

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ NAKİL HATTINDA KULLANILAN YÜKSEK SICAKLIK
SÜPERİLETKEN (HTS) KABLO İLE GELENEKSEL BAKIR KABLO
KARŞILAŞTIRMASI

YÜKSEK LİSANS

Ahmet Burak SANLAV

HAZİRAN-2023
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ENERJİ NAKİL HATTINDA KULLANILAN YÜKSEK SICAKLIK
SÜPERİLETKEN (HTS) KABLO İLE GELENEKSEL BAKIR KABLO
KARŞILAŞTIRMASI**

**COMPARISON OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR (HTS)
CABLE USED IN ENERGY TRANSMISSION LINE AND TRADITIONAL
COPPER CABLE**

YÜKSEK LİSANS

Ahmet Burak SANLAV

**HAZİRAN-2023
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ENERJİ NAKİL HATTINDA KULLANILAN YÜKSEK SICAKLIK
SÜPERİLETKEN (HTS) KABLO İLE GELENEKSEL BAKIR KABLO
KARŞILAŞTIRMASI**

**COMPARISON OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR (HTS)
CABLE USED IN ENERGY TRANSMISSION LINE AND TRADITIONAL
COPPER CABLE**

YÜKSEK LİSANS

Ahmet Burak SANLAV

Danışman: Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU

**HAZİRAN-2023
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Enerji Nakil Hattında Kullanılan Yüksek Sıcaklık Süperiletken (HTS) Kablo İle Geleneksel Bakır Kablo Karşılaştırması**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

15/062023

.....
Ahmet Burak SANLAV

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim hayatım boyunca bana yardımlarını, bilgi ve deneyimlerini tez çalışması boyunca tüm aşamalarına kadar desteğini ve bana yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitim sürecimde her türlü destek ve iletişim yardımını sağladıkları için Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca her konuda bana destekçi olan eşim Gamze SANLAV'a teşekkür ederim.

Ahmet Burak SANLAV
GÜMÜŞHANE – 2023

ÖZET

Günümüzde enerji üretiminin öneminin olduğu kadar üretilen bu enerjinin de son tüketiciye de kadar taşınması bir hayli önemlidir. Enerji dağıtımını yapılırken tüketicie ulaşana dek enerji kalitesini en iyi şekilde sağlamak gerekmektedir. Bu enerji kalitesini sağlayabilmek için hatta oluşabilecek gerilim düşümü, güç kaybı, yük akışı, akım kaybı parametrelerini en aza indirmek gerekmektedir. Bu çalışmada geleneksel iletken ile süperiletkeni 154 kV, 66 kV ve 34.5 kV şebeke değerindeki enerji dağıtım hattında Digsilent powerfactory programı kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Sırasıyla 154 kV, 66 kV ve 34.5 kV değerinde olan şebekelerde farklı iletken uzunlukları ile süperiletken ve geleneksel iletkenin analiz sonuçları elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bu simülasyon sonucunda, iki farklı iletkenin elektriksel kayıp analizleri grafikler üzerinden karşılaştırarak, enerji dağıtım hatlarında geleneksel iletken yerine süperiletkenlik kullanıldığı durumda enerji kayıpları en az seviyeye inerek nihai tüketiciye ulaşacaktır.

Anahtar Kelimeler: Süperiletken, Geleneksel iletken, DigSilent power factory, Gerilim düşümü, Elektriksel kayıplar

SUMMARY

At the present time, it is very important to carry this produced energy to the end consumer as well as the importance of energy production. While distributing energy, it is necessary to ensure the energy quality in the best way until it reaches the consumer. In order to provide this energy quality, it is necessary to minimize the voltage drop, power loss, load flow, current loss parameters that may occur in the line. In this study, simulation studies were carried out using the Digsilent powerfactory program on a traditional conductor and superconductor 154 kV, 66 kV and 34.5 kV mains power distribution line. Analysis results of superconductor and conventional conductor with different conductor lengths in networks with 154 kV, 66 kV and 34.5 kV values, respectively, were obtained. As a result of this simulation, electrical loss analyzes of two different conductors will be compared on graphs, and in case of using superconductivity instead of traditional conductor in energy distribution lines, energy losses will be minimized and reach the final consumer.

Keywords: Superconductor, Conventional conductor, DigSilent power factory, voltage drop, Electric losses

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	IV
TEŞEKKÜR	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GİRİŞ	1
2. SÜPERİLETKEN	2
2.1. Süperiletkenin Tarihçesi	2
2.2. Süperiletkenlik Parametleri	3
2.2.1. Kritik Sıcaklık (T_C)	3
2.2.2. Kritik Manyetik Alan (H_c)	4
2.2.3. Kritik Akım	4
2.3. Meissner Etkisi	5
2.4. I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler	6
2.4.1. I. Tip Süperiletken	6
2.4.2. II. Tip Süperiletken	6
2.4.3. Düşük Sıcaklık Süperiletken (LTS) ve Yüksek Sıcaklık Süperiletken (HTS) Sınıflandırılması	7
2.5. Süperiletkenlik Uygulama Alanları	9
2.5.1. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)	9
2.5.2. Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcıları	10
2.5.3. Süperiletken Sargılı Trafolar	11
2.5.4. HTS Kablolar	12
2.5.5. HTS Kablo Tasarımları	12
2.5.6. HTS Kablo Avantajları	13
2.5.7. Süperiletken Kablo Projeleri	14
3. ENERJİ ÜRETİM, İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMİ	17
3.1. Enerji Tarihçesi	17
3.2. Enerji Üretim, İletim ve Dağıtım Sisteminin Genel Yapısı	17

3.3.	Enerji Nakil Hatları	18
3.3.1.	Havai Hat Kullanım Avantajları	18
3.3.2.	Havai Hat Kullanım Dezavantajları	19
3.4.	Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan İletkenler	19
3.4.1.	Bakır İletkenler.....	19
3.4.2.	Alüminyum İletkenler (AAC)	20
3.4.3.	Çelik Özlü Alüminyum İletkenler (ACSR).....	20
3.5.	Enerji Nakil Hattı Kayıpları	21
3.5.1.	Teknik Kayıplar.....	21
3.5.2.	Teknik Olmayan Kayıplar	22
3.6.	Literatür Özeti	23
4.	MATERYAL VE YÖNTEM	25
4.1.	DigSilent Power Factory Programı	25
4.2.	DigSilent Programının Temel Özellikleri	25
4.3.	DigSilent ile Çalışmanın Yürütülmesi	26
5.	BULGULAR	31
5.1.	Yüksek Gerilim Hattında Yapılan Analiz Sonuçları.....	31
5.2.	Orta Gerilim Hattında Yapılan Analiz Sonuçları	49
6.	SONUÇLAR.....	60
	KAYNAKÇA.....	62
	ÖZGEÇMİŞ	65

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Süperiletken bazı elementlerin kritik sıcaklıkları.....	3
Tablo 2. Elektrik şebeke elemanlarındaki enerji kayıpları	23
Tablo 3. 154 kV şebekesinde geleneksel iletken değerleri.....	31
Tablo 4. 154 kV şebekesinde geleneksel iletken hat analiz sonuçları.....	34
Tablo 5. 154 kV şebekesinde süperiletken değerleri	34
Tablo 6. 154 kV şebekesinde süperiletken analiz sonuçları	37
Tablo 7. 66 kV şebekesinde geleneksel iletken değerleri.....	40
Tablo 8. 66 kV şebekesinde geleneksel iletken hat analiz sonuçları.....	43
Tablo 9. 66 kV şebekesinde kullanılan süperiletken değerleri	43
Tablo 10. 66 kV şebekesinde süperiletken hat analiz sonuçları	46
Tablo 11. 34.5 kV şebekesinde kullanılan geleneksel iletken değerleri.....	49
Tablo 12. 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken hat analiz sonuçları.....	52
Tablo 13. 34.5 kV şebekesinde süperiletken değerleri	52
Tablo 14. 34.5 kV şebekesinde süperiletken hat analiz sonuçları	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Süperiletken ve normal metalin sıcaklık değişimi üzerinde direnç karşılaştırılması.....	2
Şekil 2. Civanın sıcaklık direnç grafiği	3
Şekil 3. Meissener etkisi	6
Şekil 4. I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerin manyetik alandaki davranışları	7
Şekil 5. Sıcak dielektrik ve soğuk dielektrik yüksek sıcaklı süperiletken kablo tasarımı	9
Şekil 6. Süperiletken manyetik enerji depolama çalışma sistemi	10
Şekil 7. Rezistif süperiletken arıza akım sınırlayıcı eşdeğer devresi.....	11
Şekil 8. Sıcak dielektrik süperiletken kablo tasarımı.	13
Şekil 9. Soğuk dielektrik süperiletken kablo tasarımı.	13
Şekil 10. Enerji Dağıtım Sistemi	17
Şekil 11. Bakır iletken kablo yapısı.....	19
Şekil 12. Alüminyum iletken kablo yapısı	20
Şekil 13. Çelik özlü alüminyum iletkenin yapısı ve perspektif görünüşleri.....	21
Şekil 14. Digsilent PowerFactory programında şebeke güç girişi.....	26
Şekil 15. Digsilent PowerFactory programında iletkene bağlantılı bara değeri girişi.....	27
Şekil 16. Digsilent PowerFactory programında iletken hattın uzunluk değeri.....	28
Şekil 17. Digsilent PowerFactory programında hattın voltaj, akım ve direnç değeri girişi.....	29
Şekil 18. Digsilent PowerFactory programında yükün güç değeri girişi	29
Şekil 19. Geleneksel iletken ve süperiletken tek hat şeması	30
Şekil 20. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 1 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	32
Şekil 21. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	32
Şekil 22. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	32
Şekil 23. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 350 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	33

Şekil 24. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 500 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	33
Şekil 25. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 1 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	34
Şekil 26. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	35
Şekil 27. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	35
Şekil 28. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 350 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	36
Şekil 29. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 500 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	36
Şekil 30. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre akım kaybı	37
Şekil 31. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre gerilim düşümü.....	38
Şekil 32. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre güç kaybı	38
Şekil 33. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre reaktif güç kayıpları.....	39
Şekil 34. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre yük akışı	40
Şekil 35. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	41
Şekil 36. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 50 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	41
Şekil 37. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 90 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	42
Şekil 38. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	42
Şekil 39. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 200 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	42
Şekil 40. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	44

Şekil 41. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 50 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	44
Şekil 42. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 90 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	44
Şekil 43. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	45
Şekil 44. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 200 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	45
Şekil 45. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre akım kaybı	46
Şekil 46. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre gerilim düşümü	47
Şekil 47. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre güç kaybı.....	47
Şekil 48. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre reaktif güç kaybı	48
Şekil 49. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre yük akışı.....	49
Şekil 50. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	50
Şekil 51. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 20 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	50
Şekil 52. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 40 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	50
Şekil 53. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 60 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	51
Şekil 54. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	51
Şekil 55. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	53
Şekil 56. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 20 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	53
Şekil 57. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 40 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	54

Şekil 58. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 60 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	54
Şekil 59. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri	54
Şekil 60. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre akım kaybı	56
Şekil 61. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre gerilim düşümü	56
Şekil 62. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre güç kaybı.....	57
Şekil 63. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre reaktif güç kaybı	58
Şekil 64. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre yük akışı.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

T	: Sıcaklık
T_c	: Kritik Sıcaklık
K	: Kelvin
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
H_{c2}	: II. Tip süperiletkenlerde üst kritik manyetik alan
HTS	: Yüksek sıcaklık süperiletkenleri
LTS	: Düşük sıcaklık süperiletkenleri
R	: Direnç
In	: İndiyum
r	: Yarıçap
kV	: Kilovolt
kA	: Kiloamper
km	: Kilometre
MW	: Megawatt
Mvar	: Megawatt var
A	: Amper
Hz	: Hertz
WD	: Sıcak dielektrik tasarım
CD	: Soğuk dielektrik tasarım
MRI	: Manyetik rezonans görüntüleme

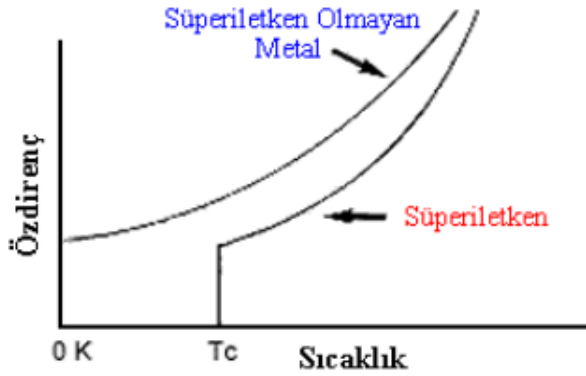
AG : Alçak gerilim
 τ : Zaman sabitesi
E : Depolanan enerji
L : Endüktif
I : Akım
 R_h : Hat direnci
 L_h : Hat empedansı
 R_{sc} : Hattaki süperiletken arıza akım sınırlayıcı
 R_k : Koruma direnci
AAC : Tam alüminyum
ACSR : Çelik özlü alüminyum
 I_b : Bobin akımı
 V_b : Bobin gerilimi
SFCL : Süperiletken arıza akım sınırlayıcı
 LN_2 : Sıvı Azot

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Özellikle enerji üretiminde kullanılan fosil yakıt rezervlerinin azalması insanları alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Bunun yanında fosil yakıtlarının hava kirliliği yapması temiz enerji diye adlandırılan enerji türlerini ön plana çıkarmaktadır. Elektrik enerjisi bunların en önemlisidir. Son yıllarda artan elektrikli arabalar bunun bir göstergesidir. Enerji ihtiyacının giderek artmasıyla yeni çözümler de gelişmektedir. Enerji santrallerinde üretilen elektrik birbirine paralel bağlantı noktalarına sahip enerji nakil hatları ile evlere, işletmelere, fabrikalara vb. gibi meskenlere ulaşarak tüketim gerçekleşmektedir. Enerji üretim tesisleri olan santrallerde üretilen elektrik öncelikle dağıtım merkezlerine ulaşmakta, dağıtım merkezinden mahallelere oluşan alçak gerilim (AG) trafolarla gelmekte ve oradan da tüketicilere ulaşmaktadır. Enerji nakil hatlarında taşınan bu elektrik, bizlere ulaşana kadar akımın geçtiği iletken kablolar üzerinde belli kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıpların nedeni ise iletkenlerin akıma karşı gösterdiği dirençtir. 19. yy' da Onnes adlı bilim adamı cıva üzerinde yaptığı çalışmalar ile bazı iletkenlerin belirli sıcaklıklarda direncinin sıfır olduğunu keşfederek, bu olaya süperiletkenlik adını vermiştir. Bu çalışmada süperiletken tel ile geleneksel tellerin enerji nakil hatlarında kullanılması ile oluşacak kayıp ve verimlik DigSilent Powerfactory programı ile analiz edilmiştir. 154 kV, 66 kV ve 34.5 kV şebekelerinde geleneksel iletken ve süperiletken kullanılarak hattaki gerilim düşümü, akım kaybı, reaktif güç kaybı ve yük akış analizlerine bakılmıştır.

2. SÜPERİLETKEN

Süperiletken olayı, bir maddenin sıcaklığının belli bir değerin altına indiği zaman elektriksel direncinin yok olmasıdır. Bilinene göre iletken bir bakır tel üzerinden akım geçtiğinde, akımın büyüklüğüne ve bakır telin kesitine bağlı taşınan akım alıcıya ulaşana kadar belli kayıplara sebep olur ve bunun nedeni taşınan akıma karşı oluşan dirençtir. Bu oluşan kayıpları engellemenin yolu direnci sıfıra indirmektir. Yukarıda bahsedilene göre 1911 yılında Onnes adında bilim adamı süperiletken maddeyi bulmuş ve süperiletken madde belirli bir sıcaklığa düşürüldüğünde maddenin direnci sıfıra düşmektedir. Süperiletken olmayan madde ise direncini korumaya devam etmektedir. (Şekil 1). Direnci sıfıra düşen maddenin üzerinden akım taşınabildiğinde ise alıcıya vardığında kayıp oluşmasını engelleyecektir.

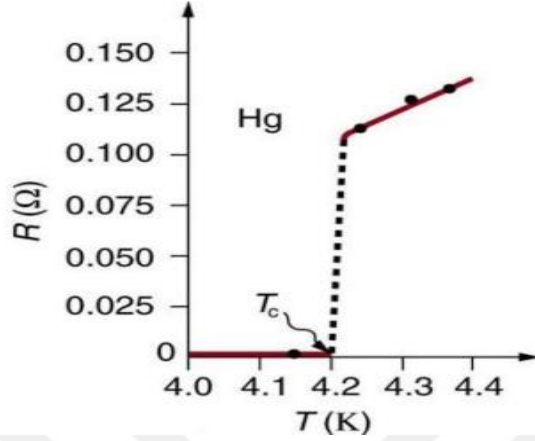


Şekil 1. Süperiletken ve normal metalin sıcaklık değişimi üzerinde direnç karşılaştırılması (Kılıç, 2008).

2.1. Süperiletkenin Tarihçesi

Süperiletkenlik 19.yy başların da Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes tarafından keşfedildi. Onnes, Leiden şehrindeki laboratuvar da Helyum gazını sıvılaştırması ile düşük sıcaklıklarda iletkenlerin elektriksel özelliklerini inceleme fırsatı buldu. Yaptığı çalışmalarda cıvayı soğutarak belli bir sıcaklığa ulaştığında direncin giderek azaldığını görmüş ve 4.2 K sıcaklığına düşüldüğünde direncin aniden sıfır olduğunu gözlemlemiştir (Şekil 2). Onnes cıvadan sonra kalay, kurşun, alüminyum gibi

metallerin de belli bir sıcaklığa ulaştığında süperiletken özellik gösterdiğini gözlemlemiştir. Onnes süperiletken buluşu sayesinde Nobel Fizik Ödülü'nü de almıştır.



Şekil 2. Civanın sıcaklık direnç grafiği (Çavuş ve Terzioğlu, 2015).

2.2. Süperiletkenlik Parametreleri

Bir maddenin süperiletkenlik özelliğini karakterize eden belirli parametreler vardır. Aşağıda bu parametrelerden kısaca bahsedildi.

2.2.1. Kritik Sıcaklık (T_c)

Kritik sıcaklık veya süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı, süperiletken bir malzemenin düşük sıcaklıklara soğutulmasıyla direncini kaybettiği sıcaklık olup T_c ile gösterilir. (Öztürk, 2006) Bu sıcaklık, süperiletken malzemenin elektrik direncinin sıfıra düştüğü ve süperiletken özelliklerin göstermeye başladığı sıcaklık değeridir. Kritik geçiş sıcaklığı, her süperiletken malzeme için farklı olabilir ve malzemenin kimyasal bileşimine, kristal yapısına ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Süperiletkenlik genellikle çok düşük sıcaklıklarda, sıfırın altında gerçekleşir. Tablo 1' de bazı elementlerin kritik sıcakları gösterilmiştir.

Tablo 1. Süperiletken elementlerin kritik sıcaklıkları (Çavuş ve Terzioğlu, 2015).

Element	T_c (K)
In	3.40
Hg	4.015

Tablo 1. (Devamı)

Element	T _c (K)
Nb ₃ Al	17.5
NbTi	10.0

2.2.2. Kritik Manyetik Alan (H_c)

Kritik manyetik alan, bir süperiletken malzemenin süperiletken özelliğini kaybettiği ve normal iletken hâline döndüğü manyetik alan şiddetidir. Süperiletken malzemeler, belirli bir kritik manyetik alan değerinin altında, manyetik alanı tamamen dışarı iter ve içlerinde mıknatıslanma oluşmaz. Ancak kritik manyetik alanın üzerindeki değerlerde, süperiletkenlik ortadan kalkar ve malzeme normal iletken davranışını gösterir.

Malzemelerin süperiletken özelliklerine zarar vermeden bir süperiletkene uygulanabilecek manyetik alanın bir üst sınırı vardır (Körpe,2019). Kritik manyetik alan, süperiletken malzemenin özelliklerine, yapısal özelliklerine ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişir. Süperiletken malzemelerin kritik manyetik alan değeri genellikle birim alanda (örneğin, tesla) ifade edilir. Malzemenin kritik manyetik alanı, manyetik alanın malzeme üzerindeki etkisiyle ilgili birçok uygulama ve araştırma alanında önemli bir parametredir.

2.2.3. Kritik Akım

Kritik akım, bir süperiletken malzemenin süperiletken özelliğini kaybettiği ve normal iletken davranışa geçtiği akım şiddetidir. Süperiletken bir malzemeden, belirli bir kritik akım değerinin üzerinde akım geçirdiğinde süperiletkenlikleri sona erer ve elektriksel direnç ortaya çıkar. Kritik manyetik alan ve kritik akım arasında ki bağıntı eşitlik 1 denklemi ile açıklanabilir.

$$I_C = 2\pi H_C r \quad (\text{Eşitlik 1})$$

$$I_C = \text{Kritik akım}$$

$$H_C = \text{Kritik Manyetik Alan}$$

r = Silindirik telin yarıçapı

Kritik akım değeri, süperiletken malzemenin yapısal özelliklerine, çalışma sıcaklığına ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Kritik akım, malzemenin taşıyabileceği maksimum akım sınırlamasını belirler. Kritik akım genellikle birim alanda (örneğin, amper/metrekare) ifade edilir.

Süperiletken malzemelerin kritik akım değeri, süperiletkenlik üzerinde etkili olan manyetik alanın gücü, malzeme geometrisi ve soğutma koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle kritik akım değeri, süperiletken malzemelerin tasarımında ve uygulamalarında önemli bir parametredir. Özellikle elektromanyetik cihazlarda ve enerji iletim sistemlerinde kullanıldığında dikkate alınması gereken bir faktördür.

2.3. Meissner Etkisi

Meissner etkisi, süperiletken bir malzeme manyetik alan etkisi altına girdiğinde ortaya çıkan bir fenomendir. Meissner etkisi, süperiletken malzemenin manyetik alanı tamamen dışarı iter ve içerisinde manyetik alanın bulunmadığı bir durumu ifade eder.

Bir süperiletken malzeme düşük sıcaklıklarda kritik sıcaklık altında olduğunda, manyetik alan malzemenin içine nüfuz etmeyerek tamamen dışarı atılır. Bu etki, süperiletken malzemenin manyetik alanı reddetme yeteneği sayesinde ortaya çıkar. Manyetik alan malzeme yüzeyinde yoğunlaşır ve malzeme içindeki süperiletken akımlar sayesinde manyetik alanın etkisi nötralize edilir.

Meissner etkisi, süperiletkenlikteki temel bir özellik olup, manyetik sürtünmenin olmadığı ve enerjinin verimsiz bir şekilde harcanmadığı uygulamalarda büyük önem taşır. Bu fenomen, süperiletken mıknatıslar, manyetik sürtünmesiz yükselticiler ve manyetik levitasyon gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Şekil 3 'te bir süperiletkenin üzerine konulmuş bir mıknatısı havaya kaldırması (meissner etkisi) görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. Meissener etkisi (ITAP, 2021).

2.4. I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler

I. Tip ve II. Tip süperiletkenler arasındaki ayrım, süperiletken malzemelerin manyetik alan etkileşimi ve süperiletkenlik kaybı konusundaki farklı davranışlarından kaynaklanır.

2.4.1. I. Tip Süperiletken

I. Tip süperiletkenler, manyetik alan etkisi altında belirli bir kritik manyetik alan değeri üzerinde süperiletkenliklerini kaybeden ve normal iletken davranışa geçen malzemelerdir. I. Tip süperiletkenlerde, manyetik alan süperiletken malzemenin içine sınırlı bir ölçüde nüfuz eder ve süperiletkenlik tamamen ortadan kalkar. Bu süperiletkenlik kaybı keskin bir şekilde gerçekleşir.

