviyelerini kaldırarak dağıtım ağlarının sermaye maliyetini düşürmeye yardımcı olur. Bu projelerin tasarımcıları ve mühendisleri, bir gün yukarıda bahsedilen tüm sorunları çözebileceklerini ve ardından HTS kablolarının küresel güç iletim sistemi üzerinde önemli bir etkisi olacağına inanmaktadırlar. HTS kablolarının maliyetinin, daha geniş piyasa erişimi nedeniyle düşmesi beklenmektedir.

Başka bir süperiletken kablo çalışması 2017 yılında Rıfkı Terzioğlu ve arkadaşları tarafından yapılmış olup; çalışmada bakır formlu CORC (Conductor on Round Core) kablolarda AC kayıp karakteristiklerini incelemişlerdir. AC akımın taşınması durumunda, toplam kaybın büyük bir kısmının eksenel manyetik alan nedeniyle girdap akımlarından kaynaklandığına dair tespitlerde bulunmuşlardır. Mıknatıslanma AC kaybının araştırılması için farklı konfigürasyonlara sahip birkaç örnek hazırlamışlar ve bu durumda, metalik formun AC kaybını arttırdığını kanıtlamışlardır. Bununla birlikte, düşük alan genliklerinde, tüm kablounun mıknatıslanma AC kaybının çıplak kablodaki kayıptan daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Bu, manyetik alanın, sayısal simülasyonlarla da teyit edilen bir süperiletken tarafından korunmasından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır [53].

BÖLÜM 5. UYGULAMA VE SONUÇLAR

5.1. DigSilent Power Factory Programı

Bu tez DigSilent programının demo versiyonu üzerinden çalışılarak tasarlanmıştır. DigSilent programı “Digital Simulation of Electrical Networks” kelimelerinin kısaltılmış hali olan, iletim, dağıtım elektrik enerji sistemlerinin analizi için kullanılan bir yazılım programıdır. Bu program kullanıcıya güç sistemi analizi ihtiyacını karşılamak amacıyla tasarlanmıştır. Kendi internet sitesi üzerinden bu sürüm yüklemesi yapılabilmektedir.

5.2. DigSilent Programının Temel Özellikleri

DigSilent programının temel özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Elektrik şebekeleri modellenabilir, analiz edilebilir.
- Güç sistem elemanları için veri tabanı oluşturulabilir ve daha sonra tek hat diyagramındaki elemanlara entegre edilebilir.
- Hızlı ve doğru yük akış algoritmasına sahiptir. Yük akışını yaparken Newton Raphson yöntemini kullanır.
- Kısa devre analizi ve arıza durum analizleri yapılabilir.
- Harmonik ve flicker analizleri yapılabilir.
- Rüzgar ve güneş santralleri modellenebilir.
- DPL (DigSilent Programlama Dili) ile programlama yapılabilir.

Bir güç sistemini DigSilent Power Factory programında tasarlamak için o sisteme ait hat, iletken, jeneratör, transformatör, harmonik ve flicker verileri gibi tüm verilerin bilinmesi gerekmektedir.

5.3. DigSilent Programında Çalışmanın Gerçekleştirilmesi

Öncelikle Power Factory programında eldeki verilerle kütüphane oluşturulmuştur. Daha sonra çizimler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kütüphaneden yararlanarak eklenen elemanlara, kütüphaneden eşleştirmeler yapılarak veriler eklenmiştir.

5.4. Rabak Fideri Modellemesi ve Analizi

Bu çalışmada, SEDAŞ bölgesinde bulunan Kocaeli iline ait Rabak Fideri kullanılmıştır. Bu fidere ait tüm veriler, [40] numaralı kaynaktaki çalışmadan alınmıştır.

İlk olarak alınan verilerle fider modellenerek şebekeden geçen akım ve güçler hesaplanmış ve kısa devre analizi yapılmıştır. İkinci aşamada şebekedeki yeraltı olan iletkenler süperiletkene çevrilmiş ve analizler yapılmıştır. Son aşamada da şebekedeki tüm iletkenler süperiletken olarak değiştirilerek şebeke modellenmiş, tüm analizler tekrarlanmıştır. Kullanılan süperiletken [41] numaralı kaynakçada belirtilen adresten alınmıştır. Bu süperiletken 800 Amper anma akımına sahiptir. ABD'nin Albany şehrinde 2006/7-2008/4 yılları arasında uygulamada kullanılmış bir süperiletkenidir. Bizim elektrik şebeke sistemimizin de 34,5 kV'luk olması sebebiyle bu süperiletkenin çalışmada kullanılması tercih edilmiştir.

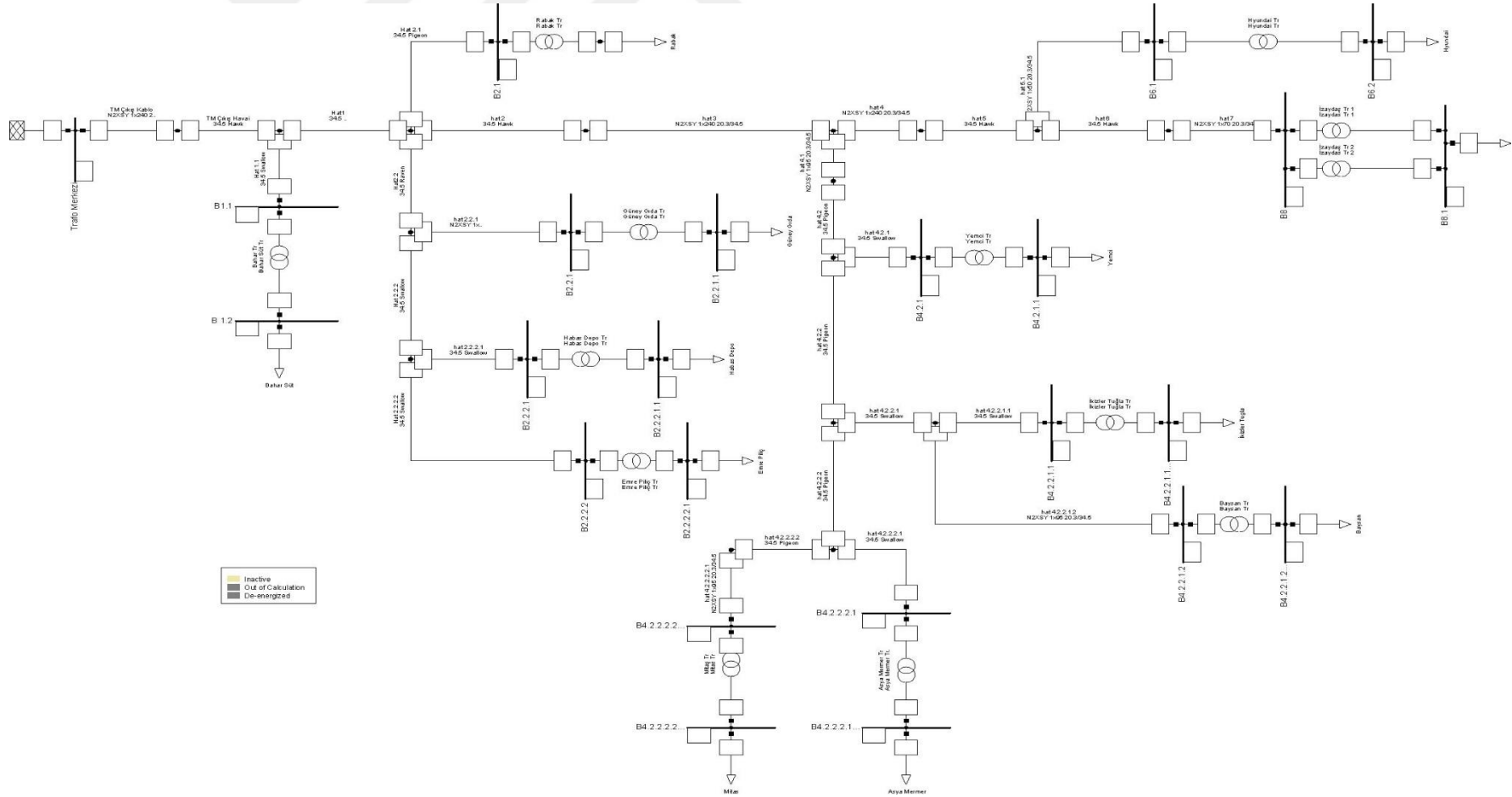
Süperiletken parametreleri de [42] numaralı kaynak tezden alınmış olup, Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Süperiletken kablo parametreleri

