

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK ANABİLİM DALI
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**XLPE TİPİ ORTA GERİLİM KABLOLARINDA KAPASİTİF
ETKİNİN İNCELENMESİ**

Salih BİLGİÇ

**Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Cemile BARDAK**



MANİSA-2020

**Salih
Bilgiç**

XLPE TİPİ ORTA GERİLİM KABLOLARINDA KAPASİTİF ETKİNİN İNCELENMESİ

2020

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Salih BİLGİÇ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması.....	4
1.2. Tezin Amacı	9
2. GENEL BİLGİLER	10
2.1. Enerji Kabloları	10
2.2. Kablo ve İletkenlerinin Yapı Elemanları.....	10
2.3 Yalıtkan Cinsleri Özellikleri	11
2.4 Kablolarda Kullanılan Başlıca İletken Türleri	12
2.5 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Yeraltı Kabloları.....	14
2.6 Kabloların Elektroteknik Özellikleri	18
2.6.1. Direnç	18
2.6.2. Endüktans	20
2.6.3. Kapasitans.....	22
2.7. Havai Hatları ile Enerji Taşınması	32
2.7.1. Direkler	32
2.7.2 İzolatörler.....	33
2.7.3 İletkenler	33
2.8. Yeraltı Kabloları ile Enerji Taşınması.....	33
2.9. Reaktif Güç Kompanzasyonu.....	36
2.9.1 Tanımlar.....	37
2.9.1.1 Reaktif Güç	37
2.9.1.2 Reaktif Güç Tüketicileri.....	39
2.9.1.3 Reaktif Güç Üreticileri	39
2.9.2 Düşük Güç Faktörü.....	40
2.9.3 Güç Kompanzasyonunun Sisteme Getirdiği Yararlar	40
2.9.3.1 Sistem Kapasitesinin Arttırılması.....	40
2.9.3.2 Sistem Kayıplarının Azaltılması	41
2.9.3.3 Gerilim Düşümünün Sağlanması	43
2.9.4 Sistemin Reaktif Enerji Gereksinimleri.....	44
2.9.5 Kompanzasyon Kurulacak Noktalar.....	46
2.9.6.Birli (Tekil) Kompanzasyon	48
2.9.7.Toplu Kompanzasyon.....	48
2.9.8.Ortak Kompanzasyon	49
2.9.9.Karma Kompanzasyon.....	50
2.9.10.Kompanzasyon Yöntemleri	50
2.9.10.1. Dinamik Kompanzasyon	50
2.9.10.2.Statik Var Kompanzasyon.....	50
2.9.11. Orta Gerilim Kompanzasyon Sistemi.....	53
2.10 Şönt Reaktörler.....	54
2.10.1. Şönt Reaktörleri Yapısı.....	54

2.10.1.1 Şönt Reaktör Nüve Bacak Aralıkları.....	56
2.10.1.2. Şönt Reaktörlerin Anahtarlanması	56
2.10.1.3. Şönt Reaktörün Şebekeden Ayrılması.....	57
2.10.1.4. Baskın Harmonikler	57
2.10.1.5. Histeresiz.....	57
2.10.1.6. Şönt Reaktörün Kayıpları.....	57
2.10.2. Şönt Reaktör Uygulamaları	58
2.10.2.1 Hatta veya Baraya Bağlanan Reaktörler	58
2.10.2.2 Tersiyer Sargısına Bağlanan Reaktörler.....	58
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	59
3.1. Taşıma Hatlarının Modellenerek Analizi	59
3.2. PSCAD / EMTDC Programı ile Kablo Hat Sabitlerinin Hesaplanması .	60
3.3. PSCAD / EMTDC Programı ile Hat Analizi.....	63
3.3.1. Toplu Parametrelili Kablo Modeli	63
3.3.2. Dağınık Parametrelili Kablo Modeli.....	63
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	65
4.1. İşletme Gerilimi 34,5 kV ve Kurulu Gücü 10 MVA Olan Orta Gerilim Dağıtım Şebekesinin İncelenmesi	65
4.2. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
5.1. Sonuç	83
5.2. Öneriler.....	85
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

α_{20}	Isı katsayısı 20°C’de (1/°C)
c	Işık hızı ($2,9978.10^8$) (m/s)
C	Kapasitans ($\mu\text{F/km}$)
$\text{Cos}\theta_1$	Kompanzasyon öncesi güç katsayısı
$\text{Cos}\theta_2$	Kompanzasyon sonrası güç katsayısı
d_m	Geometrik ortalama mesafe (cm)
d	İletkenler arası açıklık (cm)
d_1	Yük ile nokta arası uzaklık (m)
D	Elektriksel akı yoğunluğu (C/m^2)
E	Elektrik alan şiddeti (V/m)
ΔP_1	Kompanzasyon öncesi etkin güç (W)
ΔP_2	Kompanzasyon sonrası etkin güç (W)
ΔQ_1	Kompanzasyon öncesi reaktif güç (Var)
ΔQ_2	Kompanzasyon sonrası reaktif güç (Var)
Δt	Sıcaklık farkı (°C)
ϵ_0	Hava veya boşluğun dielektrik sabitesi (F/m)
ϵ_r	Kablo izolasyonuna ait dielektrik sabite (F/m)
ϵ_a	Elektrik alanı ortamın mutlak dielektrik sabiti (F/m)
F	Frekans (Hz)
f	Frekans (Hz)
G	İletim hattının birim uzunluğu kondüktans değeri (S/km)
I	Hat akımı (A)
I_p	Aktif Akım (A)
I_q	Reaktif Akım (A)
I_c	Reaktif Akım (A)
I_1	Kompanzasyon öncesi hat akımı(A)
I_2	Kompanzasyon sonrası hat akımı(A)
γ	Dağıtım hattının yayılma sabiti
l	Hattın-İletenin boyu (m)
L	Endüktans (henry / km)
k	Deri düzeltme faktörü

P	Aktif Güç (watt)
q	Elektrik yükü (Coulomb)
Q	Reaktif güç (Var)
Q_C	Reaktif güç (Var)
Q_{CT}	Hattın toplam reaktif güü (Var)
r	Yarıçap (cm)
r_x	XLPE kablo iletkeni yarıçapı (mm)
r₂	XLPE kablo izolasyon yarıçapı (mm)
r₁	Pozitif elektrik yükünün yarıçapı (m)
R_{DC}	XLPE kablo DC direnci (ohm)
R_{AC}	AC direnci (ohm)
R₂₀	20°C sıcaklıktaki direnç (ohm)
R₉₀	90°C sıcaklıktaki direnç (ohm)
R₁	Elektrik yükünün herhangi bir noktaya olan yarıçapı (m)
ρ	İletkenin öz direnci ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}.$)
s	Kesit (mm^2)
S	Görünür güç (VA)
S₁	Kompanzasyon öncesi görünür güç (VA)
S₂	Kompanzasyon sonrası görünür güç (VA)
t	V-I faz farkı (ms)
T	Periyot (ms)
θ	Faz aç değeri (°)
θ₁	Yük-şönt reaktör devrede değilken faz aç değeri (°)
θ₂	Yük-şönt reaktör devrede değilken faz aç değeri (°)
U	Hat gerilimi (V)
V	Gerilim (V)
V₁₁	Potansiyel Fark (V)
V₂₁	Potansiyel Fark (V)
x	Yarıçap (cm)
X	Reaktans (ohm)
X_c	Reaktans (ohm)
X_L	Endüktif reaktans (Ohm)
Y	Hattının bir km. uzunluğundaki admintansı (siemens/m)
Y_{in}	Hattın giriş admintansı (Siemens/m)