I. Tip süperiletkenlerde, manyetik alan ve akım dağılımı homojen değildir. Manyetik alan süperiletken malzemenin içine girerken, süperiletkenlik kaybolan bölge (normal bölge) ortaya çıkar ve manyetik alan bu bölgede yoğunlaşır (Şekil 4). Tip 1 süperiletkenlerde süperiletkenlik ve normal iletkenlik arasındaki geçiş keskindir.

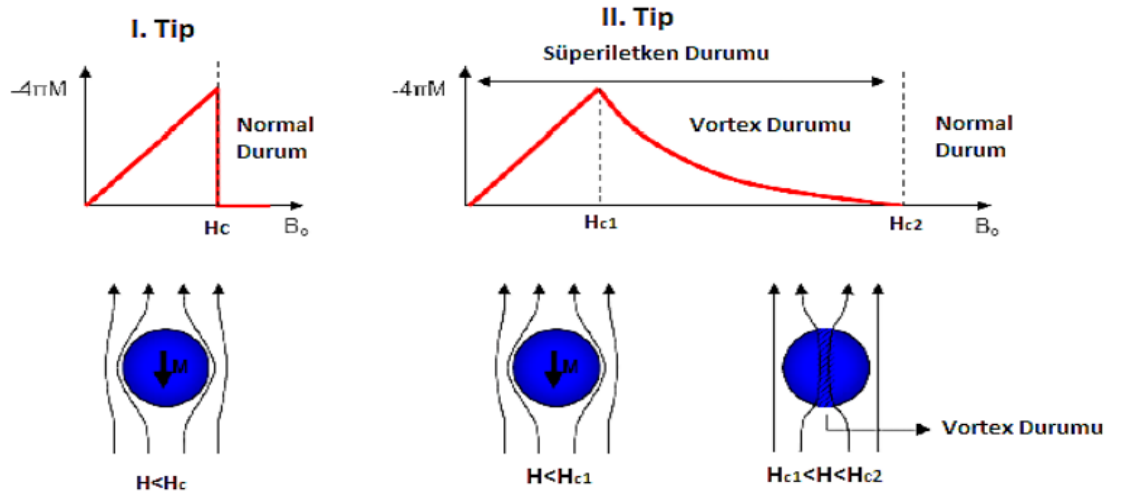
Bu tip süperiletkenlerin pratik uygulamalarda kullanımı genellikle sınırlıdır, çünkü manyetik alan etkisi altında süperiletkenlik kaybı hızlı ve keskin bir şekilde gerçekleşir. Bu nedenle, manyetik sürtünmesiz uygulamalarda kullanılmaları zor olabilir.

2.4.2. II. Tip Süperiletken

II. Tip süperiletkenler, daha geniş bir manyetik alan aralığında süperiletkenlik gösteren malzemelerdir. Bu tip süperiletkenlerde, kritik manyetik alanın üzerindeki değerlerde süperiletkenlik kaybolmaz ancak manyetik alanın etkisi altında bazı süperiletken akımlar oluşur. Manyetik alanın etkilediği bölge, manyetik akı tüpü olarak

adlandırılır. II. Tip süperiletkenlerin iki tane kritik manyetik alan değeri vardır (Şekil 4). Süperiletken H_{C1} 'in altında I. Tip süperiletken gibi davranır ve bu durumda meissner etkisi gözlemlenir. H_{C1} ile H_{C2} arasında vortex durumu (karışık hal) durumundadır. Burada örnek üzerinde süperiletken olmayan bölgeler oluşur ve bu bölgelerden manyetik alan örneğe nüfuz eder. H_{C2} 'nin üzerinde süperiletkenlik bozulur.

II. Tip süperiletkenlerin pratik uygulamalarda kullanımı daha yaygındır. Manyetik alanı daha iyi tolere edebilen ve daha yüksek kritik akım değerlerine sahip oldukları için manyetik sürtünmesiz levitasyon sistemleri, elektromıknatıslar, yüksek alan uygulamaları gibi alanlarda kullanılırlar.



Şekil 4. I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerin manyetik alandaki davranışları (Akdere, 2022).

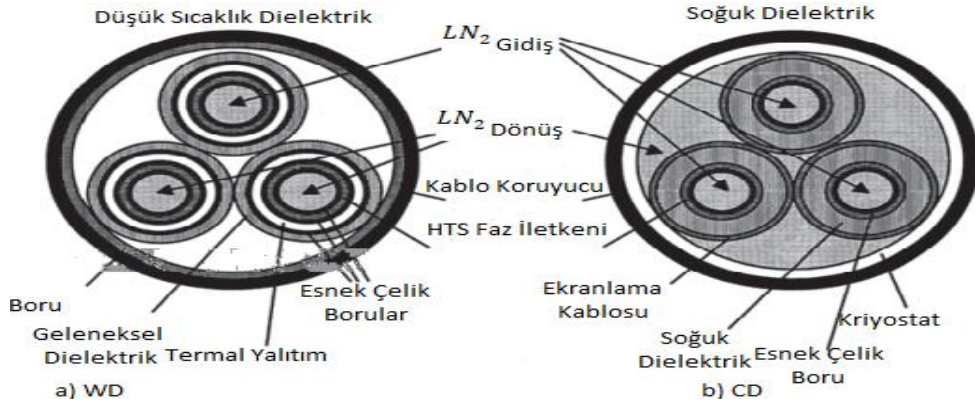
2.4.3. Düşük Sıcaklık Süperiletken (LTS) ve Yüksek Sıcaklık Süperiletken (HTS) Sınıflandırılması

İlk keşfedilen süperiletken malzeme 4.2 kelvin sıcaklığında süperiletken özellik gösterdiği bilinmektedir. Bir malzemenin süperiletkenlik gösterebilmesi için malzemeyi belirli bir kritik sıcaklık altında soğutmak gerekmektedir. Bu sıcaklık değeri, malzemenin türüne göre değişkenlik gösterebilmektedir. Düşük sıcaklık süperiletkeninin de kritik sıcaklık 30 kelvin sıcaklığından azdır (Kanbur, 2015). Düşük sıcaklık süperiletkenleri ilk 1911' de keşfedildi. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri, kritik sıcaklıkları daha yüksek değerlerde sıvı azotun kaynama sıcaklığı olan 77 Kelvin ya da -196.15 celsius sıcaklığında göstermektedir. İlk keşfedilen yüksek sıcaklık süperiletkeni 1986 yılında bakır-oksit karışımı $YBa_2Cu_3O_7$ (İtriyum, Baryum, Bakır, Oksit bileşiğidir). Yüksek

sıcaklık süperiletkenleri düşük sıcaklık süperiletkenlere göre soğutma yöntemleri daha kolay ve düşük maliyetli olması sebebiyle uygulama alanları fazladır.

LTS süperiletkenlerinde soğutma için helyum gazı kullanılmaktadır. Helyum gazı ile çalışan bir soğutma sisteminde istenilen sıcaklığa yaklaşmak çok zordur. Ayrıca, sıvı helyum normal kullanım için çok pahalıdır. LTS süperiletkeninden sünek olması sebebiyle iletken yapmak kolaydır, ancak sıfıra yakın mutlak sıcaklıkta çalışmasının güç iletim sistemi gibi endüstriyel alanda kullanılması çok zordur. Ancak HTS, 77 K civarında süperiletkenlik özelliğine sahip olduğundan sıvı Azot [LN_2] ile soğutulur, HTS ile normal oda sıcaklığı arasındaki sıcaklık gradyanı LTS durumuna göre çok daha düşüktür, HTS kablosu için soğutma sistemi tasarlamayı kolaylaştırır. HTS iletkenlerinin plastisitesi LTS' den daha kötü olduğu için üretimi ve işlenmesi daha zordur, ancak güç kablosu uygulaması olarak LTS' ye kıyasla maliyet etkin bir önlem olarak kabul edilmektedir. Şu anda LTS iletkenleri, MRI (manyetik rezonans görüntüleme) sistemi gibi özel uygulamalar için kullanılmaktadır. Güç iletimi için HTS kablosu iki tip tasarımla geliştirilmiştir. Biri (WD (Sıcak Dielektrik Tasarım), diğeri CD (Soğuk Dielektrik Koaksiyel Tasarım). Şekil 5' te WD ve CD HTS kablosunun kesitini göstermektedir. Sıcak dielektrik, HTS kablosunu dış çemberinde tutan boru tipi şekillendiricide akar. HTS iletkenleri, ısı transferini yalıtan kriyostat ile çevrilidir. Dielektrik, kriyostatın dışında bulunur. Bu nedenle dielektrik, LN_2 ile soğutulmaz. WD tipi HTS kablosu, yalnızca geleneksel kablo boyutunu korumakla ve kanıtlanmış dielektrik malzemeleri kullanmakla kalmayıp, aynı zamanda sınırlı sayıda HTS iletkeni kullanıldığından, soğutma sisteminin tasarımında maliyet etkin ve verimlidir. Bununla birlikte, kalkan katmanının atlanması, fazdan faza manyetik etkileşim üretir ve güç aktarım kapasitesini sınırlar.

Ancak CD HTS kablosunun kesiti olan şekil 5'te gösterilen LN_2 kablonun dış ve iç kanalını akar ve sadece HTS iletkenini değil dielektrik malzemeyi de soğutur. CD ve WD arasındaki bir diğer önemli fark, CD'nin dış manyetikleri koruyan ve düşük endüktans yapan dönüş HTS ekranlama iletkenlerine sahip olmasıdır.



Şekil 5. Sıcak dielektrik ve soğuk dielektrik yüksek sıcaklı süperiletken kablo tasarımı (Lee,2011).

2.5. Süperiletkenlik Uygulama Alanları

Süperiletken malzemelerin kullanımı diğer iletkenlerin kullanımına göre daha verimlidir. Yüksek akım taşıma kapasitelerine sahip olduğu için tasarlanan sistemlerin boyutları küçülecektir (Erden, 1995).

2.5.1. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)

Süper iletken manyetik enerji depolama (SMES), gelecek vaat eden yüksek verimli bir enerji depolama cihazıdır. Yüksek güç ve kısa süreli uygulamalar için çok ilgi çekicidir. 1970 yılında SMES'lerle ilgili ilk çalışma ortaya çıktı ve o zamandan beri birçok bilim adamının ve enerji sektörlerinde çalışan kişilerin merak ettiği bir konu haline geldi. Bir SMES cihazı, %96'dan fazla olan mükemmel bir enerji transferi dönüşümü verimliliğine sahiptir. Süper iletken bir mıknatıs bu cihazın kalbidir. Yüksek sermaye maliyeti, SMES cihazlarının yaygınlaşmasının önündeki engel olmaya devam etmektedir. SMES, içinden geçen DC akımın oluşturduğu manyetik alanda elektrik enerjisini depolayabilen, ilk olarak 1979 yılında önerilen bir enerji depolama sistemidir. SMES'de akımı taşıyan iletkenler, süperiletken hale geldiği kriyojenik sıcaklıklarda çalışır ve bu nedenle manyetik alan ürettiği için neredeyse hiç direnç kaybı olmaz. Bu durumda bir bobindeki akım sonsuz bir süre boyunca akabilir. Bu aynı zamanda bir $\tau = L/R$ bobininin zaman sabitinden de görülebilir, burada R sıfıra ve τ sonsuza gider. Depolanan enerji endüktiftir. Şekil 6' da SMES sistemi gösterilmiştir. Bu şekilde bir devrede depolanan enerji eşitlik 2' deki gibi ifade edilir.

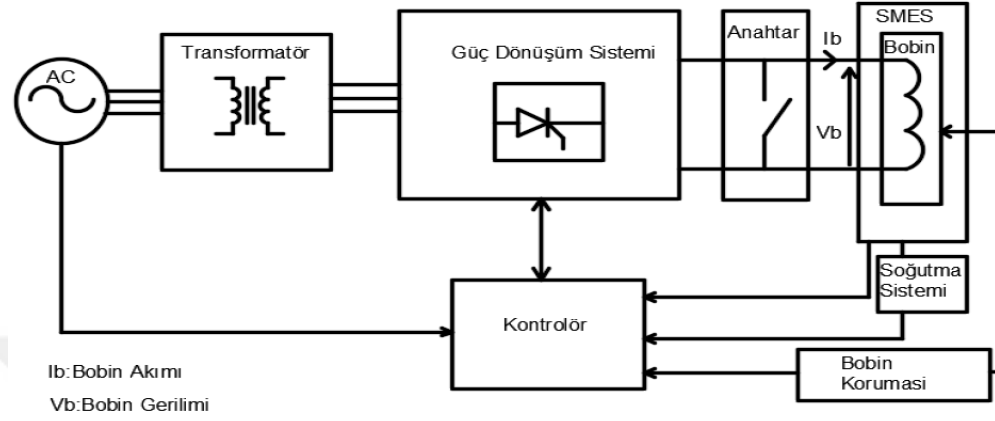
$$E = \frac{1}{2} LI^2$$

(Eşitlik 2)

E = Depolanan enerji

L = Endüktif

I = Akım



Şekil 6. Süperiletken manyetik enerji depolama çalışma sistemi (Gök, 2020).

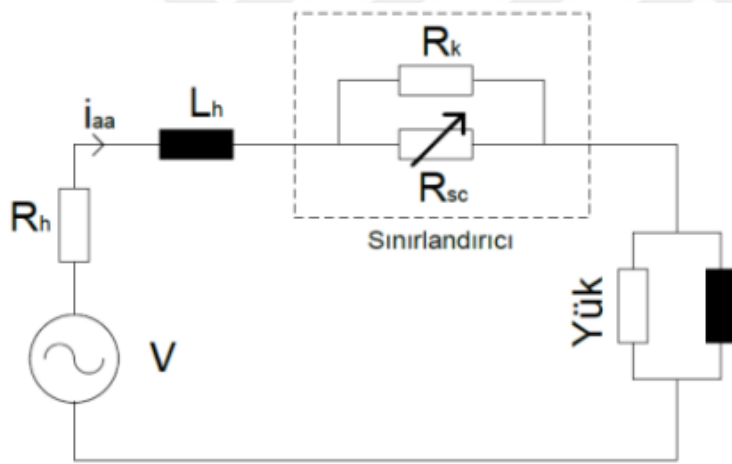
SMES sistemi alternatif akımı güç dönüşüm sistemleri ile depolanan akım çeşidine yani doğru akıma çevirerek süperiletken bobinlere sarılı sistem üzerinde depolamasını gerçekleştirmektedir. Kontrolör yani kontrol mekanizması ile soğutma sistemini ve bobin korumasını gerçekleştirmektedir. Süperiletken bobin kullanımı ile maksimum verimi sağlayarak enerji depolamada kullanılabilecek üstün özellikli bir madde haline gelmektedir.

2.5.2. Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcıları

Süperiletkenlik enerji uygulama alanları içerisinde uygulanabilirliği en uygun yöntemdir. Yüksek gerilimli devre elemanlarında devreyi korumak için kullanılmaktadır. Çalışan bu sistemler de yıldırım düşmesi, kısa devre, toprak teması gibi etkenler de taşıyan akım miktarı artarak devre elemanlarına zarar verme potansiyeli bulunmaktadır. Süperiletken arıza akım sınırlayıcıları (SFCL) süperiletkenin kritik akım yoğunluğundan faydalanarak yüksek hatalı akıma karşı bir empadans sağlayarak devreyi korumaktadır. Bilindiği gibi süperiletkenler belirli bir sıcaklık değerine ulaştığında üzerindeki direnç kaybolmaktadır. Süperiletken arıza akım sınırlayıcı olarak kullanıldığında kesici elemanından daha hızlı yanıt verebilmekte ve devreyi güvende tutabilmektedir. SFCL'in soğutularak süperiletken durumuna geçmekte ve devreden akım normal şekilde

taşınabilmektedir. Fakat arızalı akım devreye geldiği zaman süperiletken kritik akım yoğunluğu geçtiğinde, süperiletkenlik özelliği bozularak devrede bir empedans görevi görmektedir ve bu sayede arızalı akım sınırlamakta, devre elemanlarına zarar vermemektedir. Hata akımı bittiğinde SFCL yeniden soğutularak üzerinden akım geçmesine izin vermekte ve normal bir şekilde çalışma sağlamaktadır. Bu nedenle bu sistemler koruma devre elemanı olarak kullanımı arttırılmalıdır.

Şekil 7’ de bir rezistif SFCL eşdeğer devresi bulunmaktadır. V şebekedeki AC enerjiyi, R_h ile L_h sırasıyla hattın direncini ve empadansını, R_{sc} hattın süperiletken arıza akım sınırlayıcını ve ona paralel bağlanan R_k ise koruma direncini göstermektedir. Paralel direnç kullanmanın amacı, SFCL’yi korumak, söndürme sırasında sıcak noktalardan kaçınmak, sınırlama akımını ayarlamak ve hızlı akım sınırlamaları nedeniyle aşırı gerilimleri önlemektir. Rezistif SFCL, Endüktif olanlara kıyasla çok daha küçük ve hafiftir (Gürbüz vd., 2021),



Şekil 7. Rezistif süperiletken arıza akım sınırlayıcı eşdeğer devresi (Terzioğlu vd., 2017).

2.5.3. Süperiletken Sargılı Trafolar

Dünya nüfusu giderek artarken bununla beraber enerji ihtiyaçları da ortaya çıkmaktadır. Enerjiyi daha verimli kullanabilmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri ise süperiletken sargılı trafolardır. Trafoların bobinleri süperiletken sargılı ve sıvı azot ile soğutularak üzerinden akan akım için direncini neredeyse sıfırlamakta ve enerji kayıplarını engellemektedir. Bu sayede geleneksel trafoların taşıyabileceği kapasitelerin iki katına kadar taşıma imkânı sunabilmektedir. Aynı zamanda sıvı azot ile çevre dostu olabilmekte çevreye zararı bulunmamaktadır.

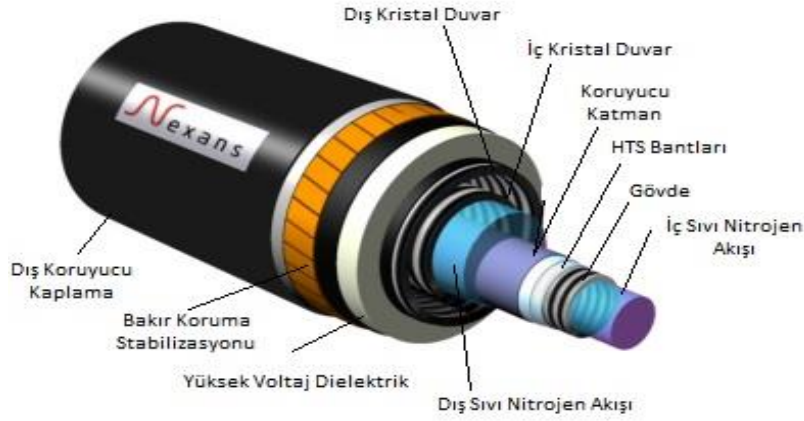
2.5.4. HTS Kablolar

1980'lerin sonlarında seramik esaslı yüksek sıcaklık süper iletkenlerinin keşfinden bu yana, güç iletimi ve dağıtımı amaçlı süper iletken kabloları olan ilgi yenilenmiştir. Yüksek kapasiteli güç için Yüksek sıcaklık süper iletken (HTS) kabloların geliştirilmesi iletim, ucuz ve çevre dostu bir ortamı temsil eden soğutma için sıvı nitrojen kullanımından kaynaklanan verimlilik ve operasyonel avantajlardan yararlanmak için son on yılda başlatılmıştır. Çoğunlukla laboratuvar kurulumlarında test etmek için birkaç prototip geliştirildi. Bu iletkenler, süperiletkeni kalan ortamdan termal olarak izole etmek için kriyojen tipinde bir boruya yerleştirilir. Aynı dış boyutlara sahip geleneksel bir kablo sisteminin beş katı akım taşırlar ve çevreye herhangi bir ısı yaymazlar. HTS ile geleneksel iletkenlerin maliyet avantajı karşılaştırıldığında, süper iletken kabloların kayıpları, düşük nitrojen sıcaklıklarını ve sirkülasyonunu korumak için gereken enerjiye eşdeğerdir. Teknoloji, aşırı sıcaklık farkları için özel kablo bağlantıları ve özel kablo sonlandırması ve kriyostatı tutmak için kalıcı soğutma gerektirir.

2.5.5. HTS Kablo Tasarımları

Geleneksel bakır tellerle aynı boyutlarda olabilecek ancak çok daha yüksek akım taşıyabilen farklı HTS kablo konseptleri geliştirilmiştir. Şu anda, kullanılan dielektrik türü ile ayırt edilen iki ana tip süper iletken güç kablosu vardır. Sözde sıcak dielektrik tasarım, kablo iletkenini oluşturan bir veya birkaç katmanda örgülü HTS bantları ile esnek bir desteğe dayanmaktadır. Sıvı nitrojen akışıyla soğutulan bu iletken, aralarında vakum ve süper yalıtım bulunan iki eş merkezli esnek paslanmaz çelik oluklu boru kullanan kriyojenik bir zarfla çevrilidir. Şekil 8'de sıcak dielektrik süperiletken kablo tasarımı şematik bir görünümde gösterilmektedir. Dış dielektrik yalıtım, kablo ekranı ve dış kablo kılıfı oda sıcaklığındadır. Geleneksel kablolarla karşılaştırıldığında, bu tasarım, belirli bir güç aktarımı seviyesi için en az miktarda HTS teli kullanarak yüksek bir güç yoğunluğu sunar.

HTS kablo tasarımının ikinci türü şekil 9' da gösterilen 'soğuk dielektrik'tir . Sıcak dielektrik ile aynı faz iletkeni kullanılarak, yüksek voltaj yalıtımı artık sıvı nitrojen ile emprenye edilmiş bir bant katmanlı düzenleme ile oluşturulmaktadır. Böylece soğuk dielektrik kablo tasarımında dielektrik sistemin bir parçası olarak da kullanılır. Yalıtım, kabloyu tamamen korumak ve boş elektromanyetik alan oluşumunu önlemek için süperiletken tellerden oluşan bir ekran tabakası ile çevrilidir. Bu kablo fazlarından üçü artık tek tek veya alternatif olarak tek bir kriyojenik zarf içine yerleştirilebilir.



Şekil 8. Sıcak dielektrik süperiletken kablo tasarımı (Schmidt ve Allais, 2011).



Şekil 9. Soğuk dielektrik süperiletken kablo tasarımı (Schmidt ve Allais, 2011).