Direnç (ohm/km)	İndüktans (mH/km)	Kapasitans (nF/km)
0,0001	0,06	200

5.4.1. Rabak fideri tek hat şeması

Rabak fiderine ait tek hat şeması Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Rabak tek hat şeması

5.4.2. Rabak fideri verileri

Rabak fiderinin modellenmesinde gerekli olan hat ve transformatör verileri, ilgili işletmeden alınmış olduğu kaynakta belirtilmiş olup, gerçeğe en yakın model oluşturulmaya çalışılmıştır. Fidere ait transformatör verileri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Transformatör verileri

Trafo adı	Dönüştürme oranı	Gücü (kVA)
Asya Mermer	34,5/0,4 kV	1600
Bahar Süt	34,5/0,4 kV	1600
Baysan	34,5/0,4 kV	630
Güney Gıda	34,5/0,4 kV	1600
Habas Depo	34,5/0,4 kV	400
Hyundai	34,5/0,4 kV	400
Mitaş	34,5/0,4 kV	630
Rabak	34,5/0,4 kV	250
Yemci	34,5/0,4 kV	1600
İkizler Tuğla	34,5/0,4 kV	1600
İzaydaş 1	34,5/0,4 kV	1000
İzaydaş 2	34,5/0,4 kV	400

Tablo 5.3.'te fidere ait tüm yük verileri verilmiştir.

Tablo 5.3. Rabak yük verileri

Yükün adı	Görünür güç (MVA)	Güç faktörü
Asya Mermer	0,096	0,98 (endüktif)
Bahar Süt	0,096	0,98 (endüktif)
Baysan	0,378	0,98 (endüktif)
Güney Gıda	0,06	0,98 (endüktif)
Habas Depo	0,24	0,98 (endüktif)
Hyundai	0,24	0,98 (endüktif)
Mitaş	0,378	0,98 (endüktif)
Rabak	0,15	0,98 (endüktif)
Yemci	0,096	0,98 (endüktif)
İkizler Tuğla	0,096	0,98 (endüktif)
İzaydaş	1,0	0,98 (endüktif)

Tablo 5.4.'te hatta ait veriler gösterilmektedir.

Tablo 5.4. Rabak hat verileri

Hattın adı	İletken tipi	Uzunluk (km)	Gmr(mm)	DC direnç (ohm/km)	Anma çapı (mm)
Hat 1	34,5 kV Hawk	0,2	7,90251	0,1194	21,77
Hat 1.1	34,5 kV Swallow	0,25	2,59182	1,0742	7,14
Hat 2	34, 5 kV Hawk	0,5	7,90251	0,1194	21,77
Hat 2.1	34,5 kV Pigeon	0,25	4,62	0,3366	12,75
Hat 2.2	34,5 kV Raven	0,04	0,5362	3,66	10,11
Hat 2.2.1	N2XSY 1x50 20,3/34,5	0,08	-	-	-
Hat 2.2.2	34,5 kV Swallow	0,3	2,59182	1,0742	7,14
Hat 2.2.2.1	34,5 kV Swallow	0,125	2,59182	1,0742	7,14
Hat 3	N2XSY 1x240 20,3/34,5	0,1	-	-	-
Hat 4	N2XSY 1x240 20,3/34,5	0,15	-	-	-
Hat 4.1	N2XSY 1x95 20,3/34,5	0,1	-	-	-
Hat 4.2	34,5 kV Pigeon	0,2	4,62	0,3366	12,75
Hat 4.2.1	34,5 kV Swallow	0,05	2,59182	1,0742	7,14
Hat 4.2.2	34,5 kV Pigeon	0,2	4,62	0,3366	12,75
Hat 4.2.2.1	34,5 kV Swallow	0,04	2,59182	1,0742	7,14
Hat 4.2.2.1.1	34,5 kV Swallow	0,25	2,59182	1,0742	7,14
Hat 4.2.2.1.2	N2XSY 1x95 20,3/34,5	0,05	-	-	-
Hat 4.2.2.2	34,5 kV Pigeon	0,25	4,62	0,3366	12,75
Hat 4.2.2.2.1	34,5 kV Swallow	0,2	2,59182	1,0742	7,14
Hat 4.2.2.2.2	34,5 kV Pigeon	1,5	4,62	0,3366	12,75
Hat 4.2.2.2.2.1	N2XSY 1x95 20,3/34,5	0,05	-	-	-

Tablo 5.4. (Devamı)

Hattın adı	İletken tipi	Uzunluk (km)	Gmr(mm)	DC direnç (ohm/km)	Anma çapı (mm)
Hat 5	34,5 kV Hawk	3	7,90251	0,1194	21,77
Hat 5.1	N2XSY 1x50 20,3/34,5	0,04	-	-	-
Hat 6	34,5 kV Hawk	0,3	7,90251	0,1194	21,77
Hat 7	N2XSY 1x70 20,3/34,5	0,05	-	-	-
TM çıkış havai	34,5 kV Hawk	0,45	7,90251	0,1194	21,77
TM çıkış kablo	N2XSY 1x240 20,3/34,5	0,2	-	-	-

5.5. Analiz Sonuçları

DigSilent Power Factory programında elde edilen analiz sonuçlarında hatlara ve yüklere ait normal şebekedeki ve süperiletkenli şebekelerdeki veriler Tablo 5.5., Tablo 5.6. ve Tablo 5.7’de verilmiştir. Çalışmanın devamında yeraltı süperiletkenli şebeke için “Durum II”, tüm iletkenlerin süperiletken olduğu şebeke için “Durum III” şeklinde bahsedilecektir.

Tablo 5.5. Normal şebekede hatlara ait analiz sonuçları

	P (MW)	S (MVA)	I (kA)	Loading
TM Çıkış Kablo	2,8	2,9	0,0485	84
TM Çıkış Havai	2,8	2,9	0,0485	65
Hat 1.1	0,1	0,096	0,00161	10
Hat 1	2,7	2,804	0,0469	63
Hat 2	2,2	2,284	0,0382	52
Hat 2.1	0,15	0,15	0,00251	7
Hat 2.2	0,3	0,36	0,006	20
Hat 2.2.1	0,1	0,1	0,002	07
Hat 2.2.2	0,2	0,2	0,004	22
Hat 2.2.2.1	0,2	0,2	0,004	22
Hat 3	2,2	2,3	0,0382	66
Hat 4	1,2	1,24	0,0208	36
Hat 4.1	1,0	1,1	0,018	49
Hat 4.2	1,0	1,1	0,018	49

Tablo 5.5. (Devamı)

	P (MW)	S (MVA)	I (kA)	Loading
Hat 4.2.1	0,1	0,1	0,002	10
Hat 4.2.2	0,9	1,0	0,016	44
Hat 4.2.2.1	0,5	0,5	0,008	45
Hat 4.2.2.1.1	0,1	0,1	0,002	10
Hat 4.2.2.1.2	0,4	0,4	0,006	17
Hat 4.2.2.2	0,5	0,5	0,008	22
Hat 4.2.2.2.1	0,1	0,1	0,002	10
Hat 4.2.2.2.2	0,4	0,4	0,006	17
Hat 4.2.2.2.2.1	0,4	0,4	0,006	17
Hat 5	1,2	1,2	0,0208	28
Hat 5.1	0,2	0,2	0,004	16
Hat 6	1,0	1,0	0,017	22
Hat 7	1,0	1,0	0,017	69

Tablo 5.6. Durum II'deki hatlara ait analiz sonuçları

	P (MW)	S (MVA)	I (kA)	Loading
TM Çıkış Kablo	2,8	2,9	0,0485	61
TM Çıkış Havai	2,8	2,9	0,0485	66
Hat 1.1	0,1	0,1	0,0016	10
Hat 1	2,7	2,8	0,0469	64
Hat 2	2,2	2,3	0,0379	52
Hat 2.1	0,1	0,15	0,003	7
Hat 2.2	0,3	0,36	0,006	24
Hat 2.2.1	0,1	0,1	0,002	2
Hat 2.2.2	0,3	0,3	0,005	28
Hat 2.2.2.1	0,2	0,2	0,004	5
Hat 3	2,2	2,3	0,0379	48
Hat 4	1,2	1,24	0,02	26
Hat 4.1	1,0	1,1	0,018	22
Hat 4.2	1,0	1,1	0,018	49
Hat 4.2.1	0,1	0,1	0,002	10
Hat 4.2.2	0,9	1,0	0,016	44
Hat 4.2.2.1	0,5	0,5	0,008	45
Hat 4.2.2.1.1	0,1	0,1	0,002	10
Hat 4.2.2.1.2	0,4	0,4	0,006	8
Hat 4.2.2.2	0,5	0,5	0,008	22