Y₀	Hattın doğal admintansı (Siemens)
Y_L	Yük admintansı (Siemens)
%i	Hat akımında yüzde artış değeri
%s	Görünür güç yüzde artış değeri
%p	Etkin güç yüzde artış değeri
%q	Reaktif güç yüzde artış değeri
Z	Hattının bir km. uzunluğundaki empedansı (Ω/m)

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
EMK	Endüksiyon Elektromotor Kuvvet
FLUKS	Akı
FDPM	Frekans Bağımlı Faz Modeli
HDPE	Alçak Basınç Tekniği ile Alçak Yoğunluk Polietileni
LDPE	Yüksek Basınç Tekniği ile Alçak Yoğunluk Polietileni
M.K.S.	Birim Sistemi veya Teknik Ölçü Sistemi
OG	Orta Gerilim
PE	Polietilen
PVC	Polivinil Klorür
SVC	Statik Var Kompanzatör
STATCOM	Statik Senkron Kompansatör
TCR	Tristör Kontrollü Reaktör
TSC	Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
VDE	Alman Standartları
XLPE	Çapraz bağlı polietilen
XL	Endüktif Reaktans
YG	Yüksek Gerilim

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Yeraltı kablo yapısı ve temel bileşenler	10
Şekil 2.2. XLPE kablo yapısı ve temel bileşenleri	15
Şekil 2.3. Tek damarlı kablolarda indüktans değeri	20
Şekil 2.4. Tek damarlı kablolarda kapasite	23
Şekil 2.5. Pozitif bir elektrik yükünden etrafa yayılan elektriksel akı hatları	25
Şekil 2.6. Düzgün dağıtılmış vaziyette pozitif yüke sahip daire kesitli bir iletkenin etrafındaki elektrik alanında iki nokta arasındaki entegral mesafesi	26
Şekil 2.7. Komşu ve paralel iki iletkenin eşpotansiyel yüzeylerin yaklaşık durumu	27
Şekil 2.8. Endüktif bir tüketicinin akım ve güç bileşenleri	38
Şekil 2.9. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisi	44
Şekil 2.10. İletim hattının hat sabitleri ile ifade edilmesi	45
Şekil 2.11. Kompanzasyon yapılmayan sistemler	46
Şekil 2.12. Jeneratörün A barasına kompanzasyon yapılan sistemler	46
Şekil 2.13. Transformatörün B barasına kompanzasyon yapılan sistemler	47
Şekil 2.14. Transformatörün C barasına kompanzasyon yapılan sistemler	47
Şekil 2.15. Motor uçlarının bağlı olduğu noktaya kompanzasyon yapılan sistemler	47
Şekil 2.16. TCR tristör kontrollü reaktör	51
Şekil 2.17. TSC tristör anahtarlama kondansatör	51
Şekil 2.18. TSC tristör anahtarlama kondansatör (karma sistemler)	53
Şekil 3.1. Nominal T modeli	59
Şekil 3.2. Nominal Pi modeli	59
Şekil 3.3. Yeraltı kablosu enine kesiti	61
Şekil 3.4. PSCAD/EMTDC kablo sabitleri hesaplama alt programı	62
Şekil 4.1. Ring şebeke tek hattı	65
Şekil 4.2. Reaktör panosu ve sayaç bağlantı şeması	67
Şekil 4.3. Reaktör reaktör panosu	70
Şekil 4.4. Reaktör panosu bağlantı şeması	70
Şekil 4.5. Analizör ölçüm sonuçları	71
Şekil 4.6. PSCAD programı XLPE yeraltı kablosu simülasyon çalışması	73
Şekil 4.7. Kaynak –hat sonu-yük üç faz toplam aktif ve reaktif güç grafiği	75
Şekil 4.8. Kaynak tarafındaki üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (Şönt reaktör devrede)	76
Şekil 4.9. Hat sonu üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (şönt reaktör devrede)	76
Şekil 4.10. Yük tarafı üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (şönt reaktör devrede)	77
Şekil 4.11. Şönt reaktör tarafı üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (şönt reaktör devrede)	77
Şekil 4.12. Kaynaktan çekilen faz akımlarının RMS değişim grafiği	79
Şekil 4.13. Kaynaktan çekilen S fazına ait akım ve gerilimin değişimi (Yük devrede değilken)	80
Şekil 4.14. Kaynaktan çekilen S fazına ait akım ve gerilimin değişimi (Yük ve reaktör devrede)	81

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. XLPE ve PVC kabloların karşılaştırılması	15
Tablo 2.2. Kabloların 20 °C'deki dirençleri	19
Tablo 2.3. PVC izoleli kablolarda XL değerleri	21
Tablo 2.4. XLPE izoleli kabloların endüktif reaktansları (XL)	22
Tablo 3.1 XLPE tipi kablo katalog değerleri	61
Tablo 3.2 Hat sabitleri karşılaştırma tablosu.....	63
Tablo 4.1 XLPE tipi kablo katalog değerleri	68
Tablo 4.2. Sayaç ölçüm sonuçları	71
Tablo 4.3. Reaktif güç sonuçlarının karşılaştırılması	80
Tablo 4.4. V-I periyot ölçüm sonuçları	81



TEŞEKKÜR

Lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum danışman hocam Sayın Dr.Öğr. Üyesi Cemile BARDAK' a, değerli fikir ve önerileriyle her daim desteğini yanımda hissettiğim çok değerli hocam Prof.Dr. Nevzat ONAT'a, çalışmalarım sırasında manevi desteğini her zaman hissettiğim kardeşim Fatih ÖZLÜ' ye, öğrenim hayatım boyunca onlara ayırmam gereken zamandan feragat ederek beni destekleyen ve hep yanımda olan çok değerli eşim Ümmühan BİLGİÇ ve güzel kızım Beren BİLGİÇ' e yürekten teşekkür ederim.

Salih BİLGİÇ
Manisa, 2020



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

XLPE TİPİ ORTA GERİLİM KABLOLARINDA KAPASİTİF ETKİNİN İNCELENMESİ

Salih BİLGİÇ

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Cemile BARDAK

Elektrik enerjisi oldukça maliyetli bir enerji kaynağı olmasına rağmen diğer enerji şekilleri ile mukayese edildiği zaman; üretim, iletim, dağıtım ve kullanım alanlarındaki teknik üstünlüklerinden dolayı en çok tercih edilen enerji şeklidir. Bu nedenle minimum maliyetle üretimi ve maksimum tasarruf yapılarak, kayıpların en aza indirilmesi gerekmektedir. Dünya nüfusunun sürekli olarak artması ve teknolojiye gelişmeler, talep edilen güç miktarını her geçen gün daha da arttırmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacını karşılamak için üretimin arttırılmasının yanında, üretilmiş olan mevcut enerjinin de en yüksek verimle kullanılması gerekmektedir. Verimin yüksek tutulması için, elektrik enerjisinin üretiminden son kullanıcıya kadar kayıpsız bir şekilde iletilmesi gerekmektedir. Bunun içinde üretilen elektrik enerjisinin, kaynağından çıkarak iletilmesi ve dağıtılmasında, akım ve gerilimin, tam sinüs eğrisi şeklinde son alıcıya ulaştırılması gerekmektedir. Bu durum elektrik enerjisinin kalitesini gösteren faktörlerin başında gelmektedir.