2.5.6. HTS Kablo Avantajları

HTS kabloları, vaka çalışmasına bağlı olarak geleneksel kablolara kıyasla çeşitli avantajlar sunar:

Daha kolay ve daha kısa kurulum süresi sunar. HTS kablolar kompakt olduğundan mevcut gaz, petrol, su, elektrik koridorları, karayolu ve demiryolu boyunca yeraltına yönlendirilebildiğinden, şebeke operatörleri daha kısa kurulum süresinden yararlanabilir. Ek olarak, HTS kabloları aktif olarak soğutulur ve çevredeki ortamdan termal olarak bağımsızdır, bu da kurulumlarını kolaylaştırır. Bu hususlar daha yüksek kapasiteli iletim koridorlarının önünü açmaktadır. Ancak aynı koridorları paylaşan altyapılar üzerinde manyetik alan etkisinin dikkatli bir analizi yapılmalıdır. Konvansiyonel kablolara göre kablolar üzerinde kompaktlık ve daha yüksek kapasiteli güç aktarımı sağlayan çok daha

yüksek akım yoğunluğu seviyelerine ulaşılması, operatörler ve çevre için önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Bir süperiletken sistem ayrıca kablolar arasında büyük bir ayırım gerektirmemesinin bir sonucu olarak bir yeraltı kurulumunda daha küçük bir ayak izine sahiptir. Yüksek Güç taşıma kapasitesi sunar. Daha yüksek seviyelerde akım yoğunluğu elde etmek, yüksek kapasitelerde toplu güç aktarımını kolaylaştırırken operasyonel voltajların azaltılabileceği anlamına gelir. Daha düşük çalışma voltajları, kablonun her iki ucunda gerekli olan elektrikli ekipmanın boyutunu ve hacmini azaltır. HTS kablolarının oluşturduğu düşük elektromanyetik alanlar nedeniyle, çevredeki alan üzerindeki etki önemli ölçüde azalır. Kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda sıfıra yakın elektrik direncine sahip süperiletkenlik özelliklerine rağmen, HTS kabloları hala esas olarak termal sızıntılar şeklinde enerji kayıplarına maruz kalır (metalik kısımda indüklenen akım düşük kalır). Bir HTS kablosundaki enerji kayıpları, yüke ve dolayısıyla kablonun güç iletim şebekesinde nereye yerleştirildiğine bağlıdır. 2 kA'da bir HTS kablosu için kayıplar, geleneksel kablo sistemindeki kayıpların yaklaşık %25'i düzeyinde olabilir ancak yüksüz durumda, termal sızıntı nedeniyle HTS kablosundaki kayıplar daha fazladır. İletim kayıplarının önemli ölçüde azalması, böylece gerekli soğutma gereksinimleriyle dengelenir. İdeal olmayan bir ısı yalıtımından kaynaklanan yüksüz kayıplar, bu nedenle, zamanın büyük bir bölümünde yüksek yük akımına sahip bağlantılarda HTS kablosunun kullanılmasına neden olacaktır. HTS DC Kablosu, uzun mesafeli yüksek güç iletimi ve toplu enerji transferi için çok uygundur. Günümüzde orta gerilim seviyelerinde yüksek akım kapasitesi gerektiren kentsel alanlarda çok sayıda HTS kablosunun döşendiği görülmektedir.

2.5.7. Süperiletken Kablo Projeleri

Geçmişte çeşitli süperiletken kablo projeleri başlatılmıştır. Bununla birlikte, kullanımları ve test aşamaları hızlandırılmıştır.

Shingal Projesi 2009 yılında yapılmış olup, Shingal ve Heungdeok'un 154 kV trafo merkezlerini birbirine bağlayan 1 km 23 kV AC HTS kablosudur. 23 kV, 1.6 kA triad konfigüre edilmiş HTS kablosu, 50 km HTS bant kullanılmıştır. Kablo, Shingal alt istasyonu ile yeterince kullanılmayan Heungdeok alt istasyonu arasındaki tedarik kapasitesini paylaşacak şekilde hareket edecektir. Sistem planlandığı gibi çalıştı ve devreye alma sırasında tüm testler başarılı oldu. Bu, KEPCO'yu Shingal Projesi'nin başarısından sonra 23 kV sisteminin yanı sıra AC 154 kV HTS kablolarının daha fazla uygulamasını araştırmaya sevk etti (Lee vd., 2020).

Ishikari, Japonya 2015 yılında tamamlanmış olup, 500 m'lik bir kablonun bir İnternet veri merkezini DC gücü sağlamak için geniş ölçekli bir dizi fotovoltaiik hücreye bağladığı ulusal bir projedir. Sırasıyla 500 m (Hat 1) ve 1.000 m (Hat 2) uzunluğunda iki DC süper iletken güç kablosunun tasarımı Hat 1'in kablosu yer altına döşenir ve iki kablodan oluşur. Kriyojenik borunun ısı kaçağı kablo borusu ve dönüş borusu dahil ~1.4 W/m'dir. Test tezgahında akım ucunun ısı sızıntısı ~30 W/kA'dır. Son olarak Hat 1'de 6 kA / 3sn'lik bir akım ve 5 kA / 15 dakikalık bir akım elde edildi (Yamaguchi vd., 2015).

St. Petersburg şehir merkezindeki iki trafo merkezi arasındaki 2.5 km'lik bir mesafeyi kapsayan kablolar. 330 kV 'Tserntralnaya' ve 220 kV 'RP-9' trafo merkezlerinin bağlanması, yedek güç ağı kapasitesi sağlayarak yeni tüketicilerin sisteme bağlanmasına ve sistem güvenilirliğini iyileştirmesine ve mevcut son kullanıcılar için arıza akımlarını sınırlamasına olanak tanımaktadır. 2.5 km'de 50 MW, 20 kV HTS DC kablo kullanılmaktadır. Testler sonucunda, iki adet 30 metrelik kablo numunesi, iki adet 430 metrelik kablo, üç çift akım kablosu ve üç bağlantı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kritik akım (IC) testleri 68 K ila 78 K arasında gerçekleştirilmiştir; direnç sabit kaldı ve kablo beklendiği gibi çalıştı. Kablolar ayrıca yüksek voltaj testinden de geçmiştir (Sytnikov, 2015).

AmpaCity projesi, Essen Almanya'daki iki 10 kV trafo merkezini birbirine bağlayan 110 kV yeraltı kablo sisteminin yerini almak üzere 2014 yılında kurulan 1 km 10 kV HTS kablodur. Üç fazlı, eş merkezli kablo, Essen merkezindeki iki trafo merkezini birbirine bağlayan geleneksel 110 kV bakır hattının yerini alır ve trafo merkezlerinden birinde yüksek voltajlı trafo ihtiyacını ortadan kaldırır. Kabloyu, ömrü boyunca direncini ortadan kaldırmak için soğutmak için gereken enerji maliyetinin, geleneksel 110 kV kablolardaki eşdeğer kayıpları telafi etme maliyetinden %15 daha düşük olduğu bulundu. Kentsel alanlarda 110 kV şebekenin gerekli şekilde genişletilmesini önlemek için HTS'den en iyi teknik ve ekonomik olarak uygun çözüm olarak bahsedilmektedir (Stemmle,2013).

HYDRA projesi Aşama 1. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda başarıyla test edilen 25 m'lik bir prototipti. Aşama 2. Westchester County'deki iki trafo merkezinin bağlanmasından oluşur. Bu HTS FCL Kablo kurulumu, ekipmana arıza akımı koruması ile birlikte 13.8 kV'luk bir transformatörün varlık paylaşımına izin verecektir. 25 m HTS FCL kablo kullanarak, 170 m kablo uzunluğuna sahip 2 Con Edison 13.8 kV trafo merkezini bağlamayı amaçlamaktadır. Güç Ağı için HTS FCL kablosunun kalifikasyonuna yardımcı oldu (McCall vd., 2013).

Süperiletkenin uygulama alanları enerji ihtiyacının artması ile giderek yaygınlaşmaktadır. İletim hatlarında kullanılan süperiletken kablolar enerjinin taşınmasında kayıpları minimize ederek, en verimli şekilde tüketiciye ulaştırmayı hedeflemektedir. Bununla birlikte yüksek sıcaklık süperiletken kablolar, düşük sıcaklık süperiletkenlere göre daha çok kabul görmekte ve kullanımı da yukarıdaki gösterilen projelerle birlikte yaygınlığını artmaktadır. İnsan nüfusu ve sanayileşme arttıkça süperiletken kabloların da uygulaması artacaktır. Geleneksel kabloların aynı kesitteki boyutlarına göre daha fazla enerji taşımakta ve aynı zamanda daha verimli bir şekilde ulaşmasını sağlamaktadır. Süperiletken kabloların soğutulması ile ilgili daha maliyetli bir çalışma sağlandığında Dünya genelinde uygulaması ve kullanımında artması hedeflenmektedir. Gelişen sanayi ve teknoloji ile birlikte süperiletken uygulama alanları yukarıda anlatılanlarla beraber kalmayacak, daha fazla uygulama alanları, enerji kullanımında önemi, enerji taşınmasında önemi anlaşılabacaktır.

3. ENERJİ ÜRETİM, İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMİ

3.1. Enerji Tarihçesi

Enerji kullanımı ve tüketimi ülkeler için gelişmişlik düzeylerini göstermesi anlamında en önemli unsurdur. İstenilen durumda diğer enerji türlerinden elektrik enerjisine dönüştürebilmek daha da önemli olduğu söylenebilir.

19. Yüzyılın sonlarına doğru bulunup ilk olarak aydınlatmaya dönük olarak toplumun kullanımına sunulan elektrik enerjisi, ihtiyaç doğrultusunda yeni alternatif kaynaklara yönelerek hatta güneş, rüzgâr vb. gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına artış sağlamıştır.

Elektrik günlük hayatta kullanıma 1878 yılında başlamış olup, Elektrik üretimi yani enerji santrali İngiltere'nin Londra şehrin de 1882 yılında faaliyete başlamıştır. Ülkemizde ilk elektrik üretimi, 1902 yılında Tarsus'ta tesis edilen 2 kW gücündeki küçük bir su türbini ile gerçekleşmiştir. İlk büyük santral ise 1913 yılında İstanbul Silahtarğa'da kurulan 15 MW güce sahip termik santral olmuştur (Erol, 2007).

3.2. Enerji Üretim, İletim ve Dağıtım Sisteminin Genel Yapısı

Elektrik üretimi öncelikle enerji santralleri ile başlar. Bu santraller kinetik enerjiyi, mekanik enerjiye, oradan ise elektrik enerjisine dönüştürürler. Hidroelektrik santralleri su ile, rüzgâr santralleri rüzgârın kinetik enerjisi ile, yakıtlı santraller ise suyu kaynatıp sağladığı buhar ile türbini döndürerek enerjiyi bizlere üretmektedir. Farklı olarak güneş santralleri güneşten gelen fotovoltaiik ışımlar ile paneller yarı iletkenlik özelliği kullanarak elektrik enerjisi üretmektedir.



Şekil 10. Enerji dağıtım sistemi (Gök, 2020).

Enerji santralleri şehir merkezlerine veya tüketicilere uzak konumda işlevlerini yerini getirmektedirler. Bu nedenden dolayı üretilen elektrik enerjisi bazen kilometrelerce uzaklıkta olan trafo dağıtım merkezlerine taşınmaktadır. İletim hatları vasıtasıyla taşınan enerji trafo dağıtım merkezlerinde ulaşmaktadır. Trafo merkezlerinde de tüketicilere, konutlara, sanayiye bölgelerine taşınarak enerji yolculuğu tamamlanmış olmaktadır.

3.3. Enerji Nakil Hatları

Elektrik enerjisinin üretildiği yer ile tüketildiği yer arasına yerleştirilen ve üretilen elektrik enerjisini taşınmasını sağlayan hatta enerji nakil hattı denir. Enerji nakil hatlarında taşınacak akım veya güç miktarına göre nakil hatlarında kullanılan tellerin veya kabloların kesiti de buna göre değişmektedir. Kullanılacak kablonun cinside aynı şekilde buna göre değişkenlik göstermektedir.

Elektrik enerjisinin taşınması iki yöntemle mevcuttur. Bunlar ya havadan havai hat denilen iletim hatlarıyla ya da yeraltından geçen yer altı kabloları ile gerçekleşmektedirler. Genellikle geniş ve açık arazilerde havai hat tercih edilirken, şehir merkezlerinde yer altından taşımayı tercih edilmektedir. Fakat yer altı kabloları ile taşımak daha maliyetli olduğundan, havai hat kullanımı daha yaygındır. Şehir merkezlerinde şehrin estetiğini bozmamak ve yerleşim yerlerinden dolayı yer altı kabloları kullanılmaktadır. Havai hatların bakım ve onarımı yer altı kablolarına göre daha kolaydır. Enerji santrallerinde üretilen elektriğin dağıtımında en çok tercih edilen ve daha uygun maliyetli olan havai hatlardır. Havai hat iletim hattında akımın taşınmasını sağlayan kablo cinsleri olarak genellikle alüminyum ve bakır kullanılmaktadır. Havai hat yer altı kablo çalışmasına göre daha uygun maliyetlidir.

3.3.1. Havai Hat Kullanım Avantajları

- Havai hat yer altı kablolarına göre daha uygun maliyetli kurulabilir.
- Havai hatta çıkacak bir arıza da tespiti yer altına göre daha kolay bulunmaktadır.
- Bakımları ve arızalı olan kısımların değişimleri yer altı kablolarına göre daha kolay olmaktadır.
- Köprülerden, akarsulardan ve yollardan taşınması daha kolay sağlanmaktadır.
- Yeraltı kablolarına göre kurulumu daha hızlı tamamlanmaktadır.

3.3.2. Havai Hat Kullanım Dezavantajları

- Yıldırım, şimşek ve yağmur gibi çevre şartlarından çok çabuk etkilenip, enerji kesilmelerine neden olmaktadır.
- Oluşan arızaların bakım ve onarımı hava şartlarının elverişli olmasına bağlıdır.
- Ömürleri daha kısadır.
- Şehrin veya geçtiği yerlerin estetiğini bozabilmektedir.
- Orman yangınlarına neden olabilmektedir.
- Alçak uçuş yapan hava araçları için tehlike yaratabilmektedirler.

3.4. Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan İletkenler

Enerji nakil hatlarında genellikle bakır iletkenler, tam alüminyum (AAC) ve çelik özlü alüminyum (ACSR) iletkenler kullanılmaktadır.

3.4.1. Bakır İletkenler

İletkenlerden elektrik akımı akarken bir dirençle karşılaşılır. İletkenlerdeki bu direnç seviyesinin düşük olması, o iletkenin geçirecek akımı daha az kayıpla iletilmesinde yararlı olmaktadır ve bakır telin direnci düşük olduğu için iyi bir elektrik iletkenidir. Bakır ayrıca inanılmaz derecede esnek bir malzemedir. Elektrik konnektörleri ve kabloların aynı anda büyük miktarda elektriği taşıması gerekir, ancak bu yükleri alan çoğu metal kolayca bükülmez. Öte yandan bakır, manevra kabiliyetine sahipken, evdeki elektriği idare etmek için ideal bir kalınlığa sahiptir. Son olarak, bakır diğer metallerden daha az oksidatiftir. Havadaki oksijen ve nem bir metalin yüzeyi ile reaksiyona girdiğinde oksidasyon olur. Bu reaksiyon, film benzeri bir kaplama oluşturan metali aşındırır. Bakır iletkeni paslanan bir madde değildir. Fakat oksit oluşumuna neden olmaktadır. Şekil 11’ de bakır iletkenin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 11. Bakır iletken kablo yapısı (MEB, 2020).

3.4.2. Alüminyum İletkenler (AAC)

Alüminyum, dünyada oksijen ve silisyum maddelerinden sonra en çok bulunan üçüncü element olarak geçmektedir. Günümüzde enerji nakil hatları genellikle alüminyum maddesinden yapılmaktadır. Birçok ülkede alüminyumun iletkenlerin iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanımı bakır maddesine göre daha fazladır. Alüminyum bakıra göre çok hafif olmakla birlikte, aynı zaman da alüminyumun yoğunluğu, yaklaşık olarak bakırın %30'u kadardır. Şekil 12' de alüminyum iletkenin yapısı gösterilmiştir.

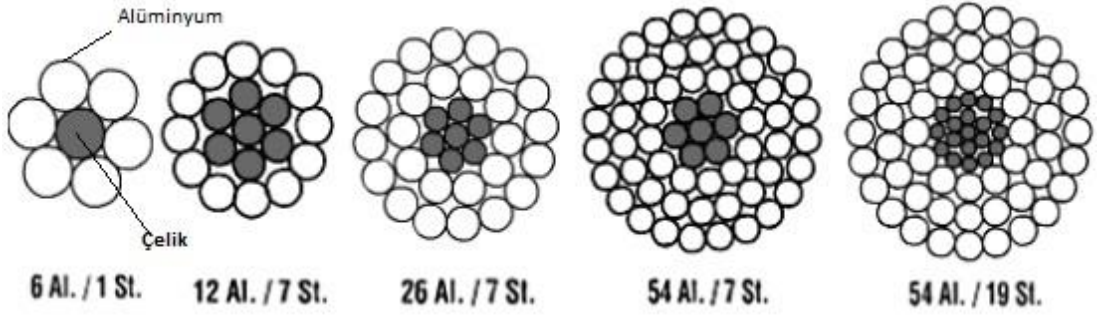


Şekil 12. Alüminyum iletken kablo yapısı (MEB, 2020).

Özellikle enerji nakil havai hat yapılarında malzemenin hafif olması oldukça önemlidir. Çünkü ağır iletken malzemesi kullanımı, ağır nakil hattı direk yapılarına ihtiyaç oluşturmaktadır. Bu nedenle, alüminyum iletkenin bakır iletkenin göre işlenmesi ve kullanıma hazır hale getirilmesi daha mümkündür. Alüminyumun hafif olması ağır iletkenlere göre daha kullanışlıdır.

3.4.3. Çelik Özlü Alüminyum İletkenler (ACSR)

Çelik Çekirdekli Alüminyum Standart Tel, tipik olarak havai elektrik hatlarında kullanılan yüksek kapasiteli, yüksek mukavemetli çok telli bir iletken türüdür. Dış teller yüksek saflıkta alüminyumdur ve mükemmel iletkenliği, düşük ağırlığı ve düşük maliyeti nedeniyle seçilmiştir. Merkez şerit veya şeritler, iletkenin ağırlığını desteklemeye yardımcı olmak için ek güç için çeliktir. Çelik iletkeni alüminyum iletkenine göre gerilim uygulamasında daha fazla mukavemet gücü göstermektedir. Çelik ayrıca mekanik yükleme örneğin, rüzgâr ve buz nedeniyle daha düşük elastik ve elastik olmayan deformasyona (kalıcı uzama) ve ayrıca mevcut yükleme altında daha düşük bir termal genişleme katsayısına sahiptir. Çelik özlü alüminyum iletkenler havai hat kullanımında alüminyum iletkenlere göre daha az sarkmasını sağlamaktadır. Şekil 13' te çelik özlü alüminyum iletkenin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 13. Çelik özlü alüminyum iletkenin yapısı ve perspektif görünüşleri (MEB,2020).

3.5. Enerji Nakil Hattı Kayıpları

Santrallerde üretilen enerji, havai hatlar, kablolar ve diğer ekipmanlar gibi büyük ve karmaşık ağlardan geçerek son kullanıcılara ulaşır. Santralin ürettiği elektrik enerjisinin biriminin tüketicilere dağıtılan birimlerle uyuşmadığı bir gerçektir. Birimlerin bir kısmı dağıtım ağında kaybolur. Üretilen ve dağıtılan birimlerdeki bu fark, iletim ve dağıtım kaybı olarak bilinmektedir. İletim ve dağıtımda oluşan kayıplar, dağıtım şirketleri tüketicilere fatura etmemektedir. Enerji nakil hatları kayıpları iki şekilde olmaktadır. Teknik kayıplar ve teknik olmayan kayıplardan oluşmaktadır.

3.5.1. Teknik Kayıplar

Güç sistemindeki teknik kayıplar, güç sisteminin bileşenlerinin fiziksel özelliklerinden kaynaklanır. En belirgin örnek, dâhili elektrik direnci nedeniyle iletim hatlarında ve transformatörlerde harcanan güçtür. Teknik kayıplar, doğal olarak meydana gelen kayıplardır. Yani güç sisteminin içindeki eylemin neden olduğu kayıplardır ve esas olarak iletim hatları, güç transformatörleri, ölçüm sistemi elektrik sistemi bileşenlerindeki güç kaybından oluşur. Teknik kayıpların hesaplanması ve kontrol edilmesi mümkündür. Söz konusu güç sistemi bilinen miktarlarda yüklerden oluşmaktadır. Teknik kayıplar iletim ve dağıtım sırasında meydana gelir ve trafo merkezi, trafo ve hat ile ilgili kayıpları içerir. Bunlar, birincil fiderlerin direnç kayıplarını, dağıtım trafosu kayıplarını (sargılarda ve çekirdek kayıplarında), direnç kayıplarını, sekonder ağda direnç kayıplarını, servis düşüşlerinde direnç kayıplarını ve kWh metredeki kayıpları içerir. Kayıplar, elektrik dağıtımının doğasında vardır ve ortadan kaldırılamaz. Teknik kayıplar, elektrik şebekesinde akan akımdan kaynaklanır ve aşağıdaki kayıp türlerini oluşturur:

- İletkenlerin sonlu direnci nedeniyle tüm indüktörlerde bulunan I^2R kayıplarından kaynaklanan bakır kayıplarını,
- İletkenler arasındaki dielektrik malzeme üzerindeki ısıtma etkisinden kaynaklanan kayıplar olan dielektrik kayıpları,
- İletkenleri çevreleyen elektromanyetik alanlar tarafından üretilen endüksiyon ve radyasyon kayıpları.

Söz konusu güç sisteminin bilinen miktarlarda yüklerden oluşması koşuluyla, teknik kayıpların hesaplanması ve kontrol edilmesi mümkündür. Teknik kayıpların nedenleri şunlardır:

- Harmonik bozukluğu,
- Tüketici tarafında uygun olmayan topraklama,
- Uzun tek fazlı hatlar,
- Dengesiz yükleme,
- Aşırı yükleme ve düşük voltajdan kaynaklanan kayıplar,
- Düşük standart donanımdan kaynaklanan kayıplardan oluşmaktadır.

3.5.2. Teknik Olmayan Kayıplar

Teknik olmayan kayıplar ise, güç sistemi dışındaki eylemlerden veya teknik kayıplar hesabının dikkate almadığı yüklerden ve koşullardan kaynaklanır. Teknik olmayan kayıpların ölçülmesi daha zordur. Çünkü bu kayıplar sistem operatörleri tarafından genellikle açıklanmaz ve bu nedenle kayıtlı bilgileri yoktur. Teknik olmayan kayıplar hırsızlık, ölçüm yanlışlıkları ve ölçülemeyen enerji sonucu oluşur. Teknik kayıpların aksine esas olarak bu biçimdeki güç hırsızlığıyla ilgilidir. Güç hırsızlığı, müşteri için enerji sayacı tarafından ölçülmeyen, müşterilere teslim edilen enerjidir. Bu, sayacın kurcalanmasının bir sonucu olarak veya sayacı atlayarak olabilir. Sayaç hatalarından kaynaklanan kayıplar, sayaçlar aracılığıyla fiilen iletilen enerji miktarı ile sayaçlar tarafından kaydedilen miktar arasındaki fark olarak tanımlanır. Teknik olmayan kayıpları aşağıdaki nedenlerden oluşmaktadır.

- Sayacın daha düşük bir tüketim okuması kaydetmesini sağlamak için sayaçları kurcalama,
- Teknik kayıp hesaplamasındaki hatalar,
- Sayaç okuyucularına rüşvet vererek yanlış okumalar düzenleme,
- Sayaç atlayarak veya başka bir şekilde çalma,

- Ödenmemiş faturaları görmezden gelerek,
- Hatalı sayaçlar veya sayaçsız besleme gibi nedenlerden oluşmaktadır.

Tablo 2’ de elektrik şebeke elemanlarının enerji kayıpları gösterilmektedir.

Tablo 2. Elektrik şebeke elemanlarındaki enerji kayıpları (Düzgün, 2018).