Tablo 5.6. (Devamı)

	P (MW)	S (MVA)	I (kA)	Loading
Hat 4.2.2.2.1	0,1	0,1	0,002	10
Hat 4.2.2.2.2	0,4	0,4	0,006	17
Hat 4.2.2.2.2.1	0,4	0,4	0,006	8
Hat 5	1,2	1,3	0,020	28
Hat 5.1	0,2	0,24	0,004	5
Hat 6	1,0	1,0	0,0168	22
Hat 7	1,0	1,0	0,0168	21

Tablo 5.6.'daki sonuçlara bakıldığında akım değerlerinde, güç değerlerinde ve özellikle yüklenme değerlerinde azalmaların olduğu görülmektedir. Yüzdesel hesaplamalar yapıldığında da; akım değerlerinde ortalama %0,272 oranında azalma olduğu, yüklenme oranlarında da ortalama %18,77 oranında büyük bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bir dağıtım şebekesinde süperiletken kullanılması özellikle hatta meydana gelen yüklenmelerin azalmasına ve böylelikle de hatta kullanılan eleman ömürlerinin daha uzun olmasını sağlamaktadır. Bu sonuçlara bağlı olarak uzun süreçte maliyet de azalmaktadır.

Tablo 5.7. Durum III'teki hatlara ait analiz sonuçları

	P (MW)	S (MVA)	I (kA)	Loading
TM Çıkış Kablo	2,8	2,9	0,0485	61
TM Çıkış Havai	2,8	2,9	0,0485	61
Hat 1.1	0,1	0,096	0,0016	2
Hat 1	2,7	2,804	0,0469	59
Hat 2	2,3	2,4	0,0381	48
Hat 2.1	0,1	0,2	0,0025	3
Hat 2.2	0,4	0,4	0,006	8
Hat 2.2.1	0,1	0,1	0,001	1
Hat 2.2.2	0,3	0,3	0,005	6
Hat 2.2.2.1	0,2	0,2	0,004	5
Hat 3	2,3	2,284	0,0381	48
Hat 4	1,2	1,24	0,021	22
Hat 4.1	1,0	1,1	0,018	22
Hat 4.2	1,0	1,1	0,018	22
Hat 4.2.1	0,1	0,1	0,002	2
Hat 4.2.2	0,9	1,0	0,016	20
Hat 4.2.2.1	0,5	0,5	0,008	10

Tablo 5.7. (Devamı)

	P (MW)	S (MVA)	I (kA)	Loading
Hat 4.2.2.1.1	0,1	0,1	0,002	2
Hat 4.2.2.1.2	0,4	0,4	0,006	8
Hat 4.2.2.2	0,5	0,5	0,008	10
Hat 4.2.2.2.1	0,1	0,1	0,002	2
Hat 4.2.2.2.2	0,4	0,4	0,006	8
Hat 4.2.2.2.2.1	0,4	0,4	0,006	8
Hat 5	1,2	1,3	0,021	26
Hat 5.1	0,2	0,2	0,004	5
Hat 6	1,0	1,0	0,0167	21
Hat 7	1,0	1,0	0,0167	21

Tablo 5.7.’deki veriler incelenerek Tablo 5.5.’deki veriler ile karşılaştırılmalar yapılırsa; hatlardan geçen akım değerlerinde ortalama %0,1 oranında, hattın yüklenme oranlarında da ortalama %41,87 oranında azalmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Akım değerlerinde Durum II’ye göre daha az düşüş olmasına rağmen, hatta meydana gelen yüklenme yüzdelerinde Durum II’ye göre daha büyük oranda azalma meydana geldiği görülmektedir. Bir elektrik sisteminde hattın yüklenme oranları çok önemli olmakla birlikte, aşırı yüklenmeler şebekede voltaj düşmelerine, elemanların ömürlerinin daha kısa olmasına kısaca enerji kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır. Bu sebeplerle süperiletkenleri elektrik şebekelerinde kullanmak, şebekede yüklenmeleri büyük oranda azaltarak enerji kalitesini arttırmaktadır.

Tablo 5.8., Tablo 5.9. ve Tablo 5.10.’da Normal şebeke, Durum II ve Durum III için en uzun kol üzerindeki gerilim değerleri verilmiştir. Bu hesaplamada, “ $V=I \cdot R \cdot l$ ” formülü kullanılmıştır.

Tablo 5.8. Normal şebeke için gerilim tespiti

	I (kA)	R (ohm/km)	l (km)	V _N (kV)
TM Çıkış Kablo	0,0485	0,114	0,2	34,499
TM Çıkış Havai	0,0485	0,1194	0,45	34,473
Hat 1.1	0,00161	1,0742	0,25	34,473
Hat 1	0,0469	0,1194	0,2	34,472
Hat 2	0,0382	0,1194	0,5	34,469

Tablo 5.8. (Devamı)

	I (kA)	R (ohm/km)	l (km)	V _N (kV)
Hat 2.1	0,0485	0,3366	0,25	34,471
Hat 2.2	0,006	3,66	0,04	34,471
Hat 3	0,0382	0,114	0,1	34,469
Hat 4	0,0208	0,114	0,15	34,468
Hat 5	0,0208	0,1194	3	34,461
Hat 5.1	0,004	0,508	0,04	34,460
Hat 6	0,017	0,1194	0,3	34,460
Hat 7	0,017	0,355	0,05	34,459

Tablo 5.9. Durum II için gerilim tespiti

	I (kA)	R (ohm/km)	l (km)	V _{II} (kV)
TM Çıkış Kablo	0,0485	0,0001	0,2	34,5
TM Çıkış Havai	0,0485	0,1194	0,45	34,49
Hat 1.1	0,0016	1,0742	0,25	34,489
Hat 1	0,0469	0,1194	0,2	34,486
Hat 2	0,0379	0,1194	0,5	34,484
Hat 2.1	0,003	0,3366	0,25	34,486
Hat 2.2	0,006	3,66	0,04	34,485
Hat 3	0,0379	0,0001	0,1	34,484
Hat 4	0,020	0,0001	0,15	34,484
Hat 5	0,020	0,1194	3	34,477
Hat 5.1	0,004	0,0001	0,04	34,477
Hat 6	0,0168	0,1194	0,3	34,476
Hat 7	0,0168	0,0001	0,05	34,476

Tabloya göre, yeraltı iletkenlerin süperiletken yapıldığı şebeke olan Durum II’de; hatbaşı gerilim ile hatsonu gerilim değerlerine bakıldığında da hatsonu gerilimi %0,07 oranında azalmış olup, süperiletkenin bir şebekede kullanılması gerilim düşümünü azaltmaktadır. Gerilim düşümün azaltılması da kaliteli enerji için çok önemlidir.

Tablo 5.10. Durum III için gerilim tespiti

	I (kA)	R (ohm/km)	l (km)	V _{III} (kV)
TM Çıkış Kablo	0,0485	0,0001	0,2	34,5
TM Çıkış Havai	0,0485	0,0001	0,45	34,5
Hat 1.1	0,0016	0,0001	0,25	34,5
Hat 1	0,0469	0,0001	0,2	34,499

Tablo 5.10. (Devamı)

	I (kA)	R (ohm/km)	l (km)	V _{III} (kV)
Hat 2	0,0381	0,0001	0,5	34,499
Hat 2.1	0,0025	0,0001	0,25	34,499
Hat 2.2	0,006	0,0001	0,04	34,499
Hat 3	0,0381	0,0001	0,1	34,4989
Hat 4	0,021	0,0001	0,15	34,4988
Hat 5	0,021	0,0001	3	34,4988
Hat 5.1	0,004	0,0001	0,04	34,4988
Hat 6	0,0167	0,0001	0,3	34,4988
Hat 7	0,0167	0,0001	0,05	34,4988

Tabloya göre tüm iletkenlerin süperiletken olarak kullanıldığı Durum III'te; hatbaşı gerilim ile hatsonu gerilim değerlerine bakıldığında da hatsonu gerilimi %0,0035 oranında azalmış olup, süperiletkenin bir şebekede kullanılması gerilim düşümünü azaltmaktadır. Yapılan tüm bu tespitler, süperiletkenlerin şebekede kullanılmasının gerilim düşümünü azaltmakta ve enerji iletim ve dağıtımı için çok önemli bir kavram olan gerilim düşümünü iyileştirmede büyük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.11.'te Normal şebeke ile Durum II'ye ait şebekede meydana gelen kayıplar gösterilmiştir. Kayıp hesabı için " $P=I^2 \cdot R \cdot l$ " formülü kullanılmıştır.