Bu tez çalışmasında, orta gerilim dağıtım sistemlerinde kullanılan XLPE tipi yer altı güç kablolarının meydana getirdiği reaktif (kapasitif) etkisi incelenmiştir. Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılan XLPE tipi kablolar yapısından dolayı, kondansatöre benzetilmektedir. Kondansatörler iki iletken levha arasına yerleştirilen yalıtkan bir malzemeden oluşur. Bu nedenle reaktif bir etki (kapasitif etki) oluşturmaktadır. Oluşan bu reaktif etki, hem kayıpların artmasına, kapasitenin azalmasına, hem de maliyetlerin oldukça yükselmesine neden olur. Bu olumsuz etkiyi gidermenin en kullanışlı yolu kompanze etmektir. Bu amaçla teknolojik gelişmelere bağlı olarak geliştirilen yöntemlerin yapısı incelenmiştir. Orta gerilim dağıtım sistemlerinde ve alçak gerilim sistemlerinde kullanılan kompanzasyon uygulamaları incelenmiştir.

Tez çalışmanın son bölümünde XLPE tipi yeraltı kablosu kullanılarak tesis edilmiş yaklaşık 5500 m uzunluğundaki OG dağıtım şebekesinin alınan ölçümler ile analizi yapılmıştır. Analizi yapılan dağıtım şebekesinin verileri ve PSCAD / EMTDC programı kullanılarak XLPE kablunun modellenmesi yapılarak, simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında alınan sonuçlar ile analizi yapılan dağıtım şebekesinin sonuçları karşılaştırılmış ve analiz sonuçları doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: XLPE tipi kablolar, Kompanzasyon, Kapasitif Etki,
2020, 90 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF CAPACITIVE EFFECT ON XLPE TYPE MEDIUM VOLTAGE CABLES

Salih BİLGİÇ

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cemile BARDAK

Electrical energy is the most widely used form of energy due to its technical superiority in the areas of production, transmission, distribution, and using, although its a very costly energy source. Therefore, it should be produced with minimum cost and maximum savings, and losses should be minimized. Further, rapid population growth and technological advances increase the amount of power demanded. To meet this increasing energy demand, besides increasing production, it should be used with the highest efficiency in the existing energy produced. For this reason, this valuable energy source is conveyed in a lossless manner from its production to its end-user. In the transmission and distribution of the electrical energy generated, its current and voltage must be delivered to the final receiver in the form of a full sine curve, which is one of the main factors that indicate the quality of electrical energy.

In this thesis, the capacitive (reactive) effect of XLPE type power cables used in medium voltage distribution systems has been investigated. XLPE type cables used in electrical transmission and distribution systems cause a reactive effect because the structure of these cables is similar to capacitors that consist of an insulating material placed between two conductive plates. If this reactive effect is not eliminated, it considerably causes increment on losses and costs, and decrement on the capacity. The most useful way to eliminate this negative effect is to utilize the compensation technique. For this reason, the structure of shunt reactors, which is one of the methods developed depending on technological improvements, is examined. Moreover, compensation applications used in medium voltage distribution and low voltage systems are examined.

In the last part of the thesis, the medium voltage distribution network, which is approximately 5500 m long, was analyzed with the measurements. The simulation was performed by modeling XLPE cable by using data from the distribution network and the PSCAD / EMTDC program. The results of the simulation and the distribution network were compared to verify the validity of the analysis.

Keywords: XLPE type cables, Compensation, Capacitive Effect

2020, 90 pages

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, diğer enerji şekilleri ile mukayese edildiği zaman; üretim, iletim, dağıtım ve kullanma alanlarındaki teknik ve ekonomik üstünlüklerinden dolayı en çok tercih edilen enerji şeklidir. Elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç günden güne daha da artmakta, başka bir deyimle, elektrik enerjisi her geçen gün yeni alanlarda kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi doğada başka şekillerde bulunan diğer enerji kaynaklarını, en önemlisi mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine çevirmek suretiyle üretilmektedir. Üretilen elektrik enerjisi taşındığı yerde ısı, ışık, kimyasal veya mekanik enerjiye tekrar çevrilerek en faydalı şekilde kullanılmaktadır. Enerjinin elektrikle iletilmesi amacıyla bir şekilden öteki şekle iki defa çevrilmesinin ekonomik açıdan uygun görülebilmesi, ancak enerji çevrilmesinin yüksek verimle yapılabilmesi ile mümkündür. Enerji iletilmesinin kendisinin de ekonomik ve teknik bakımdan kolay olmalı ve aynı zamanda basit, kesin ve güvenilir bir şekilde kontrol edilebilmelidir. Elektrikle enerji iletilmesi bahsedilen tüm şartları yeterince yerine getirilebildiği için, günümüzde büyük önem kazanmıştır [1].

Bunula beraber son yıllarda tüm dünyadaki teknolojik gelişmelere paralel olarak elektrik enerjisi alanında da (ulaşım sektörü, otomasyon sistemleri vb.), bu gelişim kendisini çok hızlı bir şekilde göstermektedir. Ayrıca aşırı nüfus artışı nedeniyle, üretilen elektrik enerji kapasitesinin sürekli arttırılarak artan talepleri karşılamasını zorunlu kılmıştır. Özellikle yeni tip teknolojik savaşların başlamasıyla, ülkeler birbirlerine üstünlük kurmak amacıyla enerji alanında çalışmalara önem vermişlerdir. Buna paralel olarak tüm dünyadaki elektrik enerjisine olan ihtiyaç miktarı her yıl %10 oranında artış göstermektedir [2].

Teknolojinin hızla gelişmesi ile elektrik enerjisi ihtiyaçları her geçen gün artmış ve bunun sonucunda söz konusu ihtiyaçları karşılamak için hem kapasitelerin arttırılması hem de güç ile birlikte gerilimlerinde yükseltilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Tüm bu gelişmelere paralel olarak, artan ihtiyacın tedarik edilebilmesi için elektrik üretim tesislerinin arttırılması gerekmiştir. Sistemin büyümesi ve gelişmesi ile enerji üretiminden, iletimine ve dağıtımına kadar hepsi ayrı ayrı birer mühendislik dalına dönüşmüştür.

Ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösteren parametreler arasında bulunan elektrik enerjisi ayrıca ülkelerin sosyo-ekonomik gelişmesinde de büyük etkilere sahiptir. Ülkelerin ekonomik gelişmesi ve ilerlemesinde büyük öneme sahip olan bu güç, ne kadar çok gelişir, daha çok kişiye ulaşırsa, kullanımında o derece artacak ve ülkelerin kalkınmasında o kadar başarıya ulaşılmış olacaktır. Elektrik enerji sistemlerinde transformatörün bulunması büyük bir dönüm noktasıdır. Transformatörün bulunması ile enerjinin daha uzak mesafelere iletimi ve dağıtımı çok daha kolaylaşmış ve bu açıdan çok büyük bir adım atılmıştır. Bunun sonucu olarak elektrik enerjisi daha çok kullanılır duruma gelmiştir.