Elektrik Şebeke Elemanları	Enerji Kaybı [İletilen/Dağıtılan Elektriğin % Oranı Olarak]
Şalt Tesisleri: 132 kV ve Üstü	0.001 – 0.008
Şalt Tesisleri: 33 kV - 66 kV	0.005 – 0.020
Şalt Tesisleri: Alçak Gerilim	0.130 – 0.340
Alçak Gerilim ve Orta Gerilim Sayaçları	0.300 – 0.600
Kesiciler	0.003 – 0.030
Alçak Gerilim Baraları	0.050 – 0.500
Alçak Gerilim Demir Bağlantı Elemanları	0.00009 – 0.0014

3.6. Literatür Özeti

Elsherif ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada Matlab/Simulink üzerinde sayısal benzetimler kullanılarak HTS kablolarının trafo merkezinde kullanılması ile elektriksel kayıpları azaltabilmesini incelemiştir. HTS kablolarının direnci sıfır olduğu için herhangi bir gerçek kayıp bulmamıştır. HTS kablolarının dağıtım güç sistemlerine uygulanmasının trafo merkezleri ve şalt maliyetlerini azaltabileceğini söylemektedir. HTS kablolarının Seul sistemine uygulanması, geleneksel kablolarla kıyasla 2035 yılına kadar gerekli yer altı kablolarının sayısını %25, iletim kayıplarını %3.5 ve inşaat maliyetlerini 1.736 milyon dolar azaltacağını sonucuna varılmıştır (Elsherif vd., 2014).

Jin ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada Matlab programı ile doğrudan yüksek voltajlı bir sistemin performansını analiz etmek üzere bir model oluşturmaktadırlar. Sistem 345 kV, 60 Hz ve 10.000 MVA değerine sahiptir. Sistemin çalışması şu şekildedir. Sistem başlayacak ve sabit bir duruma ulaşacak şekilde programlanmıştır. Daha sonra, regülatörlerin dinamik tepkisini gözlemlemek için önce referans akımına ve daha sonra voltaj referansına bir adım uygulanır. Son olarak, dönüştürücüleri bloke etmeden önce güç iletimini sorunsuz bir şekilde azaltmak için bir durdurma dizisi başlatmaktadır. Simülasyon sonucunda, iletim hattındaki direncin artması ve iletim gerilimi seviyesinin düşmesi ile sistem kaybının arttığını göstermektedir. Hat direnci değişmeden kaldığında gerilim seviyesi düşer, bu arada sistemin kaybı artar. İletim sisteminde süperiletken teknolojiler kullanılırsa, daha düşük bir voltaj seviyesinde bile olsa, iletim sisteminde

daha düşük enerji kaybı, daha yüksek bir voltaj seviyesinde çalıştığı gözlemlenir (Jin vd., 2007).

Kevser, Kocaeli şehrinin rabak fider uygulama çalışmasını yapmıştır. Bu çalışmayı yaparken rabak fiderine ait verileri baz alarak Digsilent PowerFactory programında simüle etmiştir. Tekrardan rabak fiderinde süperiletken kullanarak simülasyon çalışmalarını yürütmüştür. Elde ettiği bu çalışmaların sonucunda dağıtım şebekelerinde geleneksel iletken yerine süperiletken kullanarak kayıpların düşeceğini gözlemlemiştir (Gök, 2020).

Nijerya 330 kV iletim şebekesiyle ilgili teknik güç kayıplarının tahmini yapılmıştır. Pik güç kayıplarını tahmin etmek için Power World Simulator (PWS) yazılım ortamında Newton Raphson yöntemi kullanılarak bilgisayarda 330 kV şebeke simüle edilmiştir. Çalışmanın sonucunda 2005 yılında sadece 330 kV iletim hatlarından kaynaklanan enerji kaybı 337.5 GWH olarak bulundu. Enerji kayıplarının giderebilmesi için yeni hatların eklenmesi ve şebekede daha fazla trafo merkezi tanıtılarak iletim hatlarının uzunluğu mümkün olduğunca kısa yapılması sonucuna varmışlardır (Onohaebi vd., 2007).

Gamze, Kütahya şehrindeki elektrik dağıtım şebekelerindeki kayıpları incelemiştir. Çalışmayı yapmak için şebeke yeraltı kablolarını kullanarak, bölgedeki sayaç yük profillerini almış ve dağıtım şebekesindeki güç kayıplarını ve yatırım maliyeti açısından değerlendirmiştir. Sonucunda yer altı kablo hatlarının havai hatlara göre daha düşük güç kaybı yaşandığı görmüştür. Havai hatların yeraltı hatlarına göre bakımı ve maliyetinin daha düşük olduğunu gözlemlemiştir (Uyanık, 2020).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında DigSilent Powerfactory programı kullanılarak süperiletken ve geleneksel tel üzerindeki güç kaybı, gerilim düşümü, reaktif güç kaybı, yük akışı analizlerini simüle ederek çalışma yapılmıştır.

4.1. DigSilent Power Factory Programı

Programın kısaltılmamış halinin ismi “Digital Simulation of Electrical Networks” olarak geçmektedir.

DigSilent PowerFactory, elektrik güç sistemleri analizi ve simülasyonu için kullanılan bir yazılım programıdır. Güç sistemi mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılan bu program, elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin analizini gerçekleştirmek, güç akışı, kısa devre, harmonik analizi, dinamik kararlılık, yerinden koruma koordinasyonu gibi birçok analiz ve simülasyon işlemlerini yapmak için kullanılır (Arsoy, 2013).

DigSilent PowerFactory, kullanıcılara karmaşık güç sistemlerini tasarlama, analiz etme, performansı değerlendirme ve sorunları tanımlama imkânı sağlar (Arsoy, 2013). Program, geniş bir modelleme ve analiz yetenekleri yelpazesi sunar ve elektrik güç sistemi bileşenlerini (transformatörler, jeneratörler, şalt ekipmanları, hatlar, kondansatör bankaları vb.) ve kontrol sistemlerini modeller. Ayrıca, program, gerçek zamanlı simülasyonlar, dinamik kararlılık analizi, harmonik analizi, enerji kalitesi analizi ve optimizasyon gibi gelişmiş analizler için araçlar sağlar.

DigSilent PowerFactory, enerji sektöründeki şirketler, danışmanlık firmaları, üniversiteler ve araştırma kurumları gibi birçok kuruluş tarafından kullanılmaktadır. Elektrik güç sistemleri mühendisliği ve analizi konularında kapsamlı bir yazılım çözümü sunarak güç sistemlerinin güvenilirliğini sağlamaktadır.

4.2. DigSilent Programının Temel Özellikleri

- OG/AG Şebeke Analizi
- Yük akış analizi
- Kısa devre analizi

- Gerilime bağılı yük modelleri
- Harmonik şebeke analizleri
- Yenilebilir enerji santrallerinden olan güneş ve rüzgâr santralleri modellenebilmektedir.

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 (Gök, 2020).

4.3. DigSilent ile Çalışmanın Yürütülmesi

Programın kütüphane kısmına iletken, şebeke ve yük eklenmiştir. Oluşturulan bu ekipmanlar ile şebeke beslemesi üzerinden programın içerisinde mevcut analizler ile gerekli çalışmalar yapılmıştır. Şekil 14’de şebekenin güç değeri gerçekleştirilmiştir.

External Grid - Grid\ŞEBEKE G.ElMXnet

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Description

Bus Type: PV

Setpoint: local

Operation Point

Active Power: 1. MW

Voltage Setpoint: 1. p.u.

Reference Busbar: ...

Primary Frequency Bias: 0. MW/Hz

Secondary Frequency Bias: 0. MW/Hz

Reactive Power Operational Limits

Capability Curve: ...

Min. -9999. Mvar Scaling Factor (min.) 100. %

Max. 9999. Mvar Scaling Factor (max.) 100. %

OK

Cancel

Figure >>

Jump to ...

Şekil 14. Digsilent PowerFactory programında şebeke güç girişi

Şebekenin bara ile bağlantısının yapılması sağlanmalıdır. Şekil 15’de gösterildiği gibi baranın değeri girilmektedir. Kullanılacak bu bara iletken hattına bağlı olacaktır. “BARA G veya S” olarak adlandırılmıştır. “BARA G” geleneksel iletken kullanıldığı

durumda geleneksel hat olduğunu belirtmek için kullanılacaktır. “BARA S” ise süperiletken hat kullanıldığını göstermek için kullanılacaktır.

The image shows a software window titled "Terminal - Grid\BARA G.ElmTerm". On the left is a sidebar with a list of analysis options: Basic Data (selected), Load Flow, VDE/IEC Short-Circuit, Complete Short-Circuit, ANSI Short-Circuit, IEC 61363, DC Short-Circuit, RMS-Simulation, EMT-Simulation, Harmonics/Power Quality, Protection, Optimal Power Flow, Reliability, Generation Adequacy, Tie Open Point Opt., and Description. The main area contains several input fields and checkboxes. The "Name" field is "BARA G". The "Type" field is a dropdown showing "... ent Type Library\Busbar Type(1)". The "Zone" and "Area" fields are also dropdowns showing "...". The "System Type" is "AC" and "Usage" is "Busbar". The "Phase Technology" is "ABC". The "Nominal Voltage" section shows "Line-Line" as "154." kV and "Line-Ground" as "88,91194 kV". There are checkboxes for "Out of Service" and "Earthed". On the right side of the dialog are buttons for "OK", "Cancel", "Jump to ...", and "Cubicles".

Şekil 15. Digsilent PowerFactory programında iletkene bağlantılı bara değeri girişi

Hattın bara ile bağlantısı gerçekleştirildikten sonra diğer bara ile bağlantısını yapabilmek için iletken hat kullanılacaktır. Bu hattın da uzunluğu şekil 16’da gösterildiği gibi km cinsinden girilmektedir. Bu çalışma da birçok farklı hat uzunlukları kullanılarak analizler yapılacaktır.

Line - Grid\GELENEKSEL İLETKEN.ElmLine

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Tie Open Point Opt.

Cable Sizing

Description

Name: GELENEKSEL İLETKEN

Type: Equipment Type Library\Line Type

Terminal i: Grid\BARA G\Cub_2

Terminal j: Grid\BARA G(1)\Cub_2

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

☐ Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Thermal Rating: ...

Length of Line: 70. km

Derating Factor: 1.

Type of Line: Overhead Line

Line Model

☒ Lumped Parameter (PI)

☐ Distributed Parameter

Sections/Line Loads

Resulting Values

Rated Current (act.)	3,75 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	66,738 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	0, deg
Pos. Seq. Resistance, R1	66,738 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0, Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0, Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0, Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0, A
Earth Factor, Magnitude	0,3333333
Earth Factor, Angle	180, deg

OK

Cancel

Figure >>

Jump to ...

Şekil 16. Digsilent PowerFactory programında iletken hattın uzunluk değeri

Hat üzerinden geçecek voltaj ve akım değerlerini girmek için Basic Data kısmına girip oradan şekil 17’ de gösterildiği voltaj ve akım değerleri girilmektedir. Aynı zamanda süperiletken ve geleneksel iletken tel karşılaştırmasında en önemli değer iletkenin direncidir. Bu nedenden dolayı hattın direnç değeri de girilmiştir. Farklı simülasyonlarda çalışma yapılacağından dolayı direnç değerleri hattın süperiletkenlik ve geleneksel iletkenliğine göre değişkenlik gösterecektir.

Line Type - Equipment Type Library\Line Type.TypLne

Basic Data

Name: Line Type

Rated Voltage: 154 kV

Rated Current: 3.75 kA

Nominal Frequency: 50 Hz

Cable / OHL: Overhead Line

System Type: AC Phases: 3 Number of Neutrals: 0

Parameters per Length 1,2-Sequence

AC-Resistance R(20°C): 0.9534 Ohm/km

Reactance X': 0 Ohm/km

Parameters per Length Zero Sequence

AC-Resistance R0': 0 Ohm/km

Reactance X0': 0 Ohm/km

OK Cancel

Şekil 17. Digsilent PowerFactory programında hattın voltaj, akım ve direnç değeri girişi

Hattın üzerinden geçen akımı görebilmek için yük bağlanması gerekmektedir. Çünkü akımın ölçülebilmesi için hattın yük çekmesi gerekmektedir. Bu nedenden dolayı şekil 18’de görüldüğü gibi yükün gücü 2 MW olarak belirlenmiştir.

General Load - Grid\YÜK G.ElmLod

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

State Estimation

Reliability

Generation Adequacy

Description

General Advanced

Input Mode: Default

Balanced/Unbalanced: Balanced

Operating Point

Active Power: 2 MW

Reactive Power: 1 Mvar

Voltage: 1 p.u.

Scaling Factor: 1

Adjusted by Load Scaling: ☒ Zone Scaling Factor: 1

Actual Values

2 MW

1 Mvar

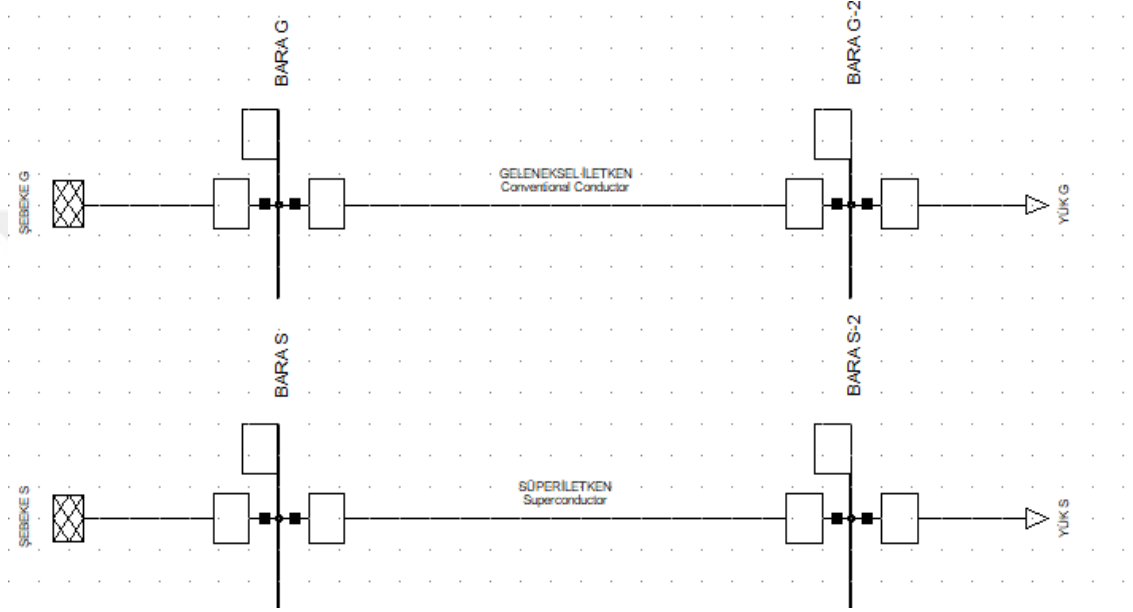
1

1

OK Cancel Figure >> Jump to ...

Şekil 18. Digsilent PowerFactory programında yükün güç değeri girişi

Süperiletken ve geleneksel iletken için iki farklı tek hat şeması çizilerek şekil 19’da gösterilmektedir. Bu çalışmada iletkenlerin uzunlukları değiştirilerek, farklı gerilim ve akım değerlerine sahip şebeke üzerinde DigSilent programı ile simülasyon analizleri yapılacaktır. Bu sayede süperiletken ve geleneksel iletkenlerin farklı şebeke değerlerinde kullanıldığında arasındaki analiz sonuçları gözlemlenecektir.



Şekil 19. Geleneksel iletken ve süperiletken tek hat şeması

5. BULGULAR

5.1. Yüksek Gerilim Hattında Yapılan Analiz Sonuçları

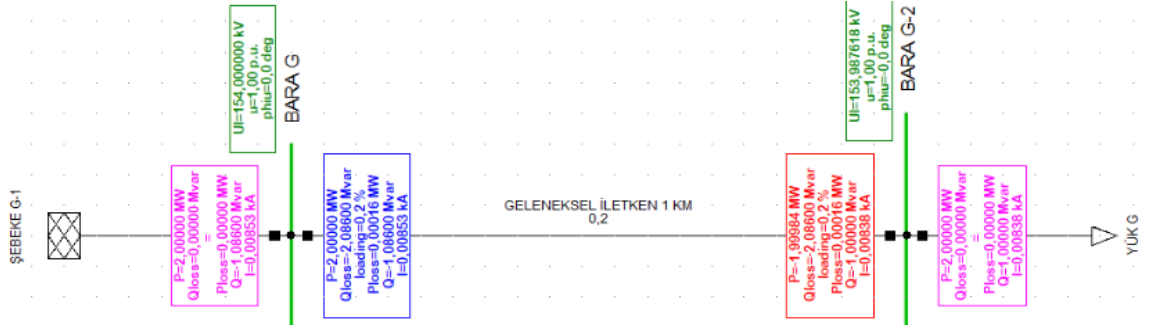
Bu çalışmada, 154 kV değerine sahip yüksek gerilim hattı kullanılmıştır. Hat şeması oluşturulurken Kore’de yapılan 154 kV değerine sahip yüksek gerilim hattı örnek alınmıştır (Ankara Üniversitesi, 2014). Bu hattın akım değeri 3750 A’dır. Öncelikle geleneksel iletken hat ile süperiletken tel hattının voltaj ve akım değerleri aynı tutulmuş olup farklı hat uzunluğundaki güç kaybı, yük akışı, reaktif güç kaybı ve gerilim düşümü analizleri yapıldı.

Simülasyon çalışmalarını yaparken akım ve gerilim değerleri sabit tutulurken sadece iletken uzunluğu değiştirilerek sonuçlar elde edildi. Geleneksel iletkenin uzunluklarına göre şebeke isimleri Tablo 3’de verildi.

Tablo 3. 154 kV şebekesinde geleneksel iletken değerleri

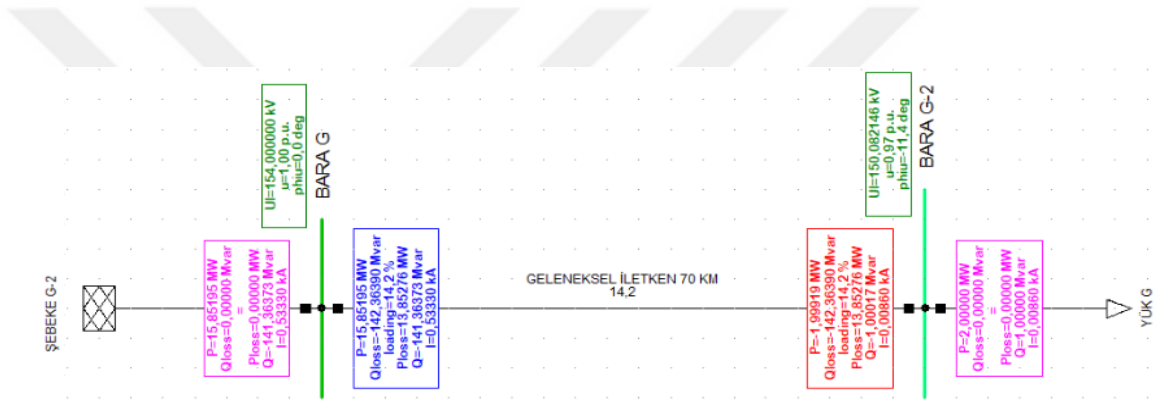
Şebeke	Gerilim (kV)	Akım (A)	Uzunluk (km)	Direnç (ohm/km)	Kapasitans (uF/km)
G-1	154	3750	1	0.9565	0.28
G-2	154	3750	70	0.9565	0.28
G-3	154	3750	150	0.9565	0.28
G-4	154	3750	350	0.9565	0.28
G-5	154	3750	500	0.9565	0.28

Şekil 20’de gösterilen G-1 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



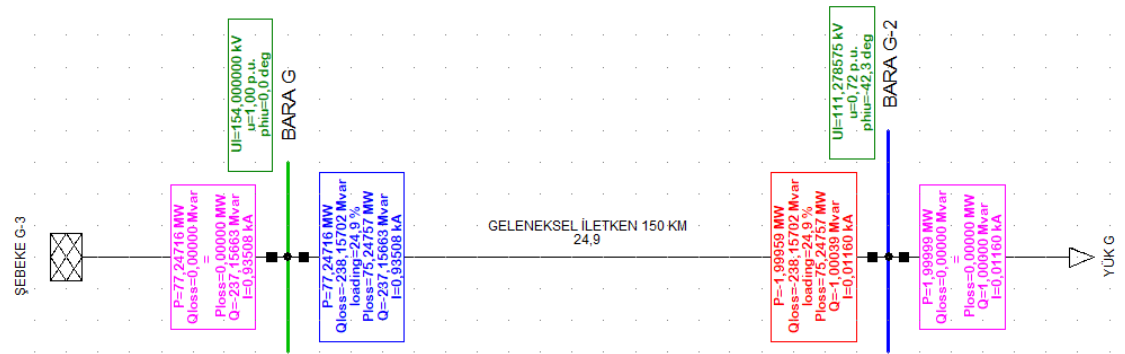
Şekil 20. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 1 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 21’de G-2 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



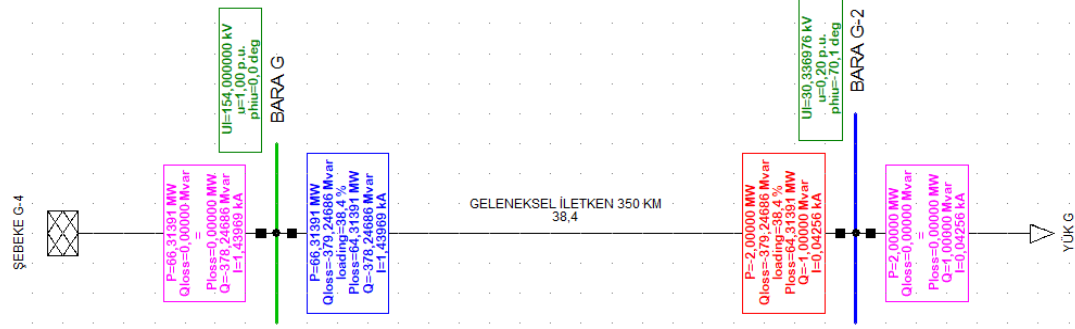
Şekil 21. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 22’de G-3 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



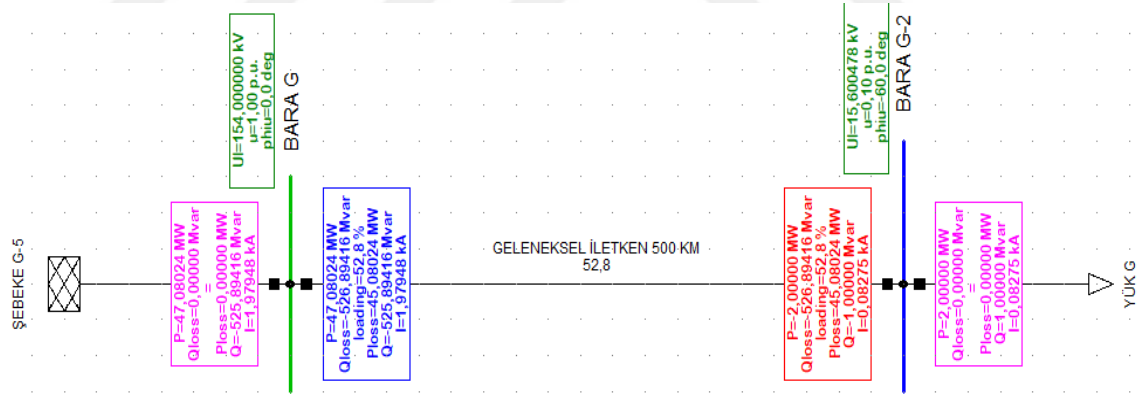
Şekil 22. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

. Şekil 23’de G-4 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



Şekil 23. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 350 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 24’de G-5 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



Şekil 24. 154 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 500 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Tablo 4 ‘de yukarıda oluşturulan hat değerlerine göre DigSilent programı ile yapılan analiz sonuçları gösterilmektedir. Analiz edilen sonuçlara göre 154 kV şebekede geleneksel iletken kullanıldığı takdir de hat uzunluğu arttıkça elektriksel kayıplarında arttığı gözlemlenmektedir. Hat uzunluğu 500 km iken gerilim kaybı 138.348 kV değerine kadar çıkmaktadır.