Tablo 5.11. Normal şebeke ile durum II'ye ait şebekelerde meydana gelen kayıplar

	Normal şebeke			Durum II			
	I (kA)	R (Ohm/km)	P _{loss} (kW)	I (kA)	R (Ohm/km)	P _{loss} (kW)	l (km)
TM Çıkış Kablo	0,0485	0,114	0,0536313	0,049	0,0001	0,000047045	0,2
TM Çıkış Havai	0,0485	0,1194	0,126386393	0,049	0,1194	0,126386393	0,45
Hat 1.1	0,00161	1,0742	0,000696108	0,002	1,0742	0,000687488	0,25
Hat 1	0,0469	0,1194	0,052526687	0,047	0,1194	0,052526687	0,2
Hat 2	0,0382	0,1194	0,087116628	0,038	0,1194	0,085753677	0,5
Hat 2.1	0,00251	0,3366	0,000530153	0,002	0,3366	0,00075735	0,25
Hat 2.2	0,006	3,66	0,0052704	0,007	3,66	0,0052704	0,04
Hat 2.2.1	0,002	0,387	0,00012384	0,002	0,0001	0,000000032	0,08
Hat 2.2.2	0,004	1,0742	0,00515616	0,005	1,0742	0,0080565	0,3
Hat 2.2.2.1	0,004	1,0742	0,0021484	0,004	1,0742	0,0021484	0,125

Tablo 5.11. (Devamı)

	Normal şebeke			Durum II			
	I (kA)	R (Ohm/km)	P _{loss} (kW)	I (kA)	R (Ohm/km)	P _{loss} (kW)	L (km)
Hat 3	0,0382	0,114	0,016635336	0,0379	0,0001	1,43641E-05	0,1
Hat 4	0,0208	0,114	0,007398144	0,02	0,0001	0,000006	0,15
Hat 4.1	0,018	0,259	0,0083916	0,018	0,0001	0,00000324	0,1
Hat 4.2	0,018	0,3366	0,02181168	0,018	0,3366	0,02181168	0,2
Hat 4.2.1	0,002	1,0742	0,00021484	0,002	1,0742	0,00021484	0,05
Hat 4.2.2	0,016	0,3366	0,01723392	0,016	0,3366	0,01723392	0,2
Hat 4.2.2.1	0,008	1,0742	0,002749952	0,008	1,0742	0,002749952	0,04
Hat 4.2.2.1.1	0,002	1,0742	0,0010742	0,002	1,0742	0,0010742	0,25
Hat 4.2.2.1.2	0,006	0,259	0,0004662	0,006	0,0001	0,00000018	0,05
Hat 4.2.2.2	0,008	0,3366	0,0053856	0,008	0,3366	0,0053856	0,25
Hat 4.2.2.2.1	0,002	1,0742	0,00085936	0,002	1,0742	0,00085936	0,2
Hat 4.2.2.2.2	0,006	0,3366	0,0181764	0,006	0,3366	0,0181764	1,5
Hat 4.2.2.2.2.1	0,006	0,259	0,0004662	0,006	0,0001	0,00000018	0,05
Hat 5	0,0208	0,1194	0,154971648	0,02	0,1194	0,14328	3,0
Hat 5.1	0,004	0,508	0,00032512	0,004	0,0001	0,000000064	0,04
Hat 6	0,017	0,1194	0,01035198	0,0168	0,1194	0,010109837	0,3
Hat 7	0,017	0,355	0,00512975	0,0168	0,0001	1,4112E-06	0,05

Tablo 5.11.'de yeraltı iletkenlerin süperiletken olduğu şebeke olan Durum II için ortalama %17 oranında güç kaybında azalma meydana gelmiştir. Özellikle şebekedeki süperiletken kullanılan hatlar üzerinde güç kaybı %99 oranında azalmıştır. Bu sonuç bir elektrik şebekesinde süperiletken kullanılmasının güç kayıplarında azaltmada çok büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.12.'de normal şebeke ile Durum III'e ait şebekede meydana gelen kayıplar gösterilmiştir. Kayıp hesabı için $P=I^2 \cdot R \cdot l$ formülü kullanılmıştır.

Tablo 5.12. Normal şebeke ile durum III'e ait şebekelerde meydana gelen kayıplar

	Normal şebeke			Durum III			
	I (kA)	R (Ohm/km)	P _{loss} (kW)	I (kA)	R (Ohm/km)	P _{loss} (kW)	L (km)
TM Çıkış							
Kablo	0,0485	0,075	0,0536313	0,0485	0,0001	0,000047045	0,2
TM Çıkış							
Havai	0,0485	0,1194	0,126386393	0,0485	0,0001	0,000105851	0,45
Hat 1.1	0,00161	1,0742	0,000696108	0,0016	0,0001	0,000000064	0,25
Hat 1	0,0469	0,1194	0,052526687	0,0469	0,0001	4,39922E-05	0,2
Hat 2	0,0382	0,1194	0,087116628	0,0381	0,0001	7,25805E-05	0,5
Hat 2.1	0,00251	0,3366	0,000530153	0,0025	0,0001	1,5625E-07	0,25
Hat 2.2	0,006	3,66	0,0052704	0,006	0,0001	0,000000144	0,04
Hat 2.2.1	0,002	0,387	0,00012384	0,001	0,0001	0,000000008	0,08
Hat 2.2.2	0,004	1,0742	0,00515616	0,005	0,0001	0,000000075	0,3
Hat 2.2.2.1	0,004	1,0742	0,0021484	0,004	0,0001	0,00000002	0,125
Hat 3	0,0382	0,075	0,016635336	0,0381	0,0001	1,45161E-05	0,1
Hat 4	0,0208	0,075	0,007398144	0,021	0,0001	0,000006615	0,15
Hat 4.1	0,018	0,193	0,0083916	0,018	0,0001	0,00000324	0,1
Hat 4.2	0,018	0,3366	0,02181168	0,018	0,0001	0,00000648	0,2
Hat 4.2.1	0,002	1,0742	0,00021484	0,002	0,0001	0,00000002	0,05
Hat 4.2.2	0,016	0,3366	0,01723392	0,016	0,0001	0,00000512	0,2
Hat 4.2.2.1	0,008	1,0742	0,002749952	0,008	0,0001	0,000000256	0,04
Hat 4.2.2.1.1	0,002	1,0742	0,0010742	0,002	0,0001	0,00000001	0,25
Hat 4.2.2.1.2	0,006	0,193	0,0004662	0,006	0,0001	0,00000018	0,05
Hat 4.2.2.2	0,008	0,3366	0,0053856	0,008	0,0001	0,00000016	0,25
Hat 4.2.2.2.1	0,002	1,0742	0,00085936	0,002	0,0001	0,000000008	0,2
Hat 4.2.2.2.2	0,006	0,3366	0,0181764	0,006	0,0001	0,00000054	1,5
Hat 4.2.2.2.2.1	0,006	0,193	0,0004662	0,006	0,0001	0,00000018	0,05
Hat 5	0,0208	0,1194	0,154971648	0,021	0,0001	0,0001323	3,0
Hat 5.1	0,004	0,387	0,00032512	0,004	0,0001	0,000000064	0,04
Hat 6	0,017	0,1194	0,01035198	0,0167	0,0001	8,3667E-06	0,3
Hat 7	0,017	0,268	0,00512975	0,0167	0,0001	1,39445E-06	0,05

Tablo 5.12.'de verilen hesaplamalara göre tüm iletkenlerin süperiletkenlerle değiştirildiği şebeke olan Durum III'te ortalama %99,925 oranında güç kaybında

azalma olmuştur. Bir şebekede süperiletken kullanmak, güç kayıplarını büyük oranda azaltacak ve verimin yüksek olmasını sağlayacaktır. Elektrik iletim ve dağıtım sistemleri için kayıplar çok önemlidir. Meydana gelen kayıplar büyük oranda dağıtım sistemlerinde oluşur. Çünkü dağıtım sistemlerinde gerilim seviyesi düşük ve akım yüksektir. Dağıtım sistemlerinin iyileştirilmesi, hattaki kayıpların minimum düzeye çekilmesi, enerji kalitesi, güvenilirliği açısından çok önemli olmakla birlikte, hattın ömrünü uzatarak, çıkabilecek arıza sayısını da azaltmaktadır. Özetle bir dağıtım şebekesini süperiletkenlerle tasarlamak, çok avantajlı bir uygulama olacaktır.