Elektrik enerji kuruldukları alanın özelliğine göre farklı şekillerde çalışan santrallerde üretilmektedir. Ayrıca son kullanıcılara yakın alanlara kurulamayıp genellikle tüketim noktalarından uzakta kurulmaktadır. Bunun nedenleri arasında hammaddeye ulaşım zorluğu, çevresel faktörler, iletim ve dağıtım zorlukları gibi belli başlı nedenler gösterilebilir. Bunun en güzel örneği ülkemizde yaşanmaktadır. Ülkemizde sanayi ve nüfus olarak yerleşim merkezlerinin büyük çoğunluğu batı bölgelerimizde yer alırken, coğrafi konumu ve doğal özelliklerinden dolayı ülkemizin büyük oranda güç ihtiyacını karşılayan enerji santralleri doğu bölgelerimizde bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak üretilen bu enerjinin batı bölgelere, enerji tüketiminin fazla olduğu şehirlere, uzun iletim ve dağıtım hatları ile iletilmesi gereklidir. Bu nedenle ülkemiz açısından da elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımının ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

Elektrik iletim hattı; elektrik santralinde üretilen elektrik enerjisinin, üretim santrallerinden dağıtım merkezlerine iletilmesini sağlayan hatlardır. Elektrik hatlarının oluşturulmasında üretim maliyetleri, iletilmesi ve dağıtılması için doğru güzergâh seçimi, canlılar açısından emniyet faktörleri gibi birçok açıdan değerlendirme yapılmaktadır. Bu faktörlerin her açıdan değerlendirilmesi ile ekonomik açıdan en düşük maliyet ve üretilen enerjinin çok düşük kayıplarla son kullanıcıya iletilmesi son derece önemlidir.

Elektrik enerjisinin ilk zamanlarda havai hatlar ile dağıtılmasının aksine günümüzde özellikle yerleşim yerlerinde yer altı kabloları ile dağıtılmaktadır. Havai hatlar ile karşılaştırıldıklarında yeraltı iletim hatlarının dezavantajlarının yanında avantajları da oldukça fazladır. İlk kurulum maliyetleri yüksek olmasına rağmen

yeraltında tesis edildiğinden görsel açıdan sorun oluşturmaz, doğa olaylarından etkilenmez ve emniyet açısından da daha güvenlidir. Ayrıca havai hatlar gibi tesis edilirken ek donanım ihtiyacı bulunmamaktadır. Havai hatlara göre daha uzun ömürlüdür. Yapısal özellikleri nedeniyle mekanik, kimyasal etkenlere karşı çok daha dayanıklıdır [3].

Hemen hemen tüm alanlarda ihtiyacın ve kullanım oranını arttıran elektrik enerjisinin üretim maliyetlerinin artması nedeniyle, iletilen ve dağıtılan enerjinin kayıp oranını düşürmek için yapılan çalışmaları zorunlu hale getirmiştir. Üretim noktalarında üretilen elektrik enerjisi hem aktif hem de reaktif akım şeklinde son kullanıcıya kadar birlikte iletilmektedir. Genellikle şebeke içinde bir katkısı bulunmayan, çeşitli nedenlerle ortaya çıkan reaktif akım, iletim ve dağıtım sisteminin tüm elemanlarına etki ederek kayıplara neden olmakta ve sisteme ekstra yük getirmektedir [4].

Toplam akımın bir bileşkesi olan reaktif akımın santralden alıcıya kadar iletilmesi, sistemin çalışmasına olumlu yönde bir etkisinin bulunmaması nedeniyle büyük ekonomik kayıp olarak görülmektedir. Reaktif akım yok edilirse transformatörlerin kapasiteleri artacak, koruma elemanı olan şalterler ve sigortaların değerleri büyük seçilmek zorunda kalınmayacak, sistemde kullanılan kablo kesitleri küçülecektir. Bunun sonucu olarak yatırım maliyetleri düşecek ve aynı çalışma sistemi ile daha fazla elektrik enerjisi kullanıcılara ulaştırılacaktır. Ayrıca dağıtım şirketleri ile yönetmeliklerin müsaade etmiş olduğu sınırlar içerisinde kalınacağından, kullanıcılarında elektrik enerjisi ödemeleri daha az olacaktır.

Tesiste harcanan reaktif enerjinin azaltılması amacı ile yapılan işlemlere kısaca kompanzasyon denmektedir. Tüketiciler tarafından talep edilen enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için enerji üretiminin artırılması ve üretilmiş olan enerjinin de çok düşük kayıplar ile taşınarak iletilmesi gerekmektedir. Üretilen elektrik enerjisinin minimum kayıp ve maksimum verim ile son alıcıya iletilmesinin tercih edilen ve kullanılan metotlardan bir tanesi de reaktif güç kompanzasyonudur [5].

Kompanzasyon tekniklerinin doğru bir şekilde uygulanması santraller, iletim ve dağıtım hatları ve diğer enerji merkezlerinin verimliliklerinde yükselme meydana getirecektir. Buna karşılık reaktif güç kompanzasyonu bazı dezavantajları da

beraberinde getirmektedir. Bunlardan en önemlisi harmoniklerdir. Reaktif enerjinin olumsuz etkilerinden kurtulmak amacıyla alçak gerilim tarafında yapılan kompanzasyon, güç katsayısının istenilen seviyeye getirilmesine yeterli olmamaktadır. OG şebekelerinde kullanılan XLPE kabloların meydana getirdiği kapasitif etkiden dolayı OG şebekelerinde reaktif enerjinin etkilerini yok etmek de son derece önemlidir.

Bu kapsamda literatürde XLPE kablonun yapısının farklı açılardan incelenmesi yönelik ve enerji kalitesinin artırılması için yapılan reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1.1. Literatür Taraması

De Silva ve ark. (2016) çalışmasında PSCAD/EMTDC programı ile yeraltı kabloları ve iletim hatlarının modellemelerini gerçekleştirmiştir. Modelleme için Bergeron ve Frekans bağımlı olmak üzere iki model kullanmıştır. Bergeron modeli sadece temel frekansı doğru bir şekilde temsil eder. Bu model, temel frekans yük akışının en önemli olduğu çalışmaları için uygundur (röle çalışmaları, yük akışı, vb.). Frekans Bağımlı modeller ise Bergeron modeli gibi yürüyen dalga modelleridir. Bergeron modelinden farklı olarak hat direnci, hat uzunluğu boyunca endüktans ve kapasitans ile birlikte dağıtılır. Frekans bağımlı modeller hat analizlerinde daha geniş frekans aralıklarında modelleme yapmak için kullanılır [6].

2017 yılında yapılan bir çalışmada, orta gerilim AC kablolarını modüler çok seviyeli dönüştürücülerle DC bağlantılı olarak çalıştırmış, şebeke kapasitesi ve verimlilik artışı konusunda bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda AC için DC koşullarında çalışacak şekilde tasarlanan XLPE yenileme kablolarının teknik etkileri, dayatılan elektrik alanları, termal profil ve kullanım ömrü açısından ele alınmıştır [7]. Matilde ve Miguel tarafından yapılan çalışmada, yüksek gerilimli yeraltı kablolarının modellenmesinde uyarılmış etkileri de dikkate alarak çoklu bağlantı devrelerin otomatik olarak oluşturulmasına ve kılıfların bağlantısından ve kablolar arasındaki mesafenin neden olduğu endüktif etkilerin hesaplanmasına olanak sağlayan sezgisel bir yaklaşım öne sürülmüştür [8]. XLPE kablolarıyla yapılan diğer bir çalışmada, 320 kV DC kablonun termal alan dağılımını modellemek için modifiye edilmiş bir 2D modeli oluşturulmuştur ve buna dayanarak, XLPE yalıtımındaki

elektrik alan dağılımı, alan yükü etkisi dikkate alınmadan sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir [9].