Tablo 4. 154 kV şebekesinde geleneksel iletken hat analiz sonuçları

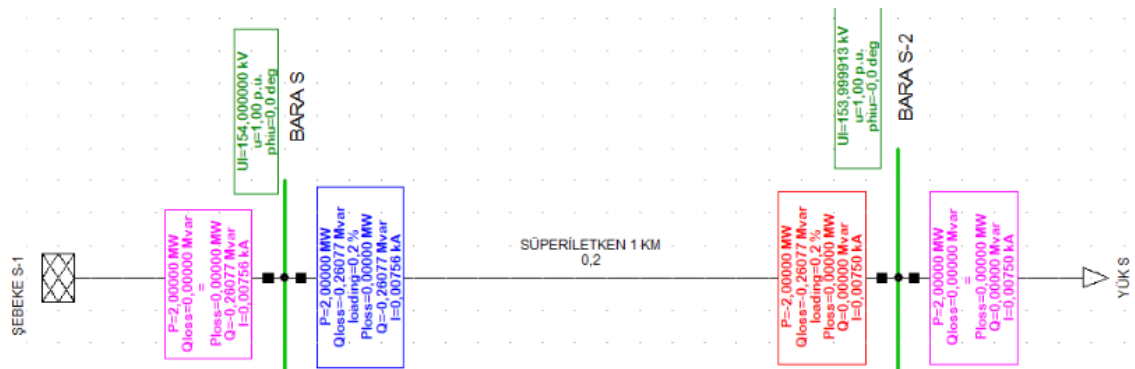
Şebeke	Gerilim Kaybı (kV)	Güç Kaybı (MW)	Reaktif Güç Kaybı (Mvar)	Yük Akışı	Akım Kaybı (kA)
G-1	0.01239	0.012	2.0860	% 0.2	0.00015
G-2	3.91785	13.85	142.36	% 14.2	0.52470
G-3	42.7214	75.24	238.15	% 24.9	0.92348
G-4	123.663	80.31	379.24	% 38.4	1.39713
G-5	138.348	90.23	526.92	%52.8	1.89717

Süperiletkenin uzunluklarına göre şebeke isimleri Tablo 5’de verildi.

Tablo 5. 154 kV şebekesinde süperiletken değerleri

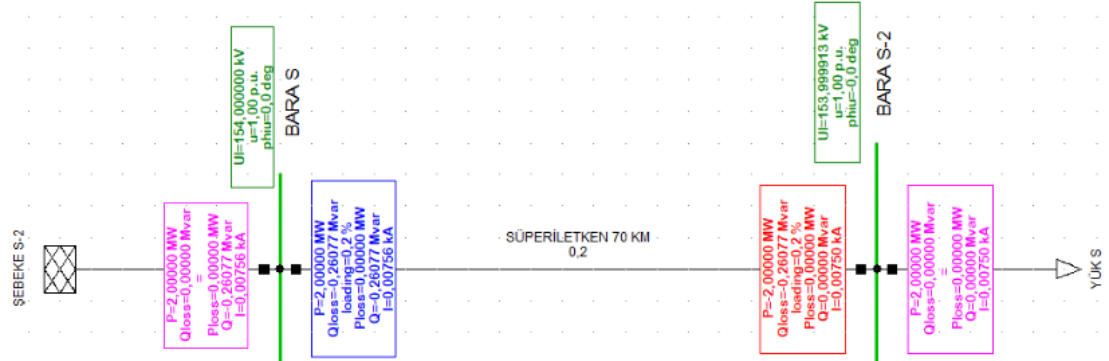
Şebeke	Gerilim (kV)	Akım (A)	Uzunluk (km)	Direnç (ohm/km)	Kapasitans (uF/km)
S-1	154	3750	1	0.0001	0.0005
S-2	154	3750	70	0.0001	0.0005
S-3	154	3750	150	0.0001	0.0005
S-4	154	3750	350	0.0001	0.0005
S-5	154	3750	500	0.0001	0.0005

Şekil 25’de S-1 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



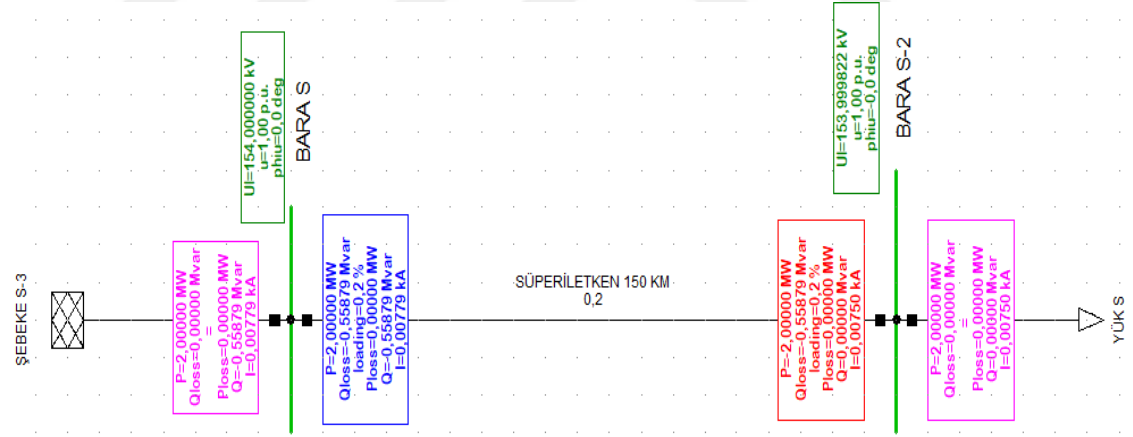
Şekil 25. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 1 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 26'da S-2 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



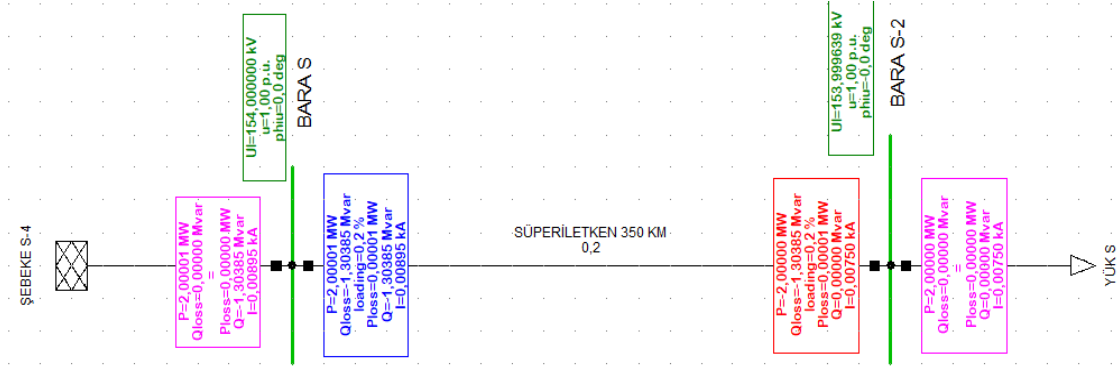
Şekil 26. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 27'da S-3 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



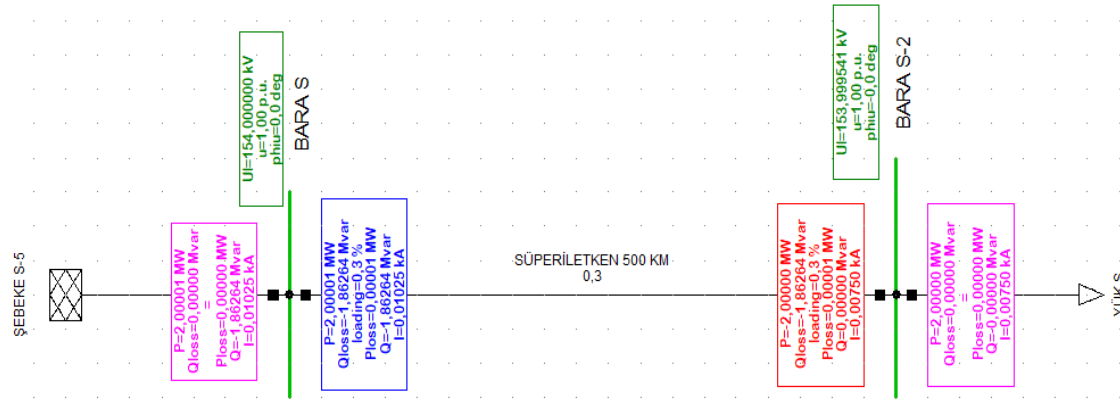
Şekil 27. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 28'da S-4 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



Şekil 28. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 350 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 29’da S-5 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile gösterilmektedir.



Şekil 29. 154 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 500 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

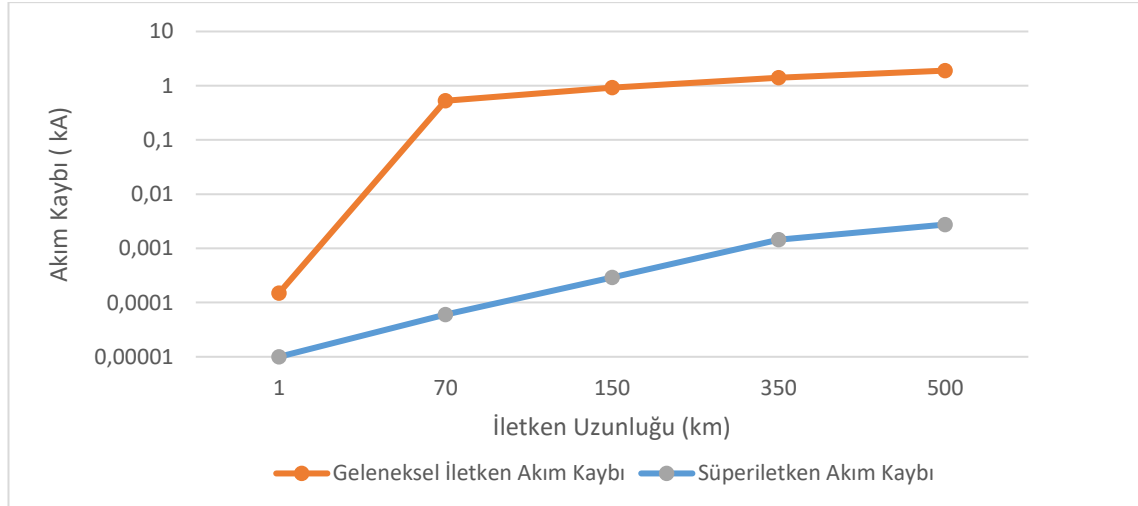
Tablo 6’da yukarıdaki şekilde oluşturulan hatların DigSilent programında yapılan simülasyon sonuçları verildi. Analiz edilen sonuçlara göre 154 kV şebekeye bağlı olan hatta süperiletken kullanıldığında hat uzunluğu arttıkça elektriksel kayıplar artmakta fakat neredeyse sıfırdır. Hat uzunluğu 1 km’ de ve 500 km’ de ki gerilim kaybı farkı 0.000372 kV değerinde yok denilecek kadar azdır.

Tablo 6. 154 kV şebekesinin de süperiletken analiz sonuçları

Şebeke	Gerilim Kaybı (kV)	Güç Kaybı (MW)	Reaktif Güç Kaybı (Mvar)	Yük Akışı	Akım Kaybı (A)
S-1	0.000087	0	0.003	% 0.2	0.00001
S-2	0.000087	0.000001	0.260	% 0.2	0.00006
S-3	0.000178	0.0001	0.558	% 0.2	0.00029
S-4	0.000361	0.001	1.303	% 0.2	0.00145
S-5	0.000459	0.001	1.862	% 0.3	0.00275

Tablo 5 ve tablo 6’ da ki geleneksel iletken ve süperiletkenlerin analiz değerleri karşılaştırma yapılarak grafik şeklinde aşağıda verilmiştir.

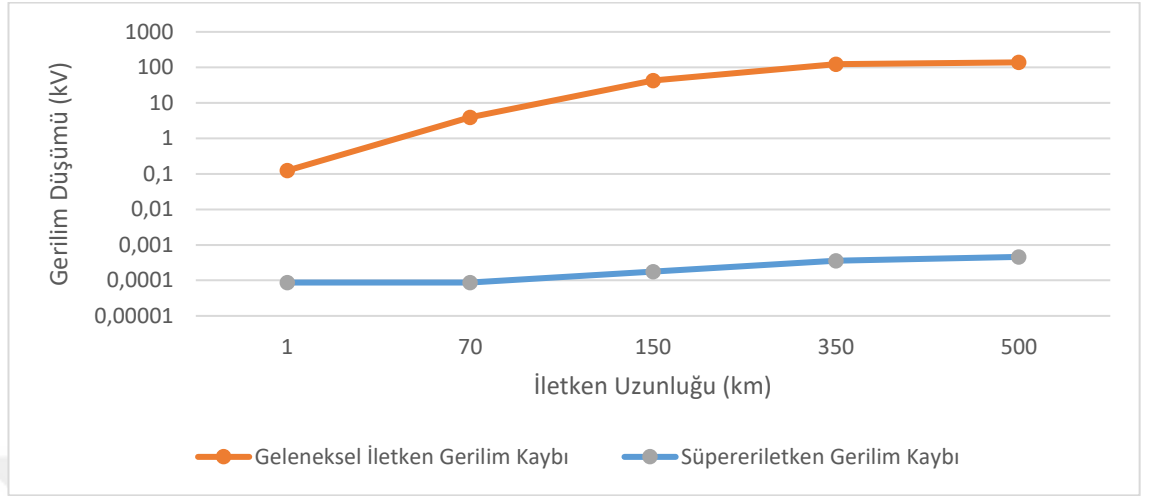
Şekil 30’da geleneksel iletken ve süperiletkenin 154 kV şebekesinde akım kayıpları karşılaştırıldı. Geleneksel iletken kullanıldığı takdirde iletken uzunluğu arttıkça akım kaybının arttığı gözlenmiştir. Süperiletken kullanıldığında ise uzunluk arttıkça akım kaybı 0.0001 kA değerlerine kadar düştüğünden dolayı grafikte logaritmik taban kullanılmıştır.



Şekil 30. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre akım kaybı

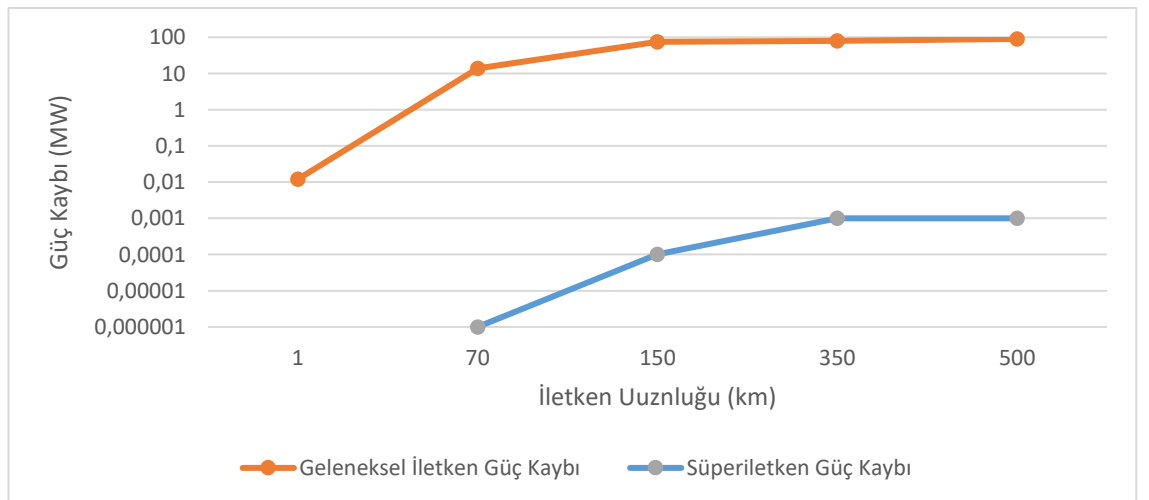
154 kV şebeke de süperiletken ve geleneksel iletken kullanılarak farklı uzunluklarda gerilim düşümüne bakılmıştır. Süperiletken hattında gerilim düşümü

neredeyse 0 kV iken geleneksel iletken de 138.348 kV değerine kadar çıktığı görülmektedir. Şekil 31’ de gerilim düşümü artışı gösterilmektedir.



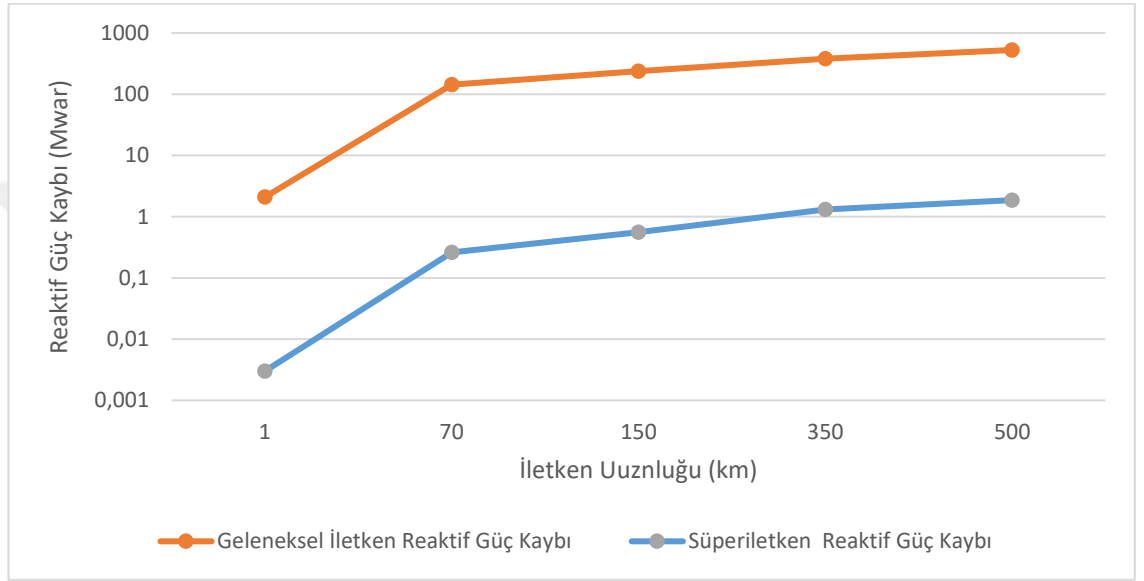
Şekil 31. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre gerilim düşümü

Şekil 32’ de geleneksel iletken ile süperiletken hattın uzunluklarına göre güç kayıplarına bakıldığında geleneksel iletken kayıpları hat uzunlukları arttıkça güç kayıplarında arttığı gözlenmektedir. Aynı şekilde süperiletken hatta bakıldığında güç kayıplara neredeyse yok denilecek kadar az olduğu gözlemlenmiştir.



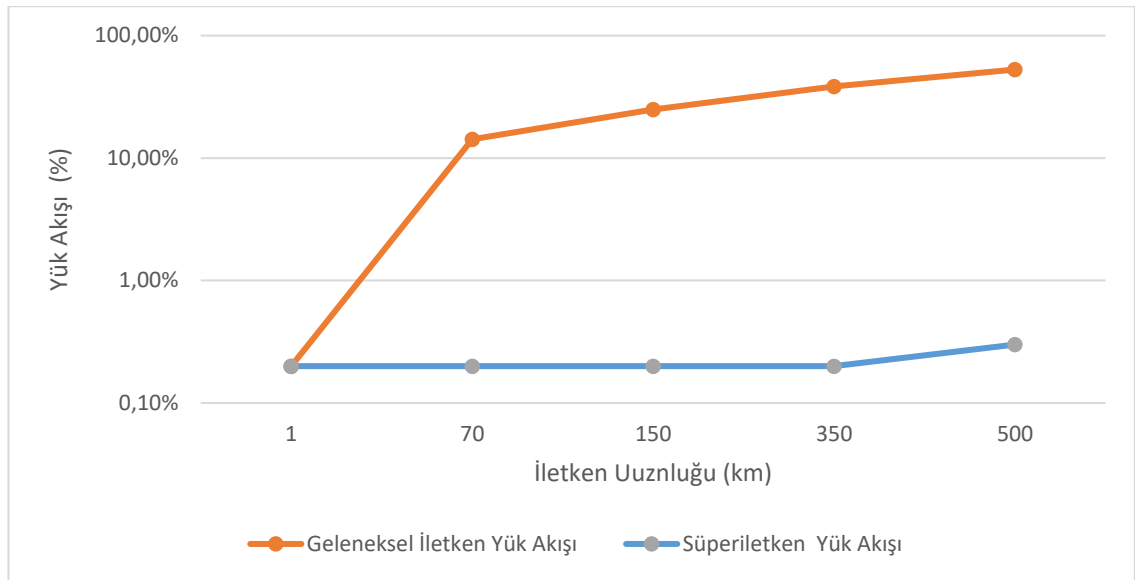
Şekil 32. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre güç kaybı

Şekil 33’ de geleneksel iletken ve süperiletkenin 154 kV şebekesinde farklı iletken uzunluklarında güç kaybı karşılaştırılmıştır. İletim hatlarında güç kayıpları kadar reaktif gücün de önemi yüksektir. Reaktif güç hatta ek bir yük oluşturmaktadır. Süperiletken ve geleneksel iletkenleri farklı uzunluklarda karşılaştırıldığında şekil 33’ te ki grafikte görüldüğü gibi geleneksel hatta uzunluk arttıkça reaktif güç kaybının arttığı gözlemlenmektedir. Süperiletken hatta ise geleneksel iletken hatta göre çok az bir kayıp olduğu görülmektedir.



Şekil 33. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre reaktif güç kayıpları

Şekil 34’te geleneksel iletken ve süperiletkenin 154 kV şebekesinde farklı iletken uzunluklarında reaktif güç kaybı karşılaştırılmıştır. Şebekesinde yük akış analizi yapıldığında iletken kesit boyutlarının ne büyüklükte olacağı belirlenebilir. Yük akışı ne kadar fazla ise iletken kesitlerinde bir o kadar büyük olması gerekmektedir. Geleneksel iletken hatta uzunluk arttıkça yük akış oranı da artmaktadır. Süperiletken kullanıldığı takdir de iletken kesitleri geleneksel iletken kesitine göre daha küçük boyutlarda olabileceği Şekil 34’ ten anlaşılır.