5.5.1. Kısa devre analizi sonuçları

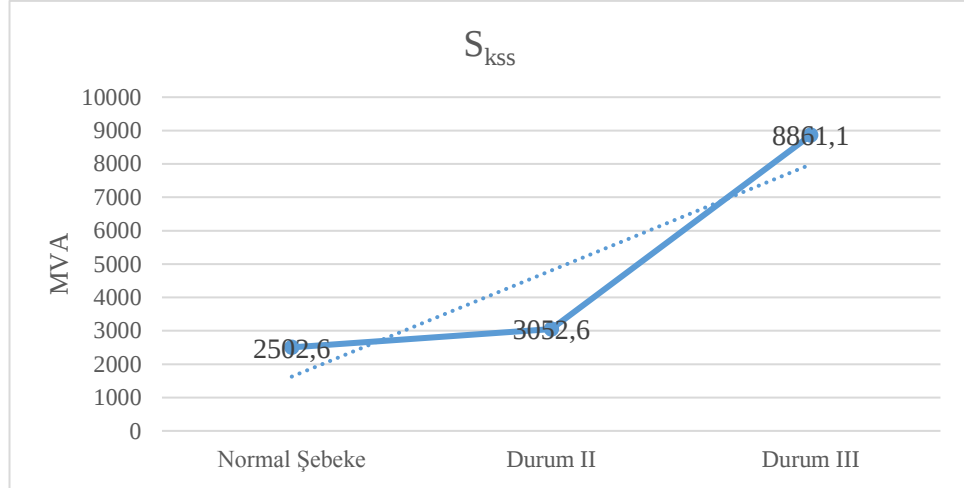
Çalışmaya ait üç durum için en yüksek kısa devre akımına sahip olan Bahar Süt trafosuna ait B1.1 barasında kısa devre meydana geldiği varsayılarak hesaplamalar yapılmış ve Tablo 5.13.'te üç durum için sonuçlar verilmiştir.

Tablo 5.13. Kısa devre analiz sonuçları

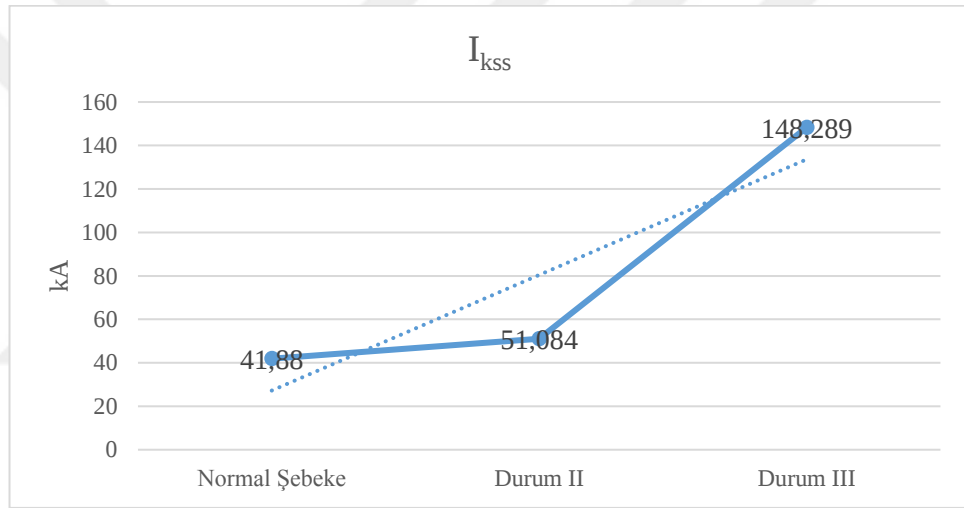
Normal şebeke			Durum II			Durum III		
Skss (MVA)	Ikss (kA)	ip (kA)	Skss (MVA)	Ikss (kA)	ip (kA)	Skss (MVA)	Ikss (kA)	ip (kA)
2502,6	41,88	64,031	3052,6	51,084	75,123	8861,1	148,289	371,226

Tablodan da görüldüğü üzere süperiletken kullanılan bir şebekede herhangi bir kısa devre durumunda akım ve güç değerleri normal şebekeye göre artmaktadır. Bir şebekede tamamen süperiletken kullanıldığında normal duruma göre kısa devre akım ve güç değerlerinde 5 kat kadar bir artış gerçekleşmektedir. Bu veri istenen bir durum değildir.

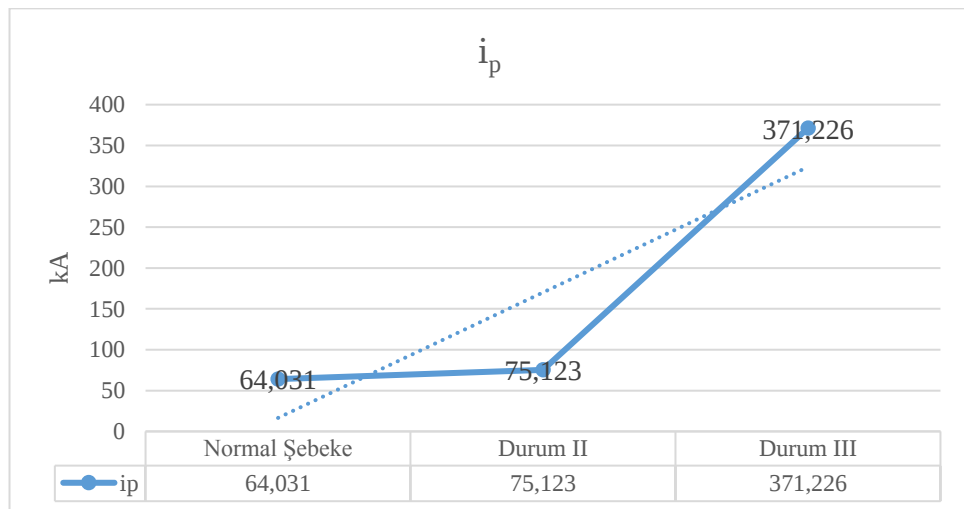
Şekil 5.2., Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'de üç durum için sırasıyla başlangıç kısa devre gücü, başlangıç kısa devre akımı ve maksimum kısa devre akımı grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Başlangıç kısa devre gücü grafiği



Şekil 5.3. Başlangıç kısa devre akımı grafiği



Şekil 5.4. Maksimum kısa devre akımı grafiği

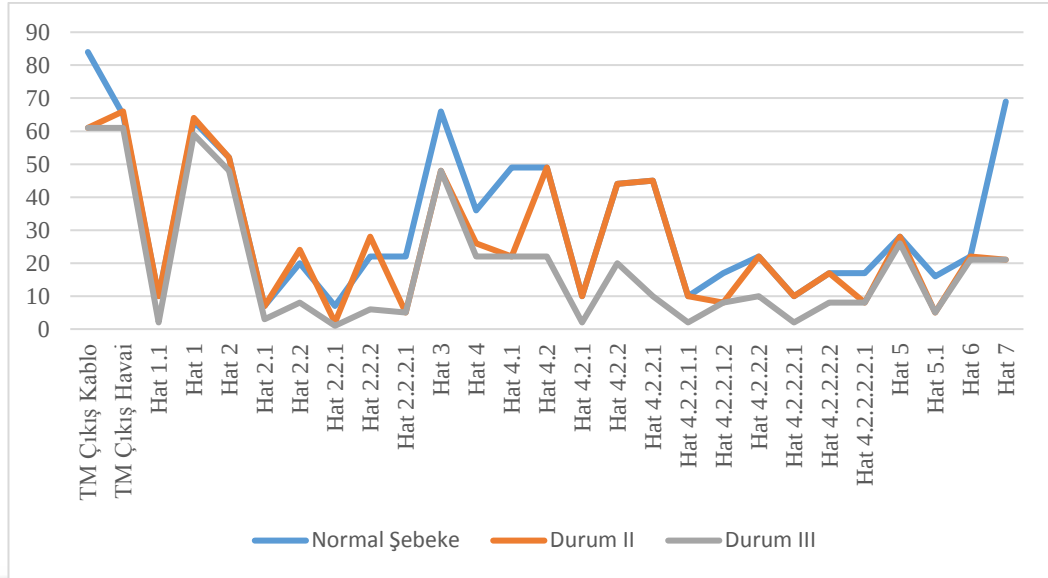
Üç grafik incelendiğinde süperiletkenli şebekelerde kısa devre durumundaki akım ve güç değerlerinin artışı daha net bir şekilde görülmektedir.