Çevresel metal tesisatların uygulanan çapraz bağlamalı yüksek gerilim (HV) kablo hatlarının güç aktarım kapasitesi üzerindeki endüktif etkisi üzerinde yapılan bir çalışmada, nicel bir analiz yöntemi geliştirilmiş ve çapraz bağlamalı HV kablo hatlarının güç aktarım kapasitesinin genişletilmesi incelenmiştir. Burada temel sorun, çevreleyen metal tesisatların çoğunun zeminin yüzeyinde yer alması ve görsel olarak belirlenememesi veya doğrulanamaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır [10]. Genel olarak, optimize edilmiş reaktif güç konumunun, bileşen yükünü ve güç kayıplarını azaltabileceği bilinmektedir. Bu alanda yapılan diğer bir çalışmada HV-DC bağlantılı rüzgâr güç tesislerinde alansal güç tahsisi optimizasyonu üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Önerilen yöntem ile voltaj profilinin iyileştirilmesinin yanı sıra geleneksel reaktif güç dağıtma stratejilerine kıyasla kayıpların etkili bir şekilde azaltılmasına çalışılmıştır [11].

XLPE kablolarıyla yapılan çalışmaların önemli bir kısmını da kablolarda meydana gelen kısmi deşarjlar [12] ve su ağacı [13]–[22] gibi kabloların yıpranmasıyla ortaya çıkan olumsuz etkiler ve bu etkilerin ortadan kaldırılması için geliştirilen yöntemler oluşturmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada, uzun mesafeli bir kablo hattında kısmi deşarjı (PD) ölçmek için koruyucu katman ile ek bir alüminyum folyo arasında bir kapasitif bağlantı elektrotu kullanılabileceği önerilmektedir [12]. Polimerik yalıtımlı güç kabloları elektrik sistemlerinde güç iletimi ve dağıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür kabloların performans değerlendirmesi için kapsamlı yüksek gerilim ve kalite kontrol testleri yapılmaktadır. Bu tür testler sırasında kablo uçları, uygun bir sonlandırma yapmak için dikkatle hazırlanmalıdır [23].

Hoogendorp G. (2016) 380 kV değerindeki iletim şebekelerinde yeraltı kablolarının kararlı durumu ve geçici davranış analizlerine yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Araştırmasını şebekenin kararlı durum davranışı ve geçici durum davranışı olmak üzere iki bölüme ayırmıştır. Kararlı durum davranışı esas olarak yeraltı kablolarının kullanıldığı şebekelerdeki güç akışlarının ve voltaj seviyelerinin gözlenmesi ile ilgilidir. Kablo kapasitansı, kompanze edilmesi gerekecek seviyede reaktif güç ürettiğinden ve şönt reaktörlerin şebekedeki güç akışlarını etkileyecek

şekilde takılması gerektiğinden önemlidir. Bu çalışmada, geçici aşırı gerilimlerin şiddeti, anahtarlama eylemleri ve yıldırım akımları sırasında 380 kV gerilim seviyelerindeki karma iletim şebekesinde meydana gelen aşırı tepe gerilimleri gözlemlenerek araştırılmıştır. Yeraltı kablosu ve havai hat bölümünü modellemek için, kablo ve hat parametrelerinin frekans bağımlılığını dikkate alan bir iletim hattı modeli olan ve yaygın olarak kullanılan FDPM kullanılmıştır. Saha ölçümleri hem 380 kV XLPE kablo hem de havai hat bölümleri için yapılmış ve sonuçlar geçici kablo modeli doğrulaması için kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada geçici kablo modelleme çalışmaları için bir başlangıç noktası olması amacıyla, karşılıklı kablo empedansları ve ekran iletkeninin çapraz bağlanması gibi kablo modelleme konuları tartışılmıştır. Saha ölçümleri, gerçek XLPE 380 kV kablo sisteminde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar, uygulanan 380 kV yeraltı kablo bölümleri ve havai hat bölümleri için uygulanan Frekans Bağımlı Faz Modelinin geçerliliğini doğrulamıştır. Ölçülen ve simüle edilen sonuçlar arasında küçük sapmalar olmasına rağmen, simüle edilen sonuçların ölçülen sonuçlarla oldukça iyi eşleştiği gösterilmiştir. Bu, kullanılan mevcut kablo modelinin, gelecekteki benzer karma hat kablosu projelerinde geçici olayları incelemek için kullanılabileceği anlamına gelir. Çalışmanın amacı olan incelenen kararlı durum ve geçici durumlar sırasında dikkate değer bir aşırı gerilim meydana gelmediği sonucuna varılmıştır [24].

Anadol ve ark. (2012) çalışmalarında labaratuvar ortamında yeraltı kablo modelinin tasarımını ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Geliştirelen fiziksel yeraltı modelinin analizi deney ve simülasyon çalışmaları ile de doğrulanmıştır. Çalışma da yüksek gerilimde kullanılan 400 kV, 2000 mm² kesitindeki XLPE tipi yeraltı kablosunun modellemesi yapılmış ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yeraltı kablosundan kaynaklanan kapasitif etkiyi gidermek için hattın sonuna paralel bağlı 12 kademeli darbeli bir STATCOM ile tesis edilmiştir. Klasik kompanzasyon metodları ile gerçekleştirilen reaktif güç kompanzasyonunda, kademelerin devreye giriş çıkışlarında aşırı akım yükselmeleri oluşabilmektedir. Bu durum XLPE kabloların ısınmasına ve izolasyonlarının zarar görerek kablo arızalarına neden olabilmektedir. STATCOM ile yapılan reaktif güç kontrolünde ise aşırı akım yükselmelerinin oluşmadığı deney ve simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır. Ayrıca tasarımı gerçekleştirilen fiziksel kablomodeli ile karma güç sistemlerinde, hem havai hatlar

hemde yeraltı hatlarından oluşan sistemler, gerçekleşen olayların incelenebilmesine de imkân sağlayacaktır [25].

Sürmeli Y. (2014) Marmaray metro istasyonu endüktif/kapasitif kompanzasyon sistemi çalışmasında, proje kapsamında tesis edilen XLPE tipi yeraltı kablosunun uzunluğundan dolayı meydana gelen kapasitif etkiyi ve bu etkiyi gidermek için kurulan hem endüktif hemde kapasitif kompanzasyon yapabilen kompanzasyon sistemini incelemiştir. Özellikle geceleri tren seferleri azalmakta ve belli bir saatten sonra tamamen sonlandırılmaktadır. Bu nedenle enerji tüketimi azalması ile XLPE kablosunun uzunluğundan dolayı ortaya çıkan kapasitif yükün kompanze edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda her istasyona kapasitif/endüktif özellikte kompanzasyon sistemi tesis edilmiştir. Endüktif kompanzasyon yapılırken XLPE kablo kapasitif etkiside dikkate alınarak kompanzasyon yapılmıştır. Tesis edilen kompanzasyon sistemi referans değerlerini OG'den alması sağlanarak kablo üzerinde indüklenen kapasitif etki giderilmiştir [26].