Şekil 34. 154 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluklarına göre yük akışı

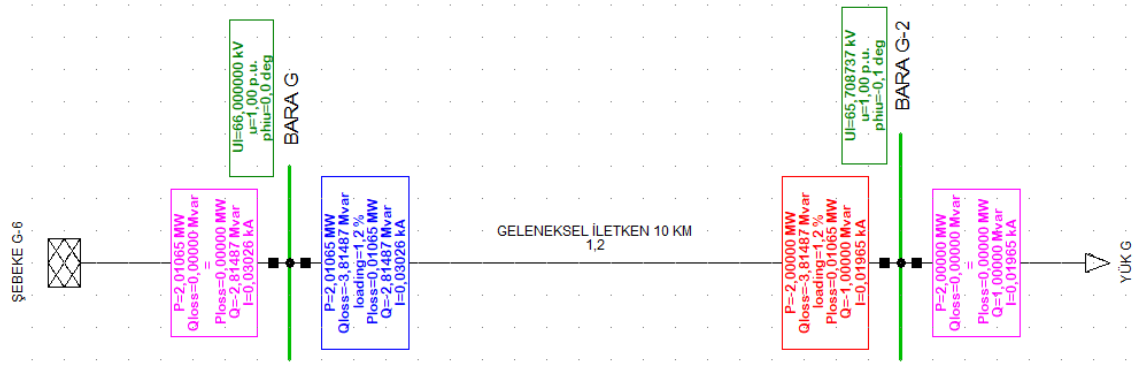
154 kV gerilim değerinden sonra 66 kV değerine sahip yüksek gerilim hattı analizleri yapıldı. Bu hattın akım değeri 2500 A'dır. Simülasyon sonucunda hatta oluşacak güç kaybı, yük akışı, reaktif güç kaybı ve gerilim düşümü analizleri yapıldı.

DigSilent programı ile çalışma yaparken akım ve gerilim değerleri sabit tutularak sadece iletken uzunlukları değiştirilmiştir. Geleneksel iletkenin uzunluklarına göre şebeke isimleri Tablo 7'de verildi.

Tablo 7. 66 kV şebekesinde geleneksel iletken değerleri

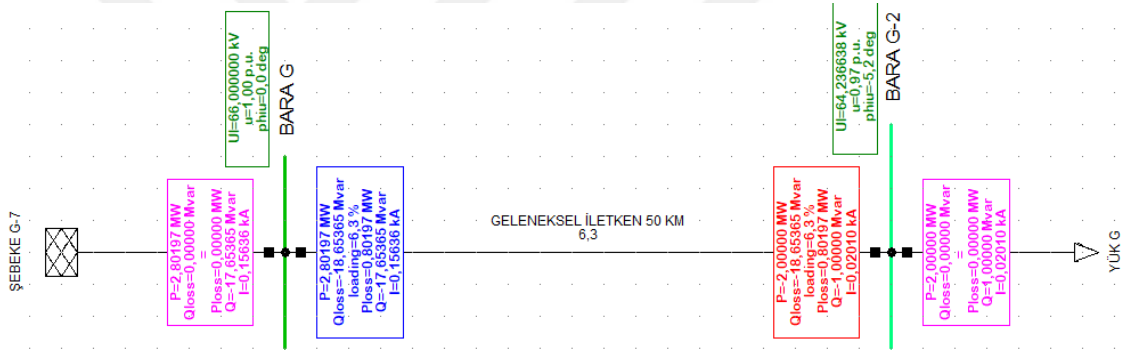
Şebeke	Gerilim (kV)	Akım (A)	Uzunluk (km)	Direnç (ohm/km)	Kapasitans (uF/km)
G-6	66	2500	10	0.9565	0.28
G-7	66	2500	50	0.9565	0.28
G-8	66	2500	90	0.9565	0.28
G-9	66	2500	150	0.9565	0.28
G-10	66	2500	200	0.9565	0.28

Şekil 35'de G-6 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



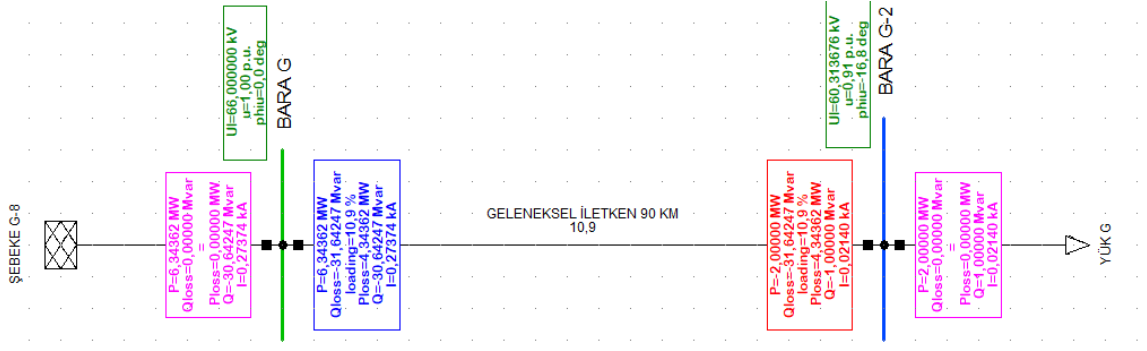
Şekil 35. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 36'da G-7 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



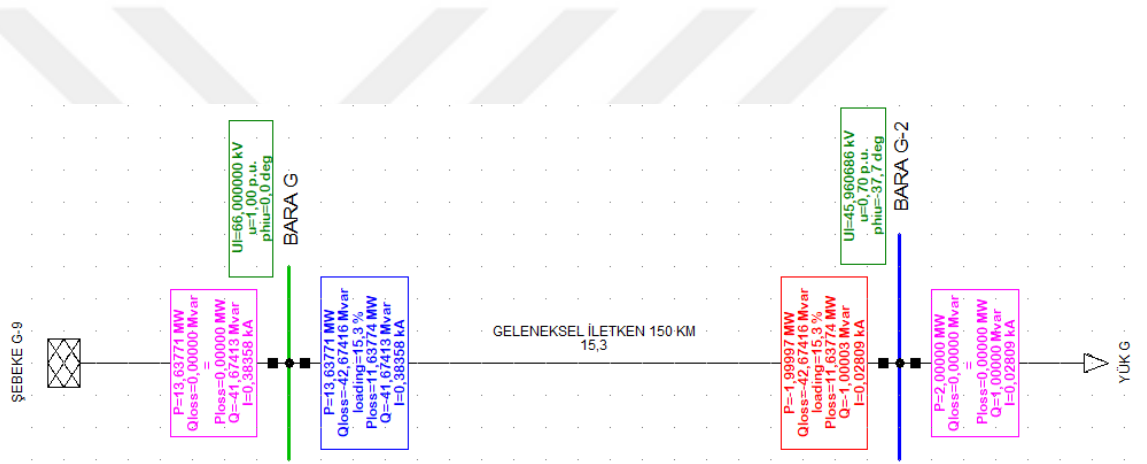
Şekil 36. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 50 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 37'de G-8 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



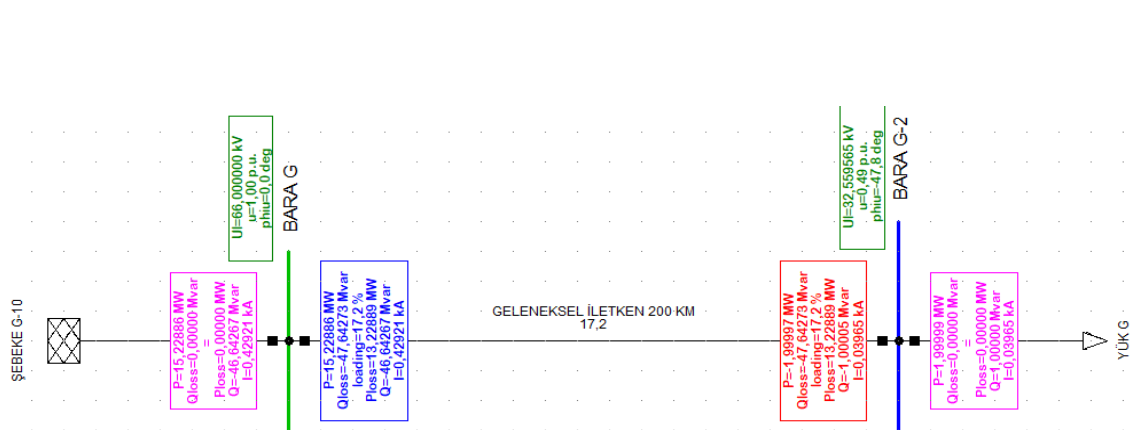
Şekil 37. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 90 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 38’de G-9 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 38. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 39’da G-10 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 39. 66 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 200 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Tablo 8’de yukarıdaki şekilde oluşturulan hatların DigSilent programında yapılan simülasyon sonuçları verildi. 66 kV şebekeye bağlı olan geleneksek hatta 10 km uzunluğunda gerilim kaybı 0.291263 kV değerindedir. 200 km hat uzunluğunda ise 33.440435 kV değerindedir. Hat uzunluğu arttıkça gerilim kaybı da arttığı gözlemlenmektedir. Tablo 8’ deki diğer elektriksel kayıplar hat uzunluğa bağlı olarak artmaktadır.

Tablo 8. 66 kV şebekesinde geleneksel iletken hat analiz sonuçları

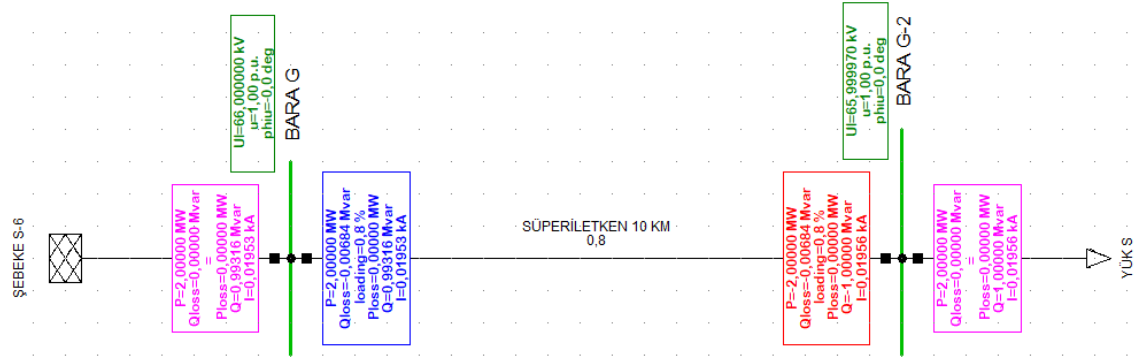
Şebeke	Gerilim Kaybı (kV)	Güç Kaybı (MW)	Reaktif Güç Kaybı (Mvar)	Yük Akışı	Akım Kaybı (A)
G-6	0.291263	0.01065	3.81487	%1.2	0.01061
G-7	1.763362	0.80197	18.65365	%6.3	0.13626
G-8	5.686324	4.34362	31.64247	%10.9	0.25234
G-9	20.03931	11.6377	42.67416	%15.3	0.35549
G-10	33.440435	13.22889	13.22889	%17.2	0.38956

66 kV şebekesinde kullanılan süperiletkenin uzunlularına göre şebeke isimleri tablo 9’da verildi.

Tablo 9. 66 kV şebekesinde kullanılan süperiletken değerleri

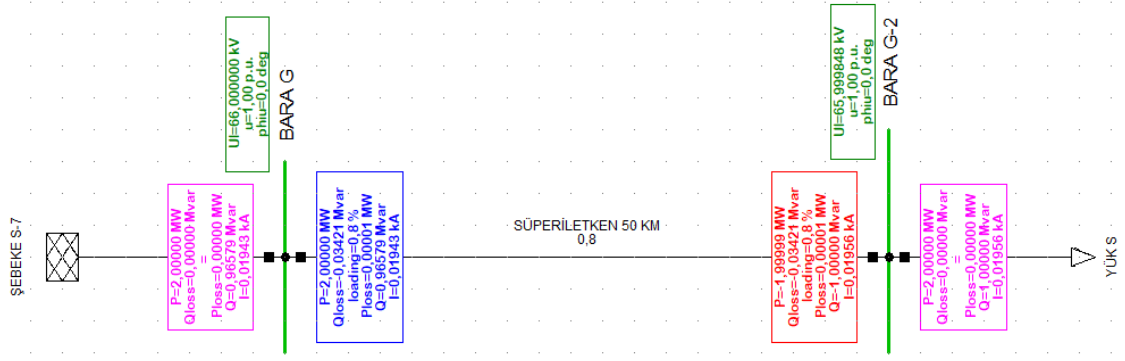
Şebeke	Gerilim (kV)	Akım (A)	Uzunluk (km)	Direnç (ohm/km)	Kapasitans (uF/km)
S-6	66	2500	10	0.0001	0.0005
S-7	66	2500	50	0.0001	0.0005
S-8	66	2500	90	0.0001	0.0005
S-9	66	2500	150	0.0001	0.0005
S-10	66	2500	200	0.0001	0.0005

Şekil 40’ da S-6 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



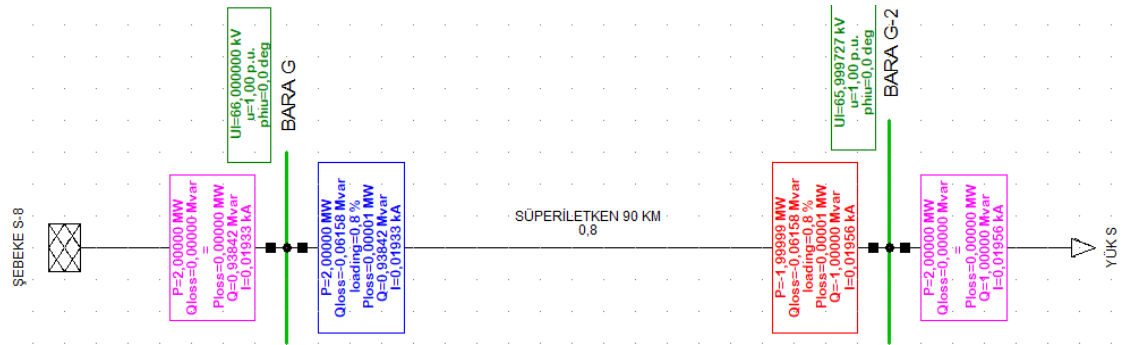
Şekil 40. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 41' da S-7 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



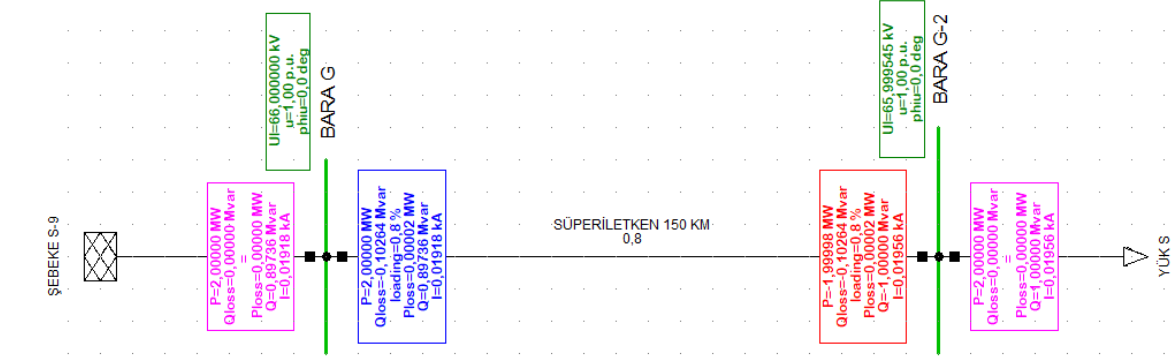
Şekil 41. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 50 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 42' da S-8 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



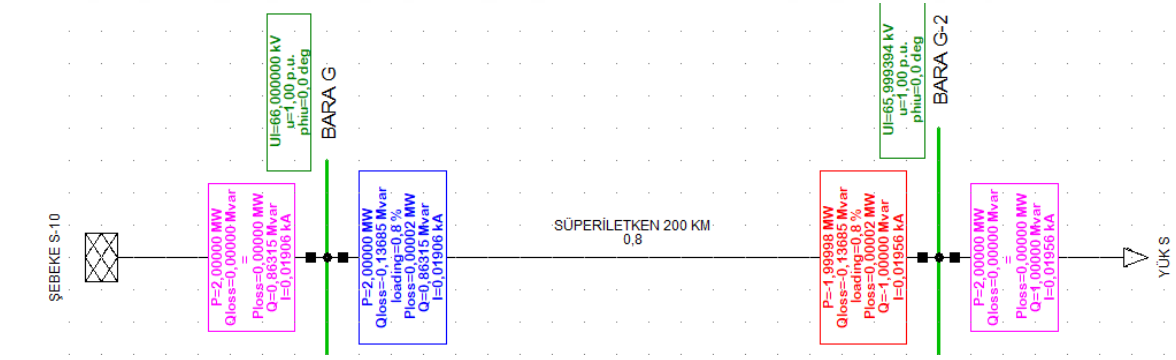
Şekil 42. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 90 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 43’ de S-9 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 43. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 150 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 44’ de S-10 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 44. 66 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 200 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

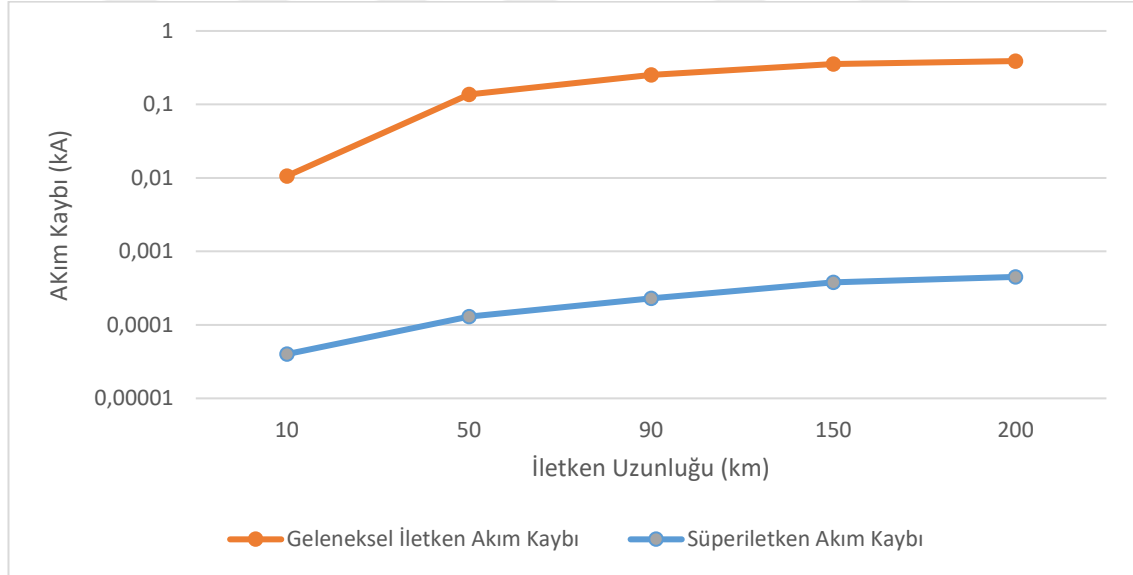
Tablo 10’da yukarıdaki şekilde oluşturulan hatların DigSilent programında yapılan simülasyon sonuçları verildi. Simülasyon sonuçlarına göre elektriksel kayıplar hat uzunluğuna bağlı artmaktadır. Fakat artış çok düşük seviyede artmaktadır. Şebeke de süperiletken hat kullanıldığı takdirde kayıplar minimum olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 10. 66 kV şebekesinde süperiletken hat analiz sonuçları

Şebeke	Gerilim Kaybı (kV)	Güç Kaybı (MW)	Reaktif Güç Kaybı (Mvar)	Yük Akışı	Akım Kaybı (A)
S-6	0.00003	0.000001	0.00684	%0.8	0.00004
S-7	0.000152	0.00001	0.03421	%0.8	0.00013
S-8	0.000273	0.00001	0.06158	%0.8	0.00023
S-9	0.000455	0.00002	0.10264	%0.8	0.00038
S-10	0.000606	0.00002	0.13685	%0.8	0.00045

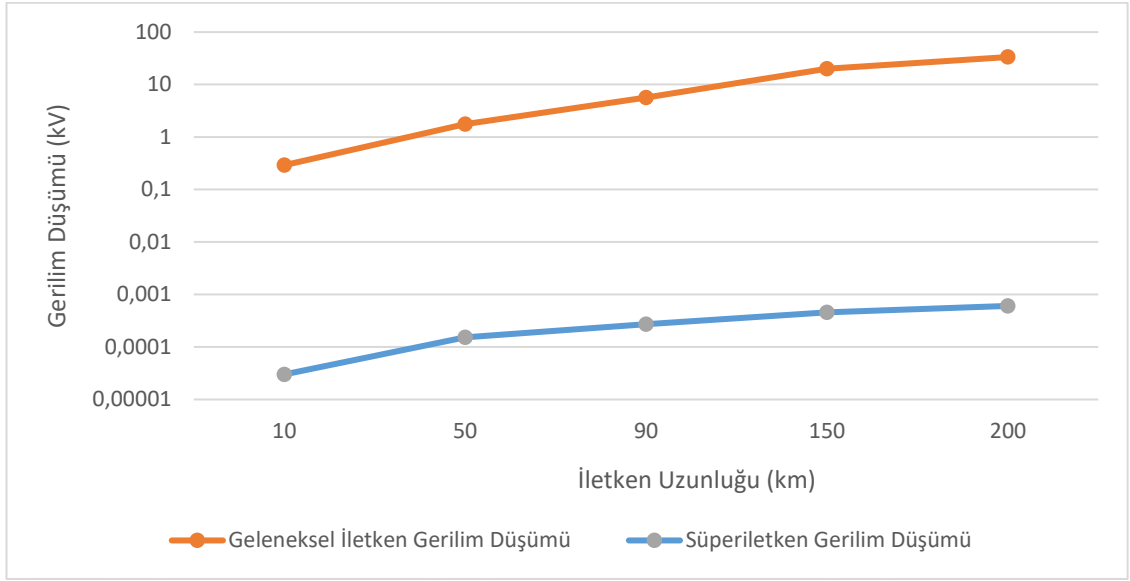
Tablo 8 ve tablo 10’ da ki geleneksel iletken ve süperiletkenlerin analiz değerleri karşılaştırma yapılarak grafik şeklinde aşağıda verilmiştir.

Şekil 45’ de 66 kV şebekesinde iki farklı iletkenin akım kayıpları gözlenmiştir. 66 kV şebekesinde de hat uzunlukları arttıkça geleneksel iletken de akım kaybı 200 km uzunluğunda 1 kA değerine yakinken süperiletken de neredeyse sıfır değerindedir.