Büyük arıza akımları sistem elemanlarına ciddi zararlar verebilmektedir. Bu nedenle sistemdeki arıza akımı kısa sürede ortadan kaldırılmalıdır. Kesiciler arıza akımını hızlı bir şekilde keserse, daha büyük akımlarla karşılaşabileceklerinden çok kısa sürede açma yapamazlar ve genelde ortalama 120 sn boyunca arıza akımı sistemden akar. Bu gibi olumsuz durumların önüne geçmek için arıza akım seviyelerinin sistem için tehlike oluşturmayacak seviyelere düşürülmesi gerekmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı arıza akımını ilk yarım periyot içerisinde sınırlama işlemini yapan elemanlardan biri olan SFCL'ler iyi bir tercih olacaktır. SFCL güç sistemlerindeki arıza akımını kontrol etmek için kullanılan bir yöntemdir. SFCL, arıza anında yükselen arıza akımını direnç özelliği ile sınırlayarak güç sisteminin daha kararlı ve güvenilir olmasına katkı sağlamaktadır. SFCL direnç değeri akımın miktarına bağlı olarak değişerek arıza akımına bir tepki oluşturmaktadır. CLR (akım sınırlayıcı direnç)'nin aksine normal işletme koşullarında gerilim düşümü ve güç kaybı gibi herhangi bir olumsuz etkisinin bulunmaması SFCL'in en büyük avantajlarından biridir. Böylece sistem ve sisteme ait elemanlar korunmuş olur ve kesiciler de daha kolay kesme işlemi yaparlar. Arıza sistemden temizlendikten sonra da özel soğutma sistemi ile tekrar süperiletken konumuna geçiş yaparak, direnç değerleri ihmal edilecek seviyeye ulaşmış olur. Maliyetlerinin yüksek olması ve soğutma sistemlerini de gerektirmesinin dışında, yaklaşık trafolar kadar yer kaplayan SFCL'ler elektrik şebekelerini arızalara karşı daha dayanıklı, daha kararlı ve daha güvenilir hale getirmektedirler.

5.6. Çalışma İle İlgili Sonuçlar Ve Yorumlar

Bu çalışmadan elde edilen grafikler ve bunlara ait yorumlar bu bölümde anlatılmıştır.

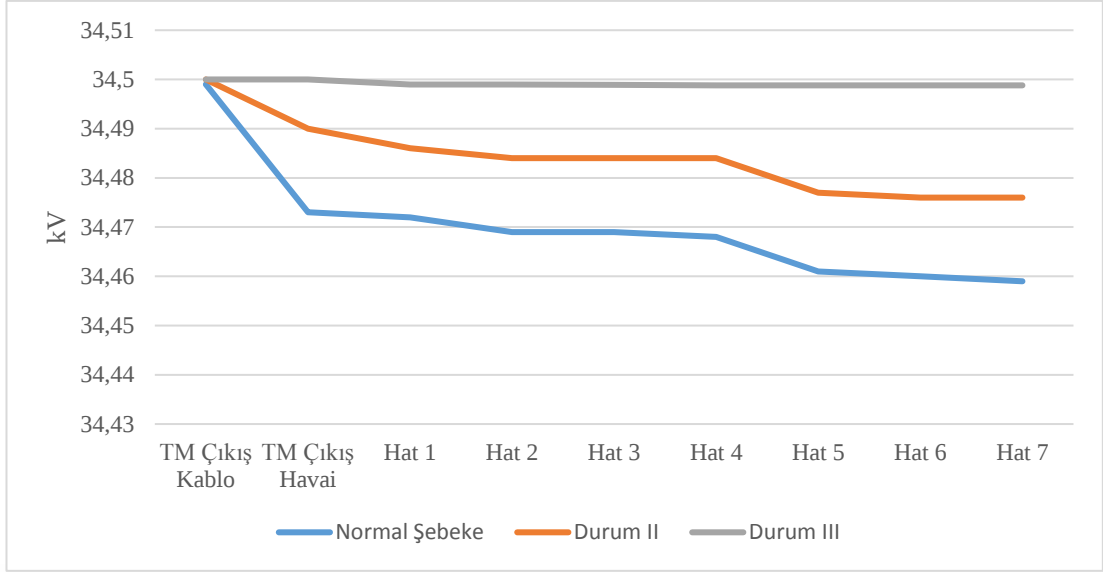
Şekil 5.5.'te hatta meydana gelen yüklenme oranlarına ait grafik gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Hattın yüklenme grafiği

Şekil 5.5.'te hattın yüklenme oranları Durum II ve Durum III'te büyük oranda azalmaktadır. Ayrıca Durum III'te Durum II'ye oranla daha fazla azalma tespit edilmiştir. Bir sistemde yüklenme oranlarının azalması, sistemdeki elemanları daha az zorlamak ve eleman ömürlerinin daha uzun olmasını sağlamaktadır. Ayrıca aşırı yüklenme daha önce tablo yorumlarında belirtildiği üzere enerji kalitesi açısından çok önemlidir. İdeal bir sistemde aşırı yüklenmeler yerine dengeli yük dağılımları tercih edilmelidir. Çalışmada şebekenin süperiletkenlerle tasarlanması, yüklenme oranlarını büyük ölçüde azaltmış olup, sistemi daha verimli hale getirmiştir.

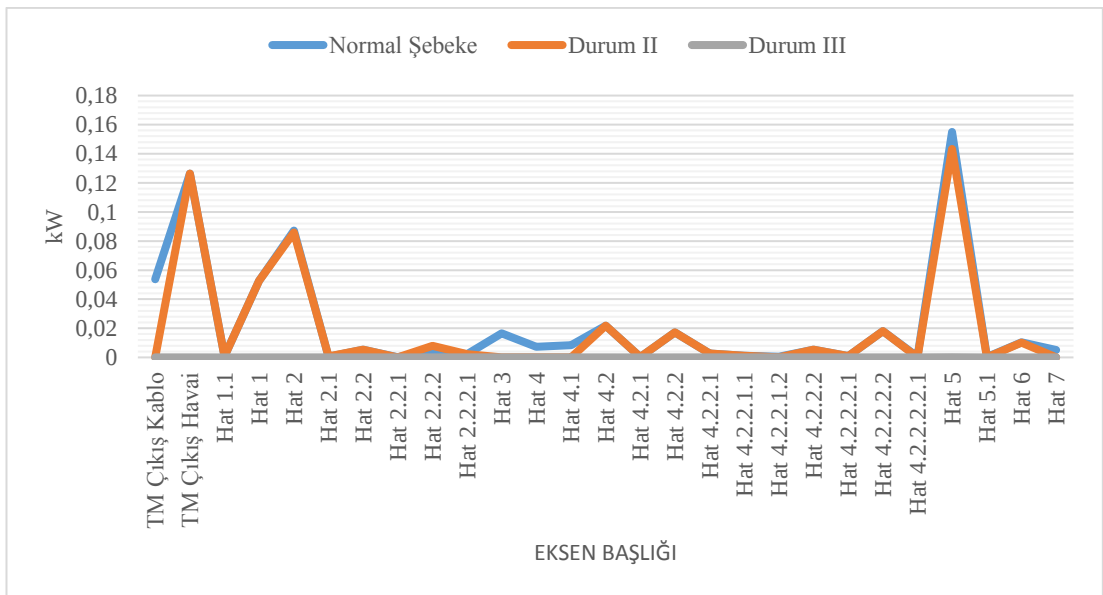
Şekil 5.6.'da hattın en uzun kolundaki iletkenlere ait voltaj grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Voltaj grafiği

Şekil 5.6.'da yeraltı iletkenlerin süperiletkenler ile değiştirildiği Durum II ve tüm iletkenlerin süperiletken ile değiştirildiği Durum III'te normal şebekeye oranla gerilim düşümünde azalmalar olmuştur. Durum III'te diğer iki duruma göre hatsonu işletme gerilimi ile hatbaşı işletme geriliminde daha az değişim olduğu tespit edilmiştir. Şebekede süperiletken kullanımı; gerilim düşmeleri, gerilim çökmeleri gibi olayları azaltmaktadır.