Angay M. (2019) çalışmasında dağıtım şebekelerinde kullanılan yeraltı kablolarının kapasitif etkisi üzerinde çalışmıştır. Dağıtım şebekesinde tüm tesislerin kullanıldığı dönemlerde sistemin belirlenen reaktif oranı aştığı gözlemlenmiştir. Dağıtım şebekesindeki tüm kompanzasyon sistemlerinin ve transformatörlerin sabit gruplarının devrede olmamasına rağmen, sistemin halen kapasitif yönde reaktif cezaya girdiği gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda bu kapasitif etkinin XLPE türündeki orta gerilim kablolarından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Buna göre farklı kesit ve uzunluklardaki yeraltı kabloları ile tesis edilen bir dağıtım şebekesinin analizini yaparak gerekli olan şönt reaktör panosunun kurulumunu gerçekleştirmiştir. Şönt reaktörün tesis edilmesi ile dağıtım şebekesinde meydana gelen kapasitif etki giderilmiş ve cezai sınırların altında kalınması sağlanmıştır. [27]

Zabudskiy ve ark (2016) mikroişlemci kontrol tabanlı SVC tasarımı için çalışmalarda bulunmuşlardır. Enerji santrallerinin kapasitelerinin önemli ölçüde büyümesi, dağıtım hatlarındaki kayıpların artması, zayıf ara bağlantıların varlığı ve yük dağılımının eşit olmaması nedeniyle, enerji endüstrisinin otomatik kontrol sistemleri kullanılarak iyileştirilmesini gerektiren en büyük unsurlardır. Elektrik santrallerinde, ayrı bileşenlerden yapılan cihazlara kıyasla otomatik mikroişlemci kontrol sistemlerinin işletme deneyimi, hem servis fonksiyonları hem de güvenilirlik

açısından daha avantajlıdır. Hat sonu voltajını düzenlemek ve stabilize etmek için bir SVC ile bir arada kullanılan mikroişlemci kontrol sistemi tasarlamışlardır. Mikroişlemci kontrol sistemi, SVC ile birlikte kullanılması ile sistemdeki voltajı, kurulum noktasında önceden belirlenmiş bir seviyede düzenlediği ve stabilize ettiği görülmüştür. Ayrıca elektrik güç sistemindeki ve yükteki voltaj stabilizasyonu ile birlikte güç kayıpları da azalttığı görülmüştür. Geliştirilen donanım ve yazılım ile SVC' nin reaksiyon hızı arttırılmış ve bu sayede voltaj stabilizasyonu kararlılığı sağlanmıştır [28].

Yoldaş M. (2011) OG dağıtım şebekelerinde reaktif güç kompanzasyon metodlarının incelenmesine yönelik bir çalışmada gerçekleştirmiştir. Farklı özelliklerdeki OG dağıtım şebekelerindeki kademeli kompanzasyon tekniklerini incelemiştir. Ayrıca OG dağıtım tesislerinde klasik kompanzasyon metotlarını ve statik kompanzasyon çeşitleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde MATLAB SIMULINK programı ile OG dağıtım şebekesindeki kompanzasyon sistemine ait modelleme yapılarak simülasyon gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda OG seviyesinde reaktif güç kompanzasyon, AG' de yapılan klasik kompanzasyon metodlarına göre bazı olumsuz sonuçlar meydana gelidiği gözlemlenmiştir. Ani kademe değişimleri nedeniyle akım ve gerilim değerlerinde tehlikeli ani genlik yükselmeleri meydana gelmiştir. Bu çalışmada sonucunda, orta gerilim tesislerinde kullanılan kompanzasyon sisteminin yük değişiminin anlık ve hızlı olmadığı tesislerde kullanılmasının daha uygun olacağı, diğer durumlarda reaktif güç kompanzasyon sisteminin AG bölümde yapılmasının ekonomik, teknik ve uygulanabilirlik açısından daha avantajlı olduğu kanaatine varılmıştır [29].

Erol S. (2011) reaktif güç kompanzasyonunun OG dağıtım şebekesinde uygulanması ve enerji kalitesine etkilerinin incelenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Tesis edilen bir şebeke analizörü ile ölçümler alınmış ve grafiksel analizi gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma ile kompanzasyon yapılan tesiste akım ve gerilim genlik değerleri ve harmoniklerin ölçüm sonuçları incelenmiş ve yorumlanmıştır. Çalışma neticesinde harmonik filtreli kompanzasyon kullanılmasının enerji kalitesi açısından katkıları yorumlanmıştır [30].

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada XLPE tipi yeraltı kabloların yapısından dolayı özellikle uzun hatlarda neden olduğu kapasitif etki, XLPE kablo ile tesis edilen bir şebekede incelenecek ve PSCAD/EMTDC programında modellemesi yapılarak alınan sonuçlar karşılaştırılacaktır. XLPE kablonun kapasitif (reaktif) etkisinin giderilmesi için tesis edilen şönt reaktörün şebekeye olan katkısı, devrede değilken ve farklı kademeleri devredeyken alınan ölçümler, simülasyon programından alınan sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Elde edilen sonuçlar ile kompanzasyon sisteminin şebekeye olan etkileri, farklı noktalara tesis edilmesinin şebekeye olan etkilerini tespit ederek, klasik kompanzasyon metotlarının yerine doğru kompanzasyon metodunun verimlilik açısından değerlendirilmesi yapılarak saptanması amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Enerji Kabloları

Elektrik enerjisinin üretim noktasından son kullanıcıya kadar iletimi ve dağıtımında kullanılan kablolar farklı şekillerde tesis edilmektedirler. Tanım olarak verilecek olursa enerji kablosu; elektrik enerjisini üretim tesisinden son alıcıya kadar çeşitli gerilim seviyelerinde ileten, yalıtkan izoleli veya izolesiz, tek damarlı veya çok damarlı iletken topluluğuna denir [3]. Kablolarda kullanılan iletkenler, iletkenliği yüksek olan bakır veya alüminyum çıplak tellerin burkulmasıyla elde edilirler. Enerji kabloları içinde barındırdığı iletken sayısına göre tek damarlı ve çok damarlı olarak üretilmektedir. Kimyasal ve mekanik etkilere karşı oldukça dayanıklıdır. Ayrıca suya karşı dayanıklı dış kısmını kaplayan yalıtkanı sayesinde, dış etkenlere karşı yüksek oranda dayanıklılığa sahiptir [2].

Enerji kablolarında, içerisinde bulunan iletkenleri birbirinden ayırarak izole eden ve harici etkenlere karşı dayanıklılık sağlayan yalıtkan özellikte kimyasal malzemeler kullanılmaktadır. Bu maksatla sıklıkla kullanılan malzemeler PVC, PE ve XLPE gibi kimyasal özelliklerdeki yalıtkanlardır. [31]

2.2 Kablo ve İletkenlerinin Yapı Elemanları

Enerji kabloları çeşitli malzemelerden yapıldıklarından dolayı sınıflandırılması gerekmektedir. Bu nedenle ortak tanımlamalar ile çeşitli standartlara göre (TSE, VDE) sınıflandırılmaktadır. Yeraltı kabloları şekil 2.1.'deki bileşenlerden oluşmaktadırlar [3].



Şekil 2.1. Yeraltı kablo yapısı ve temel bileşenleri

Damar: Enerji kablosunun birbirinden elektriksel olarak korunmuş ve birbirinden bağımsız halde bulunan iletken bölümleridir. Enerji kablolarında damar

sayıları; hattın gücü, voltaj değeri ve faz sayısı vb. gibi parametrelere göre belirlenmektedir.

İletken (1): Elektrik kablosunun içinde ana unsur olarak enerjinin iletilmesini sağlayan yalıtılmamış tel veya tel demetidir. İletken, farklı özelliklerde bulunan farklı malzemelerden imal edilebilmektedir.

Yalıtkan Kılıf (2): İzolesiz haldeki iletkenleri elektriksel olarak koruyan bölümdür. Yalıtkan kılıfın üretim malzemesine göre kablolar; PVC izolasyonlu, lastik izolasyonlu şeklinde isimlendirilmektedir.

Ortak Kılıf (3): Birden fazla damarı bulunan kablolarda kullanılmaktadır. Tüm damarları içine alan ve yalıtkan özellikteki kılıfa denir. Bunun sayesinde damarlara istenilen şekil verilebilir ve koruyucu yeni bir kılıf görevini görür.