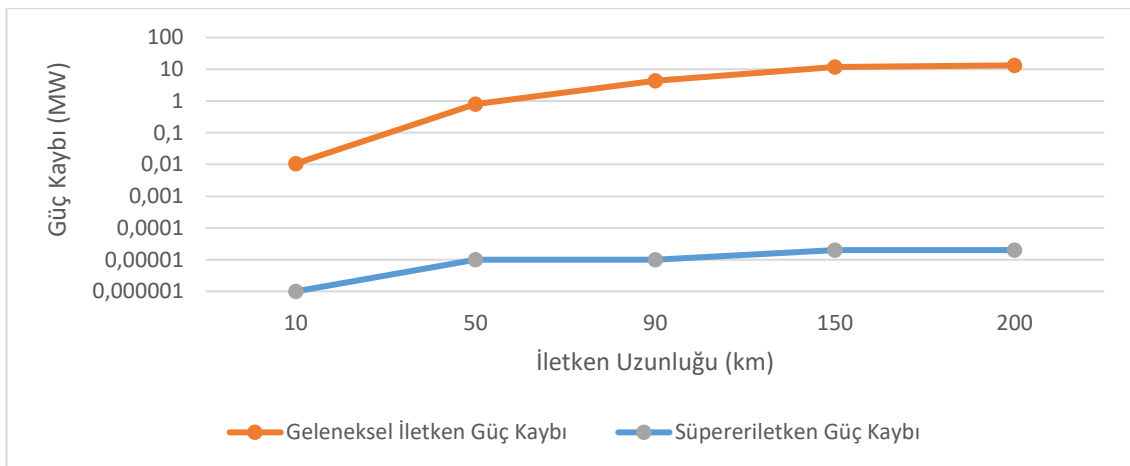
Şekil 45. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre akım kaybı

Şekil 46. ‘da 66 kV şebekesine ait geleneksel iletken ve süperiletkenin gerilim düşümleri karşılaştırmaları grafik olarak verilmiştir. Şebekede geleneksel iletken kullanıldığı takdir de gerilim düşümü 100 kV seviyesine kadar çıkarken süperiletkende neredeyse sıfır değerindedir.



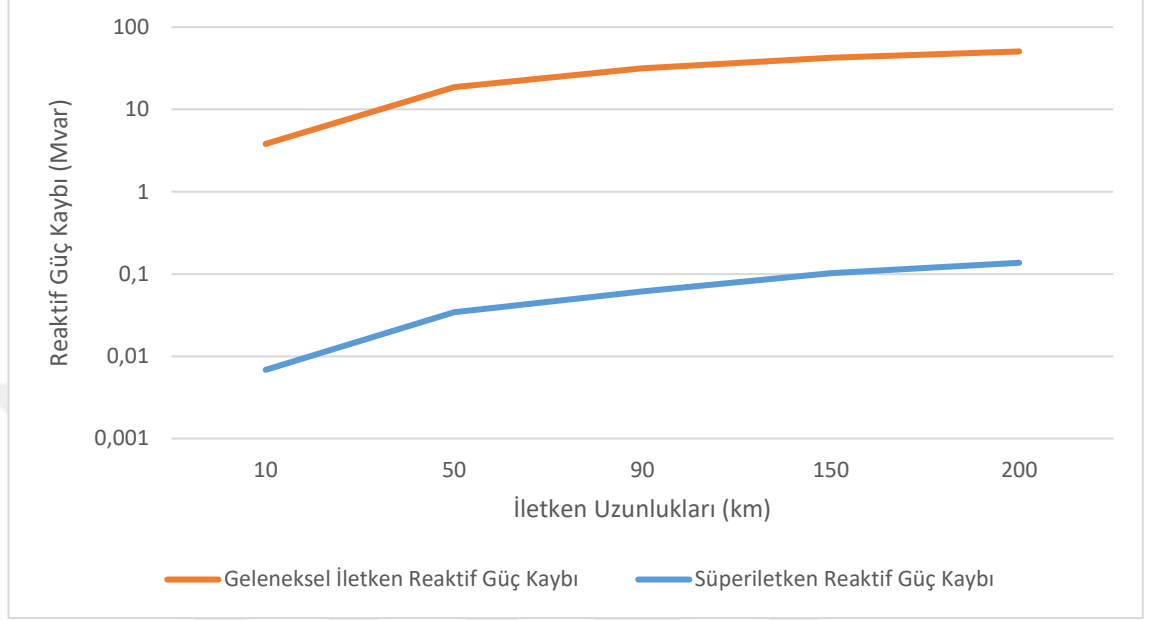
Şekil 46. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre gerilim düşümü

Şekil 47’ de 66 kV şebekesinde iki farklı iletkenin güç kayıplarına bakılmıştır. Grafiğin x eksenin de güç kaybı değeri yer alırken y eksenin de iletken uzunluğu değerleri verilmektedir. Geleneksel iletken hat uzunlukları arttıkça güç kaybı uzunluğa bağlı olarak 10 MW değerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Fakat süperiletken güç kaybı neredeyse sıfırdır.



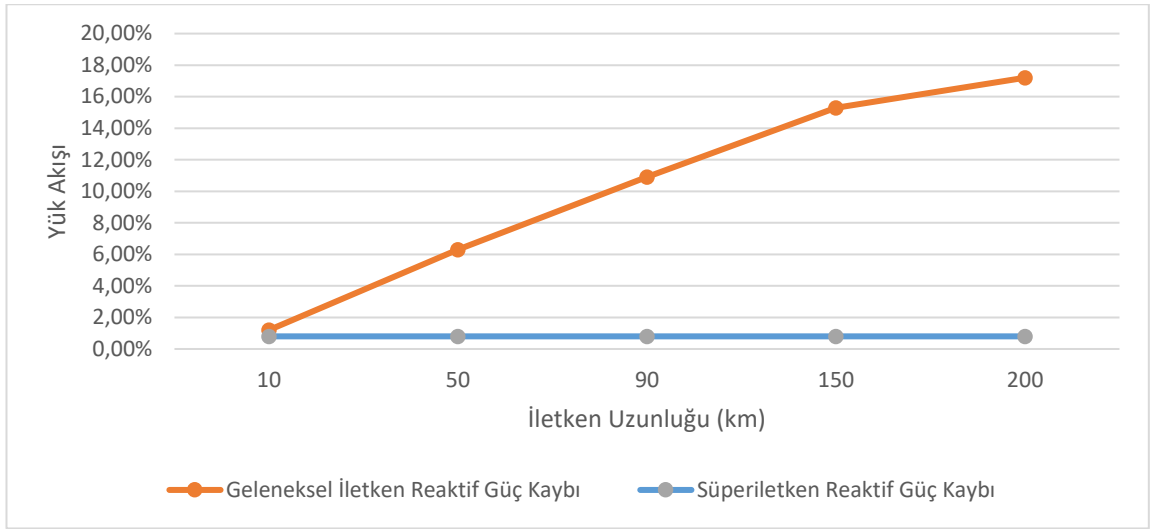
Şekil 47. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre güç kaybı

Şekil 48’ de 66 kV şebekesinde geleneksel iletkin ile süperiletkenin analiz sonuçları grafikte verilmektedir. Geleneksel iletkin kullandığında reaktif güç kaybı 100 Mvar seviyesine çıkarken süperiletkin de neredeyse sıfır değerindedir.



Şekil 48. 66 kV şebekesinde süperiletkin ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre reaktif güç kaybı

Şekil 49’ da 66 kV şebekesinde geleneksel iletkin ile süperiletkin hattı yük akış analiz sonuçları gözlemlenip, karşılaştırma grafiği verilmiştir. 66 kV şebekesinde geleneksel iletkin kullanıldığı durumda yük akışının %18’e yaklaştığı gözlenmiştir. Süperiletkin kullandığında ise neredeyse %0 değerindedir.



Şekil 49. 66 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre yük akışı

5.2. Orta Gerilim Hattında Yapılan Analiz Sonuçları

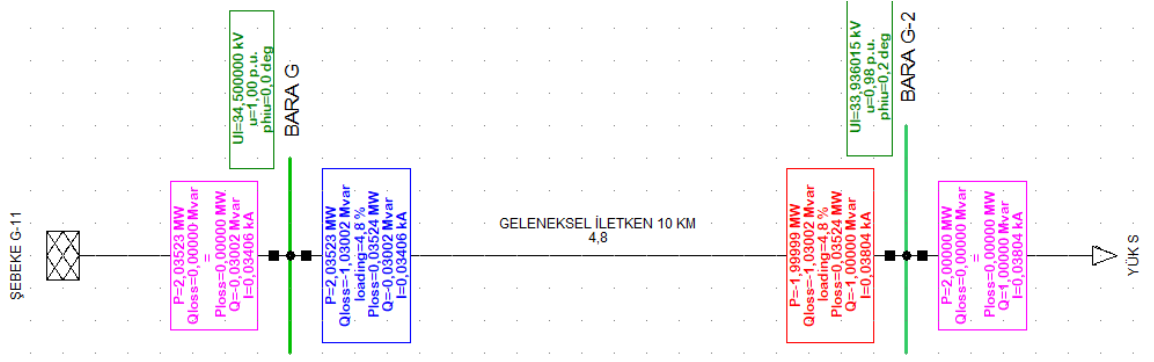
Bu çalışmada Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Albany eyaletinde yapılan 34.5 kV ve 800 A şebekesi değerinde olan proje baz alınmıştır (Ankara Üniversitesi, 2014). Geleneksel iletken hat ile süperiletkenin uzunlukları değiştirilerek DigSilent programında simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Geleneksel iletkenin uzunluklarına göre şebeke isimleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. 34.5 kV şebekesinde kullanılan geleneksel iletken değerleri

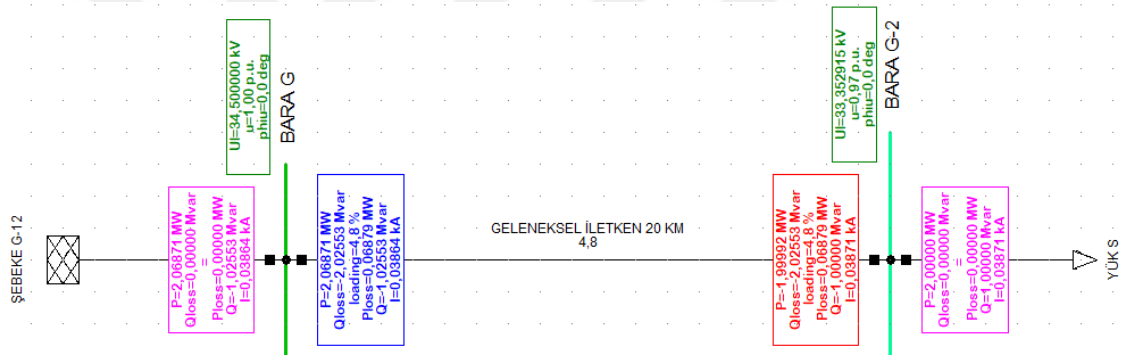
Şebeke	Gerilim (kV)	Akım (A)	Uzunluk (km)	Direnç (ohm/km)	Kapasitans (uF/km)
G-11	34.5	800	10	0.9565	0.28
G-12	34.5	800	20	0.9565	0.28
G-13	34.5	800	40	0.9565	0.28
G-14	34.5	800	60	0.9565	0.28
G-15	34.5	800	70	0.9565	0.28

Şekil 50'da G-11 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



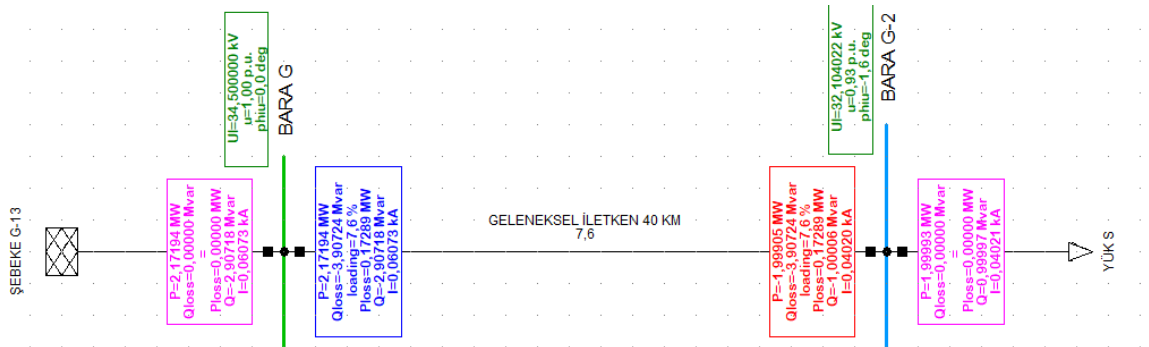
Şekil 50. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 51’de G-12 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



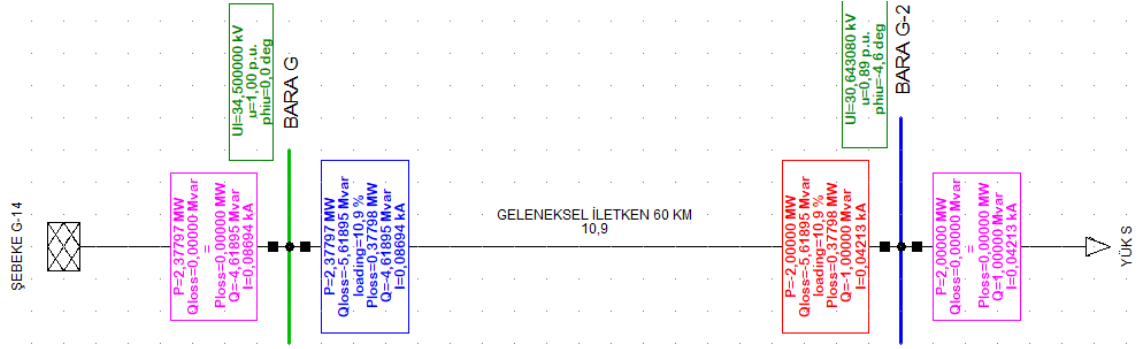
Şekil 51. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 20 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 52’de G-13 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



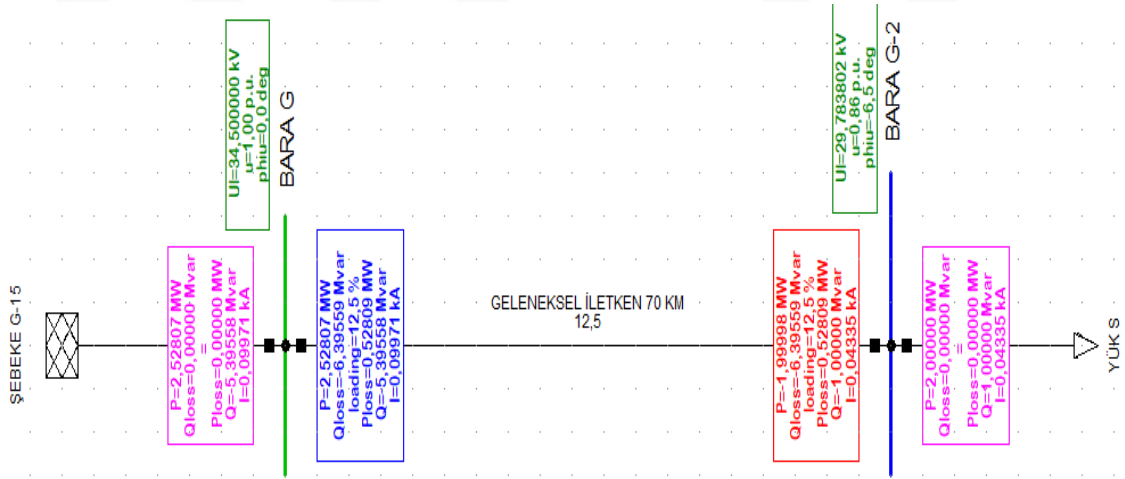
Şekil 52. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 40 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 53’de G-14 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 53. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 60 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 54’de G-15 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 54. 34.5 kV gerilim seviyesindeki geleneksel hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Tablo 10’da yukarıdaki şekilde oluşturulan hatların DigSilent programında yapılan simülasyon sonuçları verildi. 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken kullandığı durumda gerilim kaybı ve buna bağlı tablo 10’daki diğer elektriksel değerler sürekli artmaktadır. Hattın uzunluğu 10 km’ de gerilim kaybı 0.56399 kV değerindeyken 70 km uzunluğunda ise 4.71618 kV değerindedir.

Tablo 12. 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken hat analiz sonuçları

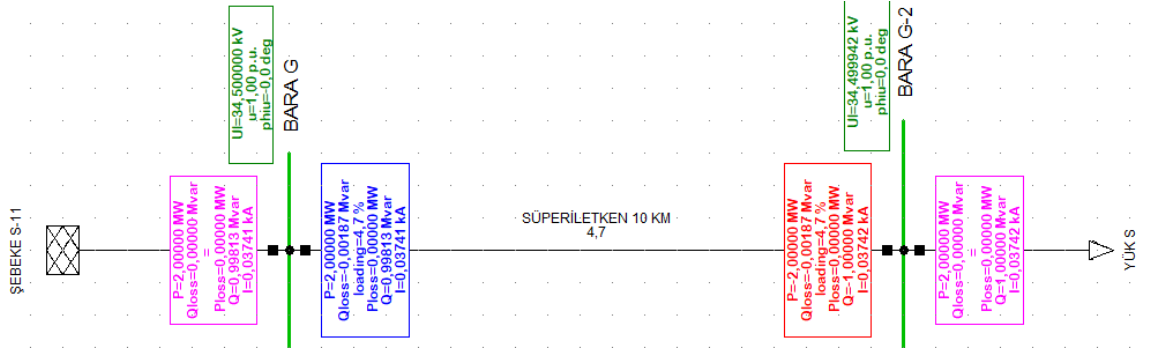
Şebeke	Gerilim Kaybı (kV)	Güç Kaybı (MW)	Reaktif Güç Kaybı (Mvar)	Yük Akışı	Akım Kaybı (A)
G-11	0.56399	0.03524	1.03002	%4.8	0.00398
G-12	1.14708	0.06879	2.02553	%4.8	0.00452
G-13	2.39597	0.17289	3.90724	%7.6	0.02053
G-14	3.85692	0.37798	5.61895	%10.9	0.04481
G-15	4.71618	0.52809	6.39559	%12.5	0.05636

34.5 kV şebekesinde kullanılan süperiletkenin uzunlularına göre şebeke isimleri tablo 13'te verildi. Farklı değerde iletken uzunlukları ile simülasyon çalışmaları yapıldı.

Tablo 13. 34.5 kV şebekesinde süperiletken değerleri

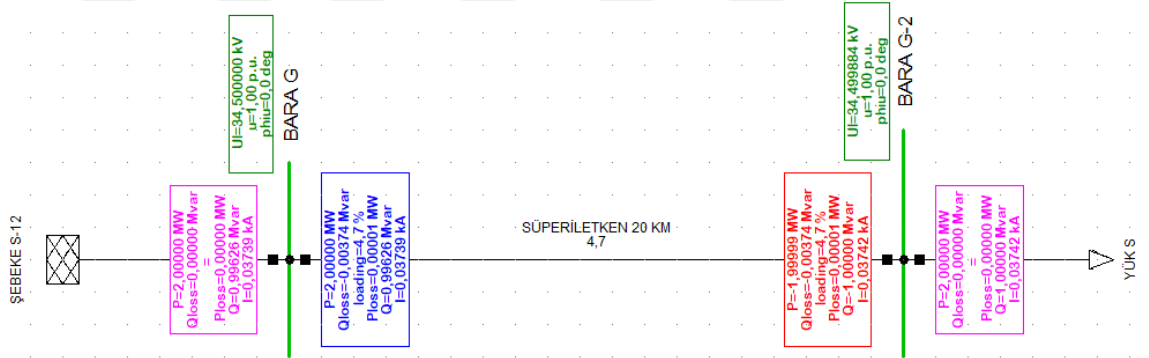
Şebeke	Gerilim (kV)	Akım (A)	Uzunluk (km)	Direnç (ohm/km)	Kapasitans (uF/km)
S-11	34.5	800	10	0.0001	0.0005
S-12	34.5	800	20	0.0001	0.0005
S-13	34.5	800	40	0.0001	0.0005
S-14	34.5	800	60	0.0001	0.0005
S-15	34.5	800	70	0.0001	0.0005

Şekil 55' te S-11 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



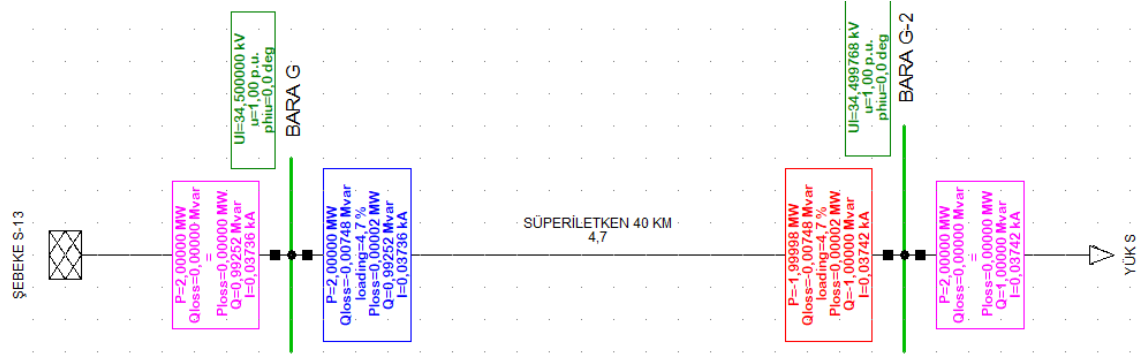
Şekil 55. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 10 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 56' da S-12 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



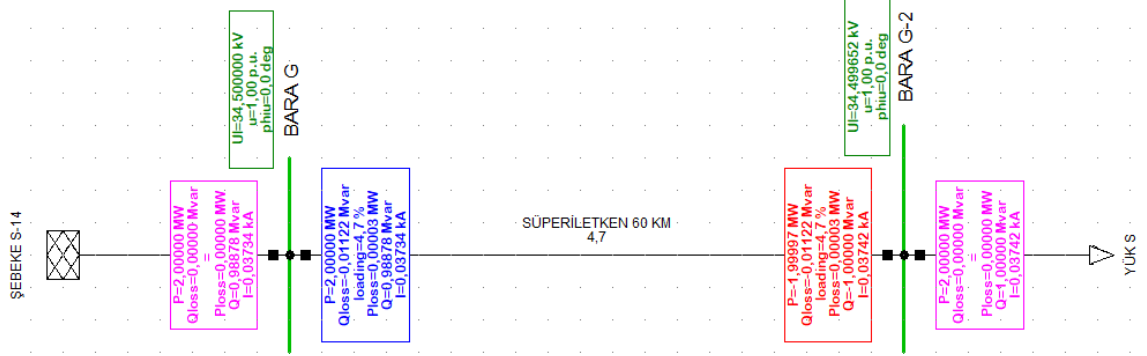
Şekil 56. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 20 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 57' de S-13 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



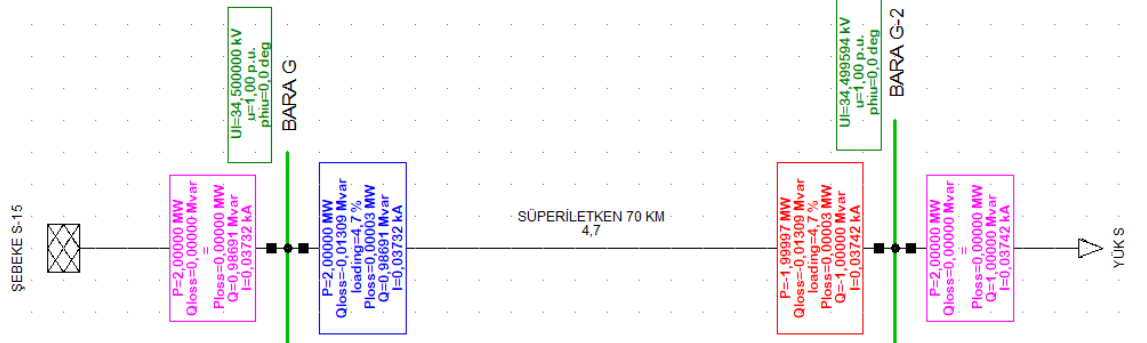
Şekil 57. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 40 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 58' de S-14 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 58. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 60 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

Şekil 59' da S-15 şebekesinin değerleri DigSilent programın görüntüsü ile verilmiştir.