Şekil 5.7.'de hattaki tüm iletkenlere ait güç kaybı grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Güç kaybı grafiği

Şekil 5.7.'de mevcut sistemdeki güç kaybı, diğer iki duruma göre daha fazla olmaktadır. En az güç kaybı ise Durum III'te yaşanmaktadır. Durum III'te kayıplar sıfıra çok yakındır. Süperiletken kablolar, doğru akımda kayıpsız, alternatif akımda ise çok düşük kayıplara sahiplerdir. Şebekenin tümünde süperiletken kullanmak, şebekede oluşan kayıpları neredeyse yok etmektedir. Böylelikle şebekede gerilim düşümü azalmış olur ve şebeke elemanları düşük voltajlarda çalışırlar. Sistemde kullanılan elemanların bakım maliyetleri azalır ve kullanım ömürleri uzar.

5.7. Tartışma ve Öneriler

Bu çalışma, süperiletkenlerle bir şebeke sisteminin tasarlanması durumunda; akım, gerilim, güç kaybı ve gerilim düşümü gibi parametrelerde meydana getirdiği değişimlerden oluşmaktadır. Süperiletkenler bir şebeke sisteminde kullanıldığında; temel özellikleri neticesinde şebekede meydana gelen kayıplar azalmaktadır. Bu çalışmada, ilk durumda Kocaeli iline ait Rabak fideri ele alınmıştır. İkinci aşamada tüm şebekedeki sadece yeraltı iletkenler süperiletkenler ile değiştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise, şebekede bulunan tüm iletkenler süperiletkenlerle değiştirilmiştir. Ve bu üç durumda şebekedeki akım, gerilim ve kısa devre durumlarında elde edilen parametrelerde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Enerji kalitesi denince akla gerilim seviyesinin başlangıç seviyesine en yakın düzeyde kalabilmesi ve güç kaybının minimum seviyede olması gelmektedir. Değişen ve gelişen teknoloji ile birlikte evlerimizde, işyerlerimizde vb. yerlerde kullanılan ekipmanlar gitgide daha çok elektrik ve elektronik ekipman içermektedir. Bu durum bir taraftan hayatımızı kolaylaştırırken, diğer taraftan da ekipmanların, beslendikleri kaynağın enerji kalitesine karşı daha duyarlı olmasına sebep olmaktadır. Enerji kalitesi; limit değerleri uluslararası standart otoriteleri tarafından belirlenmiş, ölçülen veya hesaplanan parametre değerlerinin limitler dahilinde olup olmaması durumudur. Ölçülen veya hesaplanan bu parametreler içerisinde gerilim düşmeleri, akım ve gerilim dengesizlikleri en önemli kısmını oluşturmaktadır. Süperiletkenlerin özellikle gerilimi belli seviyelerde iletebilme özelliği kaliteli enerji açısından büyük öneme sahiptir. Gerilimin sistemde aynı seviyede kalması iletim ve dağıtım sistemlerinde çok büyük bir gelişmeyi ifade etmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere bir iletim ve dağıtım

sistemi için kayıpsız enerji aktarımı ve gerilimi istenilen seviyede iletebilmek en önemli noktalardan biridir. Süperiletkenlerin iletim ve dağıtım sistemine entegrasyonu, gelecek sistemlerin kusursuz şekilde tasarlanmasına yardımcı olacaktır. Bu çalışmada üç durum için de yapılan analiz sonuçlarında, süperiletkenlerin gerilim düşümünü ve kayıpları büyük ölçüde azalttığı gözlenmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrik enerji sistemlerinden uzak bölgelere kurulduklarından HTS kabloları gelecekte bu sistemlerin şebekeye bağlantılarının kolayca yapılacağı, aynı zamanda da operasyonel gerilim sistemlerinde başarıyla faaliyet göstereceği düşünülmektedir. Özellikle de HTS kabloları uzak bölgelerde kurulan rüzgar enerji santrallerine enerji taşıyabilen modern elektrik tesislerinin temeli olarak da gösterilebilir.

Süperiletkenlik özelliği gösteren iletkenlerin sadece belli sıcaklıklarda bu özelliği göstermesi, günümüz şartlarına süperiletkenlerin entegrasyonunu zorlaştırmaktadır. Çünkü süperiletkenlik gösterilen sıcaklık değerleri normal şartlara uygun olmayıp, ekstra soğutucu sistemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu soğutucu sistemler de bir maliyet unsuru olmasından dolayı kayıplar azalmakla beraber maliyeti de büyük oranda arttırmaktadır. Aynı zamanda da bu soğutucu sistemlerin şebekede uygulanabilirliği kısıtlı olmaktadır. Çünkü arazi koşulları bu sistemin kullanımına olanak vermeyebilir.

Tüm bu durumlara bakılırsa gelecekte yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin normal koşullara daha fazla yaklaştırılması en temel şartlardan birini oluşturmaktadır. Eğer normal koşullara olabildiğince yaklaştırılırsa, sistem üzerinde kayıpsız enerji iletimi de gerçekleşecektir.

Çalışmanın bir diğer aşaması olan kısa devre durumlarında, süperiletken kabloların verdiği tepkiler diğer durum kadar iyi olamamıştır. Kısa devre durumunda süperiletken kablolardan normal duruma göre sistemden yaklaşık 5 kat kadar büyük değerde akım aktığı tespit edilmiştir. Süperiletkenlerin bu dezavantajını yok etmek amacıyla arıza akım sınırlayıcı sistemler geliştirilmiştir. Kısa devre akımını sınırlamakta kullanılan

Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılar, arıza anında yükselen arıza akımını direnç özelliği ile sınırlayarak güç sisteminin kararlılığına ve güvenilirliğine katkıda bulunmaktadır. Çalışmanın bu kısmı için kısa devre durumlarında sistemin kontrolünü SFCL'ler ile yapmak, güç sistemlerinin kısa devre arızalarından zarar görmemesi için en uygun yöntem olacağı düşünülmektedir.

Özetle; bir elektrik dağıtım şebekesinin süperiletkenlerle tasarlanması, sistem açısından büyük avantajlar sağlamaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Eroğlu, H., Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [2] Gemci, A., Kahramanmaraş Şehir Merkezi Dağıtım Şebekesinin Enerji Kalitesi Yönünden İncelenmesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [3] ee.tek.firat.edu.tr, Erişim Tarihi: 31.05.2019.
- [4] Çakır, Prof. Dr. H., Elektrik Şebeke Kayıpları, 2. Baskı, Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Kitap Komisyonu, 1-279, 1985.
- [5] Düzgün, B., Türkiye Elektrik İletim ve Dağıtım Şebekesinin Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi ve 2023 Projeksiyonları, Politeknik Dergisi, 21(3): 621-632, 2018.
- [6] Sargın, Ş., Üretimden Tüketime Elektrik Enerjisi Sistemlerinde Meydana Gelen Kayıplar ve Giderilmesine Yönelik Çalışmalar, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [7] Kurt, M., Elektrik Şebekelerinde Güç ve Enerji Kayıplarının Azaltılması Metotları, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2001.
- [8] Yaşar, C., Aslan, Y., Biçer, T., Bir Dağıtım Transformatörü Bölgesindeki Kayıpların İncelenmesi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1302-3055, Sayı 22, Ağustos 2010.
- [9] Yücel, M.E., Endüstriyel Elektrik, İstanbul, 19-42, 2002.
- [10] Terzioğlu, R., Çavuş, T. F., Enerji Verimliliği ve Süperiletken Malzemeler, VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Fuarı, Sakarya, 2015.
- [11] www.kozmikanafor.com, Erişim Tarihi: 21.06.2019.