Konsantrik İletken (4): Enerji kablolarında bir açıdan sigorta görevi gören bu iletken bakır telden imal edilir. Tek ve çok damarlı kablolarda farklı yerlerde bulunur. Tek damarlı kablolarda yalıtkan, kılıfın üzerinde bulunmasına rağmen birden fazla damarı bulunan kablolarda ise şekil 2.1.' de görüldüğü üzere ortak kılıfın üzerinde bulunur.

Koruyucu Dış Kılıf (5): Birden fazla damarı bulunan kablolarda kabloyu çevresel etkilerden koruyan ve şekil verebilmesine yarayan yalıtkan kılıftır. [32]

2.3 Yalıtkan Cinslerin Özellikleri

Enerji kablolarında yalıtkan olarak kullanılan izolasyon malzemeleri, kabloların kullanım ömürleri boyunca anma gerilimine dayanıklılığını sağlayacak kapasitede olmalıdır. Bu özelliği sağlayabilmek için:

- Yüksek yalıtkanlık seviyesi,
- Yalıtkanlık kayıplarının düşüklüğü,
- Çevresel etkenlere dayanım,
- Kullanım ömrünün uzun olması gibi özelliklere sahip olmalıdır [2].

Günümüzde kablo teknolojisinde termoplastik adı verilen, PVC ve PE olarak adlandırılan yalıtkan kaplı enerji kabloları bulunmaktadır. AG ve OG dağıtım sistemlerinde kullanılan kablolardaki yalıtkanlar PVC içeren maddelerden

oluşturulmaktadır. Termoplastik yalıtkanlar, çevresel etkilerden en çok karşılaşılan ısınma ve soğumaya karşı dayanıklıdır. Belirlenen maksimum ve minimum sıcaklık aralıklarında sürekli olarak soğuduğunda sertleşen, ısındığında ise yumuşayan, kendi kendine şekil değiştirmedikten dolayı yalıtkanlığını yitirmeyen malzemelerdir. Isı ile tekrar dönüştürülebilen termoplastik yalıtkanlar;

- Yüksek sıcaklıklarda eriyip tekrar şekillenebilir,
- Dayanabileceği maksimum sıcaklığa kadar bozulmadan kalabilir,
- Birden fazla seferde geri dönüştürülerek kullanılabilir.

İçinde katkı malzemesi bulunmayan PVC artan sıcaklıklara karşı dayanıklı değildir. Ayrıca yapısı esnek değildir ve yüksek sıcaklıklarda kullanılması tercih edilmemektedir. PVC malzemelerin içine esnek özellik göstermesi için bir takım kimyasal dolgu malzemeleri eklenerek kullanılabilir. Bu sayede sert ve kırılabilir yapısı değiştirilerek esneklik sağlanır. Böylece bu özellikte yalıtkan malzeme ile üretilen kablolar, çeşitli çevresel ve mekanik etkilere karşı kullanılabilir. PVC malzemelere **kalsit** ve **kaolin** gibi [3] kimyasal katkı malzemeleri karıştırılarak yüksek sıcaklıklarda kullanılması sağlanır.

Polietilen malzeme ise, parafin sınıfında olan ve kimyasal olarak katkı olmadan kullanılabilen **hidrojen** ile **karbonun** kimyasal olarak birleştirilmesi ile oluşan malzemedir. Polietilen malzemeler çeşitli metotlarda işlenerek farklı özelliklere sahip polietilen yalıtkanlar ortaya çıkar. Yüksek gerilim kablolarında kullanılan polietilen malzemeler ile yapılan kablolar iki şekilde elde edilirler. Yüksek basınç altında ve düşük yoğunluklu polietilen LDPE, düşük basınç tekniği ve yüksek yoğunluklu polietilen HDPE şeklinde adlandırılır. Suyu karşı oldukça dayanıklı ve mekaniksel olarak da oldukça yüksek dayanıklılığa sahiptir. XLPE adı verilen yalıtkan malzeme polietilenin molekül zincirlerinin çapraz olarak bağlanmasıyla ortaya çıkar.[3]

2.4 Kablolarda Kullanılan Başlıca İletken Türleri

Bakır Tel: Bakır, kablolarda en yaygın olarak kullanılan iletken malzemedir. Çıplak bakır tel, kalay kaplı bakır tel, nikel kaplı bakır tel, bakır kaplı çelik tel ve gümüş kaplı bakır tel uygulamaları bulunmaktadır. Bakırın en çok kullanılan iletken olmasında aşağıdaki özellikleri ön plana çıkarmaktadır.

- **Mükemmel iletkenlik:** Bakırın çok iyi bir iletken olması iç direncinin diğer iletkenlere göre nispeten daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı boyutlardaki alüminyum kablo ile bakır kablonun direnç değerleri arasında 1,6 kat fark vardır. Bu nedenle, alüminyum kablodaki kayıp oranı bakır kabloya kıyasla daha yüksek olacaktır. Bakır kablonun bu özelliği sayesinde enerji verimi yüksektir.
- **Biçimlendirilebilir olması:** Bakır şekil verilebilen bir metaldir. Bu özelliği sayesinde kırılmadan veya zayıflamadan iyi bir uzunluğa gerilebilir. Bakır, aynı zamandan gerilme parametresi yüksek olduğundan dolayı döşeme esnasında avantaj sağlamaktadır.
- **Uygun kimyasal özellikler:** Bakır üstün kimyasal özellikleri sayesinde, enerji taşınmasında kullanılan iletkenler arasında en ideal elemanlardan biridir. Bakır tel, ömrünü kısaltan aşınmaya ve diğer kötü etkilere karşı dayanıklıdır. Bakır teller, olumsuz iklim koşullarına karşı daha uzun süre dayanabilir.
- **Yüksek sıcaklık toleransı:** Elektrik kablolarının içinden akım akarken hata durumlarında yüksek kısa devre akımı telden geçtiğinde yüzey sıcaklığı oldukça artar. Yüksek gerilimli elektrik hatlarının ısısında sürekli artış ve düşüş yaşanmaktadır. İletken özelliği bulunan tüm teller, sıcaklıktaki bu dalgalanmaya dayanamaz. Bakır ise, yüksek sıcaklık değişimlerine toleransı sayesinde uzun ömürlü bir malzemedir.
- **Yüksek rezerv oranı:** Yapılan araştırmalar sonucunda bakır maden olarak bol miktarda bulunmaktadır. Mevcut rezerv miktarları incelendiğinde bu miktarın önümüzdeki 5 milyon yıl için yeterli olduğu tahmin edilmektedir [1].

Alüminyum Tel: 20. yüzyılın başlarında elektrik kablolarında kullanılmaya başlanan alüminyum iletkenler, özellikle 2. Dünya Savaşı sonrasında yaygınlaşmıştır [1]. Enerji kabloları ve havai hatlarda kullanılmaktadır. Ayrıca koaksiyel kabloların örgü ekranlarında kullanılmaktadır. Alüminyum korozyona karşı daha hassastır ve belirli zaman aralıklarında kontrol edilerek değiştirilmesi gerekmektedir. Su ve bazı metaller alüminyumu korozyona uğratar ve oluşan bu korozyon nedeniyle yangın tehlikesi yüksektir. Geleneksel olarak, düzgün şekilde bakımı yapılmayan veya monte edilmeyen alüminyum tel bir yükümlülük olabilir fakat dikkatlice kurulup

değiştirilirse, bu risk önemli ölçüde azalır. Alüminyum telleri aşağıdaki özellikleri ön plana çıkarmaktadır.