Şekil 59. 34.5 kV gerilim seviyesindeki süperiletken hattın 70 km mesafe sonundaki elektriksel değişim değerleri

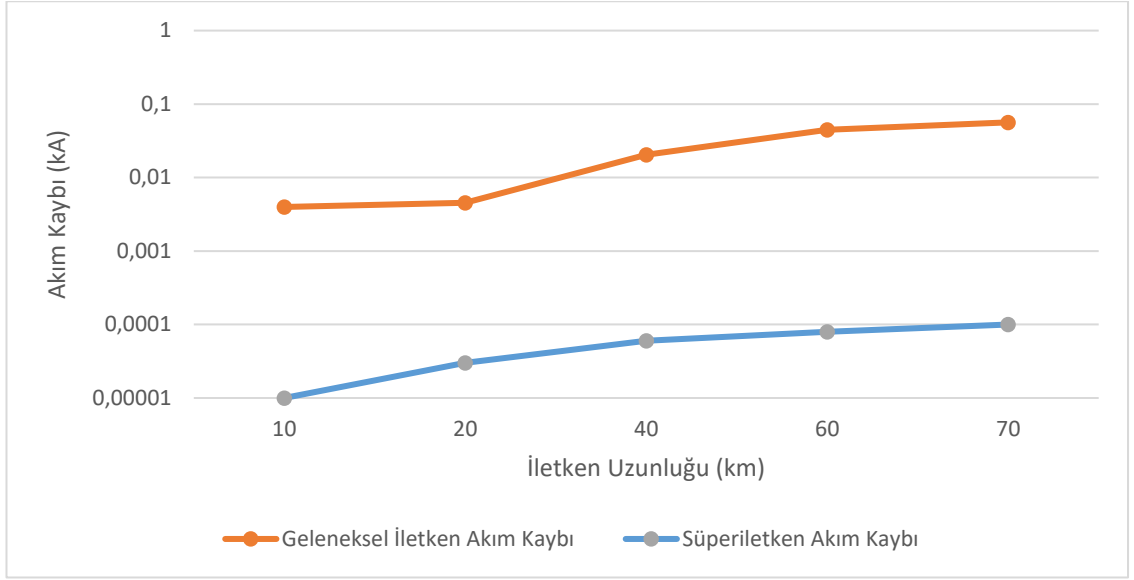
Tablo 14’te yukarıdaki şekilde oluşturulan hatların DigSilent programında yapılan simülasyon sonuçları verildi. 34.5 kV şebekesinde süperiletken kullandığı durumda tablo 14’ te görüldüğü gibi elektriksel kayıplar neredeyse sıfır olmaktadır.

Tablo 14. 34.5 kV şebekesinde süperiletken hat analiz sonuçları

Şebeke	Gerilim Kaybı (kV)	Güç Kaybı (MW)	Reaktif Güç Kaybı (Mvar)	Yük Akışı	Akım Kaybı (A)
S-11	0.000058	0	0.00187	%4.7	0.00001
S-12	0.000116	0.00001	0.00374	%4.7	0.00003
S-13	0.000232	0.00002	0.00748	%4.7	0.00006
S-14	0.000348	0.00003	0.11221	%4.7	0.00008
S-15	0.000406	0.00003	0.01309	%4.7	0.00010

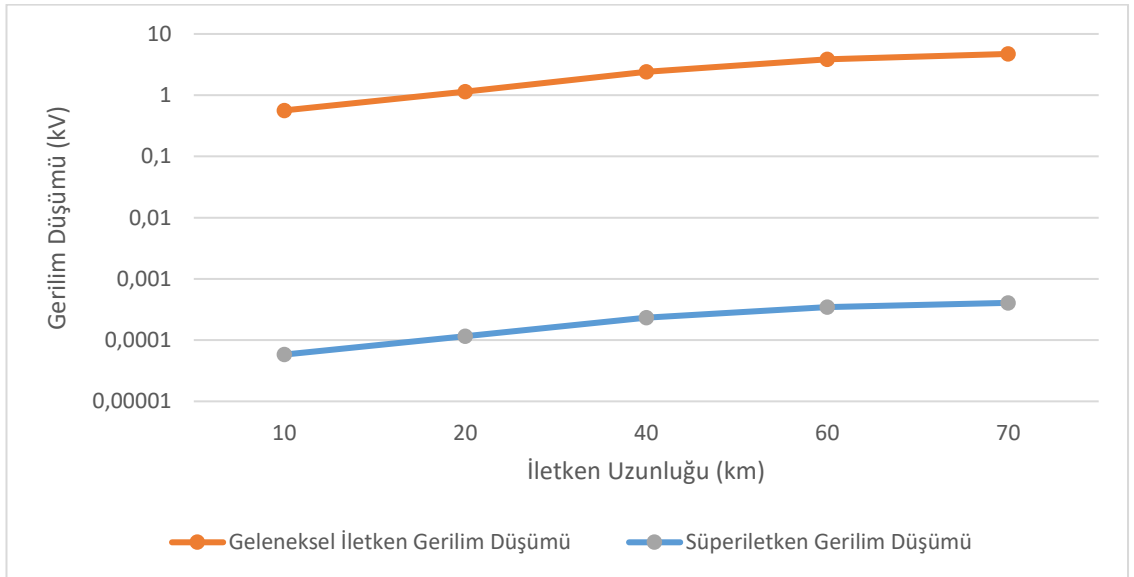
Tablo 12 ve tablo 14’ te geleneksel iletken ve süperiletkenlerin analiz değerleri karşılaştırma yapılarak grafik şeklinde aşağıda verilmiştir.

34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken ve süperiletken hattaki akım kayıpları karşılaştırması yapılmıştır. Süperiletken hattaki akım kayıpları çok düşük olduğundan dolayı analiz sonuçları logaritmik tabanda grafik olarak şekil 60’ da verilmektedir. 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken kullanıldığı durumda hat uzunluğu arttıkça akım kayıplarının arttığı görülmektedir. Fakat süperiletken kullanıldığı durumda ise akım kaybı neredeyse 0 kA’dır.



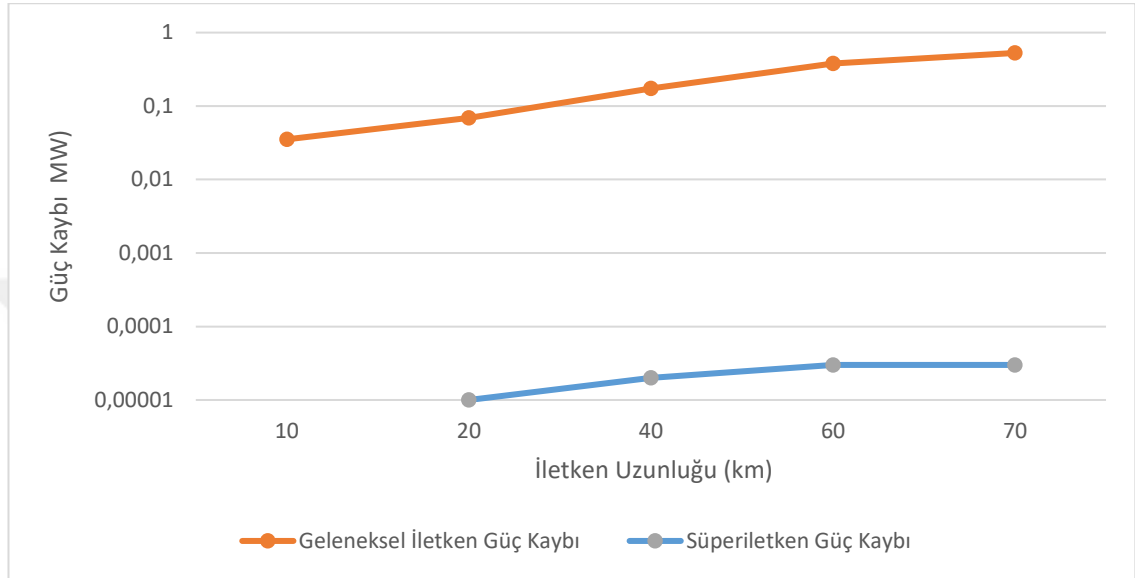
Şekil 60. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre akım kaybı

Şekil 61’ de 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken ve süperiletken hattaki gerilim düşümü karşılaştırması yapılmıştır. Süperiletken hattaki gerilim düşümü çok düşük olduğundan dolayı analiz sonuçları logaritmik tabanda verilmektedir. İki farklı iletken kullanıldığı durumda iletken uzunlukları arttıkça geleneksel iletkenin gerilim düşümü süperiletkene göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



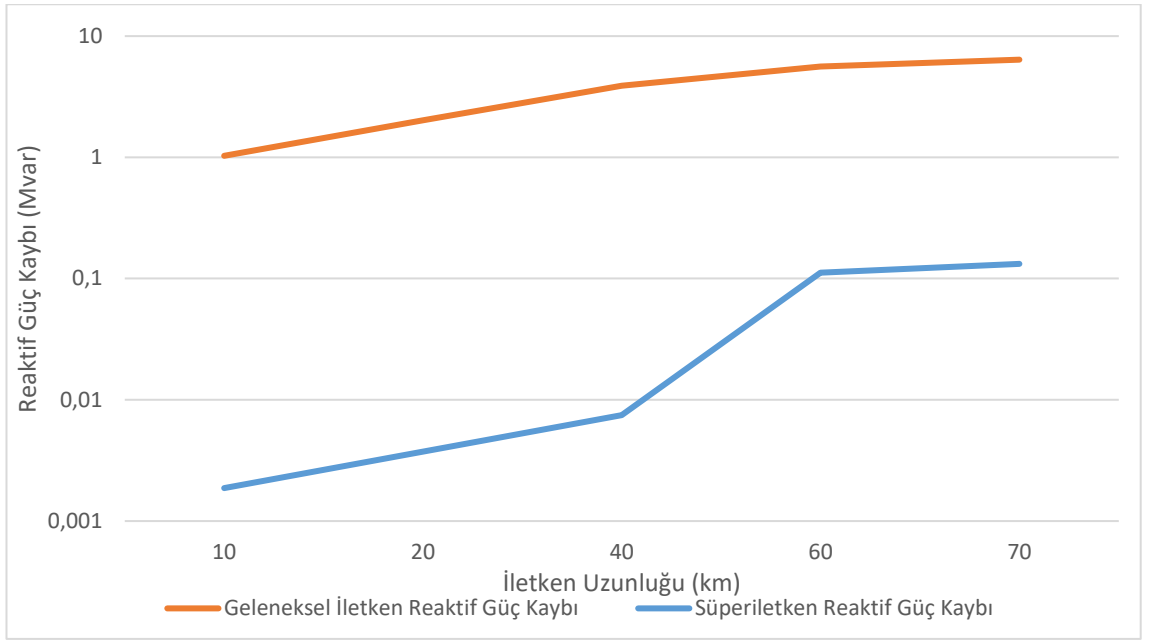
Şekil 61. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre gerilim düşümü

Şekil 62’ de 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken ve süperiletken hattaki güç kayıp karşılaştırması yapılmıştır. Süperiletken hattaki güç kayıpları neredeyse 0 MW olduğundan dolayı analiz sonuçları logaritmik tabanda verilmektedir. Geleneksel iletken güç kayıpları 1 MW değerine yaklaştığı görülmektedir. Fakat süperiletken hatta güç kaybı neredeyse 0 MW’tır.



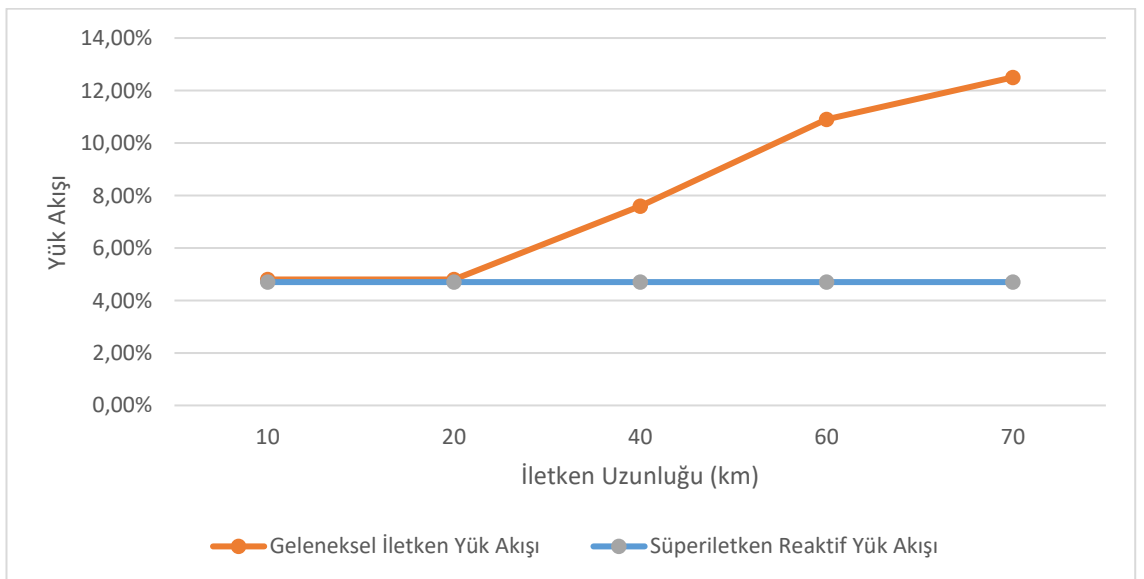
Şekil 62. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre güç kaybı

Şekil 63. 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken ve süperiletken hattaki reaktif güç kayıp karşılaştırması yapılmıştır. Geleneksel iletken kullandığı durumda hat uzunluğu arttıkça reaktif güç kaybı 10 Mvar değerine kadar çıktığı görülmektedir. Fakat süperiletken kullandığı takdirde reaktif güç kayıpları 0 Mvar değerindedir.



Şekil 63. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre reaktif güç kaybı

Şekil 64' te 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken ve süperiletken hattaki yük akış analiz karşılaştırması yapılmıştır. 34.5 kV şebekesinde geleneksel iletken hat kullanıldığı takdirde yük akışı %13 değerine kadar çıktığı görülse de süperiletken kullanıldığı durumda yük akışı sabit olarak devam etmekte ve %5 değerine bile geçmediği gözlemlenmektedir.



Şekil 64. 34.5 kV şebekesinde süperiletken ve geleneksel iletkenin hat uzunluğuna göre yük akışı

6. SONUÇLAR

Süperiletken ve geleneksel iletken hatları arasındaki simülasyon analizleri DigSilent Powerfactory programı ile yapılmıştır. Bu analizleri yaparken iki iletken arasındaki hatta oluşan gerilim düşümü, reaktif güç kaybı, yük analizi, akım kaybı parametreleri gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda ise,

Enerji nakil hattında geleneksel iletken yerine süperiletken kullanıldığında hattaki yük akışı %0.20 değerlerine kadar düştüğü görülmektedir. Geleneksel iletkende ise yük akışı %52.80 değerine kadar çıkmaktadır. Süperiletken hatta iletkenin uzunluğu artış gösterse de yük akışı sabit kalmaktadır. Fakat geleneksel iletken hatta yük akışı sürekli artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı kurulacak bir süperiletken enerji nakil hattında kullanılacak malzemeler daha uzun ömürlü olmasını ve daha verimli çalışmasını sağlayacaktır.

Enerji nakil hattında geleneksel iletken kullanıldığı mesafenin çok fazla olduğu şebekelerde gerilim düşümü 138.348 kV değerine kadar çıkmaktadır. Fakat enerji nakil hattında süperiletken kullanıldığı takdirde gerilim düşümü neredeyse 0 V değerindedir. Bu nedenden dolayı özellikle uzun mesafelerde kurulacak bir süperiletken enerji nakil hattında gerilim düşümleri çok daha az olacak ve son tüketiciye kadar enerji kayıpsız verilecektir.

Enerji nakil hattında geleneksel iletken kullanıldığı takdirde iletken uzunluğu ve şebeke değeri arttıkça güç kayıpları 90.23 MW değerine kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Fakat enerji nakil hattında süperiletken kullanıldığı takdirde güç kayıpları en fazla 0.001 MW olarak gözlemlenmiştir yani neredeyse güç kaybı yaşanmamaktadır. Bu sebepten dolayı kurulacak bir süperiletken enerji nakil hattında güç kayıpları olmayacak ve enerji son tüketiciye kadar kayıpsız verilecektir.

Enerji nakil hattında hat başı ve hat sonunda oluşacak akım kayıpları da bir o kadar önemlidir. Enerji nakil hattında geleneksel iletken kullanıldığı takdirde iletken uzunluğu ve şebeke değeri arttıkça akım kaybı 1.8971 A değerine kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Fakat enerji nakil hattında süperiletken kullanıldığı takdirde akım kaybı en yüksek 0.00275 A olarak görülmektedir. Böylece enerji nakil hatlarında süperiletken kullanıldığında akım kayıpları çok düşük olacaktır.

Enerji nakil hattında geleneksel iletken kullanıldığı takdirde iletken uzunluğu ve şebeke değeri arttıkça reaktif güç kayıpları 526.92 Mvar değerine kadar çıktığı

görülmektedir. Fakat enerji nakit hattında süperiletken kullanıldığı durumda en yüksek 1.862 Mvar değerine çıktığı gözlenmiştir. Böylece enerji nakil hatlarında süperiletken hatlarda istenmeyen fazladan bir yük durumu olmayacaktır.

Geleneksel iletken kullanılan enerji nakil hatlarında şebeke değerine bakılmaksızın kısa mesafelerdeki kayıpları düşüktür. Fakat hatlar arasında mesafeler uzadıkça bu kayıplarda giderek arttığı gözlenmiştir. Ancak süperiletken kullanılan enerji nakil hatlarında mesafeler arttıkça oluşacak kayıplar çok düşük ve de neredeyse sabittir.



KAYNAKÇA

- Akdere, B. (2022). Eritme-Toz-Eritme-Büyütme (Mpmg) Yöntemi Kullanılarak Üretilen Y358 Süperiletkeninde Y2o3 Tabakasının Aktivasyon Enerjisine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Ankara Üniversitesi Süperiletken Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, (2014). Enerji sektörü ve süperiletkenlik uygulamaları. 01.05.2023. tarihinde cesur.ankara.edu.tr/superiletkenlik-hakkinda/superiletkenlikuygulamaları/enerji-sektoru-ve-superiletkenlik-uygulamaları/ adresinden erişildi.
- Arsoy, A. (2013). Dıgsilent Power Factory ile Modelleme ve Analiz Raporu, Kocaeli.
- Çavuş, T. F. ve Terzioğlu, R. (2015). Enerji Verimliliği ve Süperiletken Malzemeler. 6. *Enerji Verimliliği Kalite ve Sempozyumu Sergisi*, Sakarya.
- Düzgün, B. (2018). *Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 Projeksiyonlar Politeknik Dergisi*,21(3),621-632.
- Elsherif, M. A., Zaggout, M. N., ve Yahia, E. Z. (2014). *Applying High-Temperature Superconductor Technologies into Power Systems*. Misurata University, Misurata.
- Erden, G. (1995). *Süperiletkenlik ve Elektrik Mühendisliğindeki Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- EROL, E. (2007). *Türkiye'de Elektrik Enerjisinin Tarihi Gelişimi: 1902-2000*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Schmidt F., Allais, A. (2011). Superconducting Cables For Power Transmission. *Nexans Superconducting Cable System*, 233.
- Lee, G. (2011). Superconductivity Application in Power System, Applications of High-Tc Superconductivity, 978-953.
- Gök, K. (2020). *Süperiletken Dağıtım Şebekesi Parametrelerinin İncelenmesi: Kocaeli Rabak Fider Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Gürbüz, Y. E., Deniz, A., ve Terzioğlu, R. (2021). Rezistif Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılarının MATLAB/SIMULINK'te Modellenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergi*, 173-180.
- ITAP Bilim ve Toplum Merkezi, (2021). Meissener etkisi, 23.06.2023 tarihinde <https://www.itap-btm.org/meissner-etkisi/> adresinden erişildi.
- Jin, J. X., Zhang, J. L., Guo, Y. G., Zhan, Y. D., ve Zhu, J. G. (2007). *Next generation of DC power transmission technology using High Tc superconducting cables*. Curtin University of Technology.
- Kanbur, H. (2015). İkinci Kuşak Giydirilmiş İletkenlerden Dizayn Edilen Çok Tabakalı HTSC Güç İletim Kablolarında Altlık Manyetizmasının AC Kayıplara Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize.
- Kılıç, S. (2008). *Yüksek Geçiş Sıcaklıklı Süperiletkenlerde Kritik Durum Modellerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Adana.
- Körpe, A. (2019). Al-Katkılı Bi-2223 Süperiletken Seramiklere Ait Olan Yapısal, Süperiletkenlik ve Mekanik Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu.
- Lee, C., Son, H., Won Y., Kim, Y., Ryu C., Park, M., and Iwakuma M. (2020). Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPCO in Korea.
- McCall, J. Yuan, D. Folts and N. Henderson. (2013). Hydar fault current limiting HTS cable to be installed in the consolidated edison grid. I nProc.11th EPRI Supercond. Conf.
- MEB, (2020). *Elektrik Tesisat Bilgisi*, Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğü. Ankara,149s.
- Onohaebi, O. S. ve Kuale, P. A. (2007). *Estimation of Technical Losses in the Nigerian 330kv Transmission Network*. International Journal of Electric Engineering, Nigeria.
- Öztürk, K. (2006). Gadolinyum ve İterbiyum Difüzyonunun Yba₂cu₃o₇-X Bileşiğinin Yapısal ve Süperiletkenlik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Stemmle, M., Merschel, F., Noe, M., Hobl, A. (2013). Ampacity project — Worldwide first superconducting cable and fault current limiter installation in a German city center. IET Conference Publications.1-4.
- Sytnikov, V., Bemert, S., Sergey, K., Romashov, M., Ryabin, T. Shakaryan, G., Lobyntsev, V. (2015). Status of HTS cable link project for St. Petersburg Grid. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 25. 1-4. 10.1109/TASC.2014.2373814.
- Terzioğlu, R. (2017). *Merkez İletkeni Bakır Olan Süperiletken CORC Kabloların Alternatif Akım Kayıpları. Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Uyanık, G. (2020). *Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Kayıpların İncelenmesi Kütahya Örneği. Yüksek Lisans Tezi*, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Yamaguchi, S., Koshizuka, H., Hayashi, K., Sawamura, T. (2015). Concept and Design of 500 Meter and 1000 Meter DC Superconducting Power Cables in Ishikari, 28th International Symposium on Superconductivity, Tokyo, Japan, 16–18.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Burak SANLAV, ilk ve orta eğitimini Muğla’ da tamamladı. 2014 yılında Bolu Mustafa Çizmecioğlu Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2014 yılında başladığı Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nü 2018 yılında bitirdi. 2019 yılında başladığı Kastamonu Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenli Ana Bilim Dalı’ndan 2020 yılında mezun oldu.

2017 yılında başladığı Giresun Üniversitesi Elektrik Bölümü’nü 2019 yılında bitirdi. 2018 Temmuz ayı itibari ile Erzurum ilinde Hidroelektrik Santralin de Enerji Sistemleri Mühendisi olarak 2021 Mart ayına kadar devam ettirdi. 2001 Mart ayı ile 2021 Aralık ayı arasında Muğla ilinde B Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı olarak çalıştı. 2021 Aralık ayından bu yana Manisa ilinde İş Sağlığı ve Güvenliği Müdürü olarak çalışmaya devam etmektedir.