- [12] Şenel, H., Süperiletkenlik Fenomeni, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Van, 2012.
- [13] www.deu.edu.tr, Erişim Tarihi: 21.06.2019.
- [14] Balakan, M., Süperiletkenlik, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fizik Öğretmenliği, AlanEğitiminde Araştırma Projesi, İstanbul, 2008.
- [15] Laquer, H., L., Edeskuty, F., J., Hassenzahl, W., V., Wipf, S., L., Stability Projections for High Temperature Superconductors, IEEE Transactions On Magnetism, Vol. 25, No. 2, 1516-1519, Mart 1989.
- [16] Hilal, M., A., Huang, X., Lloyd, J., D., High Temperature Superconductor Joints, IEEE Transactions On Magnetism, Vol. 27, No. 2, 927-930, Mart 1991.
- [17] Mukoyama, S., Miyoshi, K., Tsubouti, H., Yoshida, T., Mimura, M., Uno, N., Ikeda, M., Ishii, H., Honjo, S., Iwata, Y., Uniform Current Distribution Conductor of HTS Power Cable with Variable Tape-Winding Pitches, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, 1269-1272, Haziran 1999.
- [18] Johnson, B., K., Member, IEEE, An Assessment of Enabling Technologies for Transmission and Distribution Applications of Superconductors, IEEE, 1094-1095, 2003.
- [19] Cho, S., Kim, S.-H., Kim, D.-L., Im, K.-H., Yang, H.-S., Kim, D.-H., Jung, W.-M., Calculation of Alternating Current Distribution on the Current Lead for HTS Power Cable, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, 662-665, Haziran 2004.
- [20] Hara, T., Okuma, T., Yamamoto, T., Ito, D., Tasaki, K., Tsurunaga, K., Development Of A New 6.6kV/1500A Class Superconducting Fault Current Limiter For Electric Power Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No 1, 182-192, 1993.
- [21] Ye, L., Lin, L., Juengst, K.-P., Application Studies of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Systems, IEEE, 900-903, 2002.
- [22] Morishita, Y., Ishikawa, T., Yamaguchi, I., Okabe, S., Member, IEEE, Ueta, G., Yanabu, S., Life Fellow, IEEE, Applications of DC Breakers and Concepts for Superconducting Fault-Current Limiter for a DC Distribution Network, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 19, No.4, 3658-3664, Ağustos 2009.
- [23] Moon, J.-F., Lim, S.-H., Kim, J.-C., Yun, S.-Y., Assessment of the Impact of SFCL on Voltage Sags in Power Distribution System, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No.3, 2161-2164, Haziran 2011.

- [24] Morandi, A., State of The Art of Superconducting Fault Current Limiters and Their Application to The Electric Power System, *Physica C* 484 (2013) 242–247, 2012.
- [25] Ye, L., Member, IEEE, Majoros, M., Coombs, T., Campbell, A.,M., System Studies of the Superconducting Fault Current Limiter in Electrical Distribution Grids, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No.2, 2339–2342, June 2017.
- [26] Matheus, C., Haubrich, H.-J., Willen, D., Heuken, W., Fischer, R., Industrial Distribution Networks with Superconducting Cables, 1-6.
- [27] Amemiya, N., Banno, N., Inaho, K., Tsukamoto, O., AC Losses in Multifilamentary Superconductors Carrying Transport Current and Exposed to External Magnetic Field-Analysis of Temporal Evolution of Current Distribution, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 5, No. 2, 984-987, Haziran 1995.
- [28] Fukunaga, T., Inada, R., Oota, A., Current Distributions and AC Losses in Self-Fields for Superconductor Tapes and Cables, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 2, 1057-1060, Haziran 1999.
- [29] Watabe, A., Fukui, S., Yamaguchi, M., Sato, T., Takao, T., Tsukamoto, O., Numerical Analysis of AC Loss and Current Distribution Characteristics of Co-Axial Multi-Layer High Temperature Superconducting Cable, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 14, No. 2, 678-681, Haziran 2004.
- [30] Hamajima, T., Yagai, T., Tsuda, M., Harada, N., Current Distribution Analysis in Tri-Axial HTS Cable Considering Three Phases, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, 1775-1778, Haziran 2005.
- [31] McConnell, B., W., Applications of High Temperature Superconductors to Direct Current Electric Power Transmission and Distribution, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, 2142-2145, Haziran 2005.
- [32] Chowdhuri, P., Fellow, IEEE, Pallem, C., Student Member, IEEE, Demko, J., A., Gouge, M., J., Feasibility of Electric Power Transmission by DC Superconducting Cables, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 4, 3917-3926, Aralık 2005.
- [33] Fukui, S., Noguchi, T., Ogawa, J., Yamaguchi, M., Sato, T., Tsukamoto, O., Analysis of AC Loss and Current Distribution Characteristics of Multi-Layer Triaxial HTS Cable for 3-Phase AC Power Transmission, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 16, No. 2, 1-4, Haziran 2006.

- [34] Nguyen, D., A., Ashworth, S., P., Duckworth, R., Carter, W., Fleshler, S., Measurements of AC Losses and Current Distribution in Superconducting Cables, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, 996-1001, Haziran 2011.
- [35] Stemmle, M., Merschel, F., Noe, M., Hofmann, L. and Hobl, A., Superconducting MV Cables to Replace HV Cables in Urban Area Distribution Grids, IEEE, 1-5, 2012.
- [36] Li, Z., M., Liu, W., Zhu, J., H., Qiu, M., Zheng, X., D., Fang, J., Temperature and Current Distribution of High Temperature Superconducting Cable Itself Under Large Fault Current, Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices Shanghai, China, 1-2, 20-23.Kasım.2015.
- [37] Shen, B., Coombs, T., Grilli, F., Investigation of AC Loss in HTS Cross-Conductor Cables for Electrical Power Transmission, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 29, No. 2, 1-5, Mart 2019.
- [38] IEEE Task Force on Benchmark Models for Digital Simulation of FACTS and Custom-Power Controllers, T&D Committee, Detailed Modeling of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, No. 2, 699-710, April 2006.
- [39] Shikimachi, K., Hirano, N., Nagaya, S., Kawashima, H., Higashikawa, K., Nakamura, T., System Coordination of 2 GJ Class YBCO SMES for System Power Control, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, 2012-2018, June 2009.
- [40] Aydoğan, V., DigSilent Power Factory ile Modelleme ve Analiz, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Proje Raporu, 2013.
- [41] cesur.ankara.edu.tr, Erişim Tarihi: 17.09.2019.
- [42] Elsherif, M., A., The Application of Superconducting Technologies in Future Electrical Power Systems, Durham University, Durham E-Theses, 2013.
- [43] Grant, P., M., Superconductivity and Electric Power: Promises, Promises...Past, Present and Future, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, 112-133, Haziran 1995.
- [44] Hassenzahl, W., V., Hazelton, D., W., Johnson B., K., Komarek, P., Noe, M., Reis, C., T., Electric Power Applications of Superconductivity, Proceedings of The IEEE, Vol., 92, No. 10, 1-20, Ekim 2004.

- [45] Malozemoff, A., P., The New Generation of Superconductor Equipment for the Electric Power Grid, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 1, 1-5, Mart 2006.
- [46] Malozemoff, A., P., Maguire, J., Gamble, B. And Kalsi, S., Power Applications of High Temperature Superconductors: Status and Perspectives, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, 1-4, Mart 2002.
- [47] www.nexans.com.tr, Erişim Tarihi: 08.10.2019.
- [48] Xi, H., Gong, W., Zhang, Y., Bi, Y., Ding, H., Wen, H., Hou, B., ve Xin, Y., China's 33.5 m, 35kV/2kA HTS AC Power Cable's Operation in Power Grid, Physica C: Superconductivity, Vol. 445, 1054-1057, 2006.
- [49] Eckorad, S., Superconducting Power Cables, Electric Power Research in Institute, 2009.
- [50] Choi, Y., Kim, D., Yang H., Sohn, S., Lim, J. Ve Hwang, S., Progress on the Performance Test of KEPCO HTS Cable, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1-1, 2011.
- [51] Yılmaz, B., Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcıların İncelenmesi ve Elektrik İletim Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, 1-90, Temmuz 2016.
- [52] Drozdov, A., P., Kong, P., P., Minkov, V., S., Besedin, S., P., Kuzovnikov, M., A., Mozaffari, S., Balicas, L., Balakirev, F., F., Graf, D., E., Prakapenka, V., B., Greenberg, E., Knyazev, D., A., Tkacz, M., Eremets, M., I., Superconductivity at 250 K in Lanthanum Hyride Under High Pressures, Nature 569, 528-531, Mayıs 2019.
- [53] Terzioğlu, R., Vojenčiak, M., Sheng, J., Gömöry, F., Çavuş, T., F., Belenli, İ., AC Loss Characteristics of CORC[®] Cable with a Cu Former, Superconductor Science and Technology, Volume 30, Number 8, 14 Temmuz 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Kevser GÖK, 30.09.1989'da Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2007 yılında Sakarya Hendek Atike Hanım Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında bitirdi. 2011-2012 yılları arasında ARIMED Elektrik firmasında Elektrik Mühendisi olarak çalıştı. 2012-2014 yılları arasında Dumlupınar Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Kontrol Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2012 yılında başladığı Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Lojistik programını 2014 yılında tamamladı. 2014 yılında Tedaş Sakarya Bölge Müdürlüğü'nde Elektrik Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Tedaş Sakarya Bölge Müdürlüğü'nde Elektrik Mühendisi olarak görev yapmaktadır.