- **Biçimlendirilebilir:** Alüminyum hafif ve şekil verilmesi kolay olan bir malzemedir. Bu özelliği sayesinde uzun mesafeli olan hatlarda çekilmesinin kolay olması nedeniyle kullanımı yaygındır. Alüminyum alaşımlı teli bükme bakıra göre daha kolaydır ve bir kez büküldüğünde, daha az geri yaylanma sergiler.

- **Maliyet:** Alüminyum iletkenler aynı güçte alıcı için kullanılacakları sistemlerde bakıra göre ekonomiklik açısından oldukça üstünlük sağlamaktadır. Alüminyum kablolar bakırdan önemli ölçüde daha ucuz olduğu için uzun mesafeli uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

- **Ağırlık:** Alüminyum bakıra göre önemli oranda hafiftir. İletkenlik olarak bakırın alüminyuma göre yüksek olmasına karşılık, alüminyum daha iyi bir ağırlık/iletkenlik oranına sahiptir. Düşük ağırlık özelliği sayesinde birçok havai enerji hattı alüminyumdan yapılmaktadır. Özellikle ağırlığın önemli olduğu bazı motor sargıları ve bazı uçak kabloları, ağırlıktan tasarruf etmek için alüminyumdan yapılmaktadır.

Gümüş Tel: Elektrik iletkenliği açısından değerlendirilecek olursa gümüş tel diğer bütün iletkenlerden üstündür. Fakat maliyet açısından değerlendirildiğinde kablolarla kullanımı oldukça düşük orandadır. Gümüş tellerin ayrıca ısıyı aktarabilme kabiliyetleri de oldukça yüksektir. Isıyı iletebilme yeteneği, belirli yüksek sıcaklık koşullarında kullanım için gümüşü çok değerli kılar. Gümüş korozyona karşı direnci sayesinde uzun vadeli kaynaktır ve diğer malzemelere göre çok daha dayanıklıdır. Ancak, sert bir metal olması nedeniyle biçimlendirmek zordur. Yüksek iletkenliği ve ısıya karşı direnci nedeniyle, elektrik ve motor kontrol anahtarlarındaki kontak noktaları için gümüş sıklıkla kullanılır. En iyi hoparlör sistemlerinin çoğu, ideal sesi elde etmek için mıknatıs tellerinde gümüş teller kullanmaktadır.

2.5. Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Yeraltı Kabloları

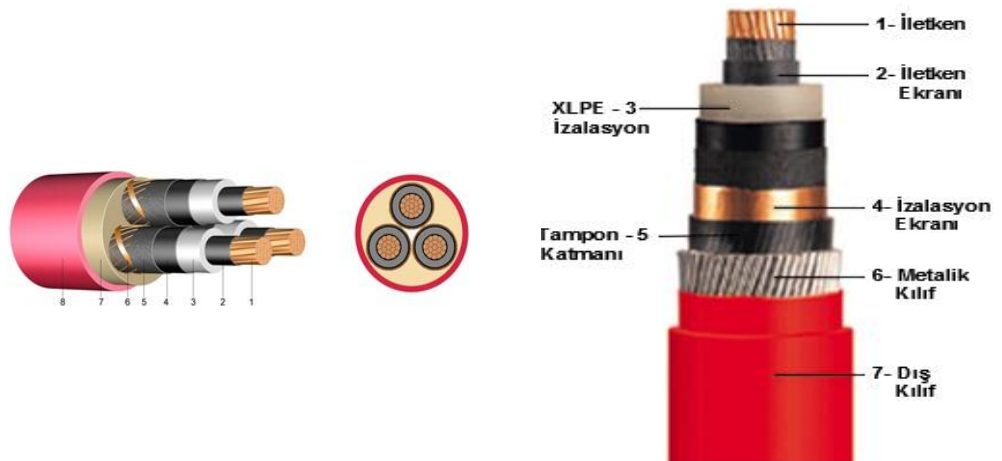
XLPE izoleli kabloların:

- Termik dayanıklılığı yüksek ve kullanım ömrü fazladır.
- Sıcaklık değişimlerinin sürekli olduğu ortamlarda bile özelliklerinde değişiklik meydana gelmemektedir.

- Esnektir ve -40 °C' ye kadar bu özelliği değişmez.
- Dielektrik kayıpları çok düşük olduğundan dolayı OG ve YG enerji kablolarında kullanılmaktadır.
- Kimyasal etkilere dayanımı fazladır.
- Su geçirmez özelliği vardır ve mekanik dayanıklılığı fazladır.
- Kısa devre durumlarında dayanıklıdır.

Tablo 2.1. XLPE ve PVC kabloların karşılaştırılması [3]

İzole Malzemesi	XLPE	PVC
Mak. İşletme Sıcaklığı (°C)	90	70
Mak. Kısa Devre Sıcaklığı (°C)	250	170
Dielektrik Kayıp Faktörü	<0.0004	<0.07
Dielektrik Sabiti ϵ_r	2.3 (20°C ve 50 Hz)	8 (20°C ve 50 Hz)
Kısmi Boşalma (pC)	<5	<40
Yoğunluk (g/cm ³)	0.92	1.4
Hacimsel Özdirenç (Ohm/cm)	1x10 ¹⁶	1x10 ¹³
Çekme Mukavemeti (N / mm ²)	15-20	10-20
Kopma Uzaması (%)	>400	150-350



Şekil 2.2. XLPE kablo yapısı ve temel bileşenleri

İletken (1): XLPE kablolarında kablo iletkeni olarak bakır veya alüminyum iletkenler kullanılmaktadır ve elektrik akımı bu iletkenler ile iletilir. OG ve YG yeraltı kablolarının damarları dairesel biçimde yapılmasına karşın çok yüksek gerilimli kablolarında damarlar dilimli şekilde yapılırlar [33]. Bunun amacı deri etkisini ve yakınlık etkisini azaltmaktır. Deri etkisi; iletkende akan elektrik akımının iletkenin tüm yüzeyinde eşit olarak hareket etmeyerek, iletkenin orta kısmından uzaklaşarak yüzeyinden ilerlemesidir. İletken direnç değerini artırır. Deri etkisi (skin effect) frekansla doğru orantılı değişir. Aynı kesitteki bir iletkenin alternatif akıma gösterdiği direnç frekans arttıkça artar. Doğru akımda frekans olmadığı için deri etkisi oluşmaz. Elektrik enerjisinin tek damarlı kablolarında taşınması durumunda, yanyana döşenen kablolar arasındaki mesafe iletkenin çapından düşükse, elektrik akımı yanyana duran kablonun yüzeylerinde toplanırlar. Buna da yakınlık etkisi denmektedir [34]. Yanyana konumlandırılmış ve mesafeleri kısa olan alternatif akım taşıyan iletkenlerde birbirleri arasındaki manyetik etkiden dolayı bir direnç değeri oluşur. Bu da iletkenlerdeki akım akışını bozar. Kablolar arasındaki mesafeler arttırılırsa bu etki ihmal edilebilir. Havai hatlarda ise iletkenler arası aralık yüksektir ve bu nedenle yakınsaklık etkisi nedeniyle oluşan direnç değeri azdır ve dikkate alınmayabilir.

İletken Ekranı (2): Yarı iletken malzemeden üretilmiştir. İletken kısımların yüzeyine kaplanmıştır. Amacı iletken yüzeyindeki elektron akışının yüzeye eşit şekilde dağılmasını sağlamaktır. Burada düzgün bir elektrik alan oluşturarak yalıtkan üzerinde oluşacak elektrik alan şiddeti dalgalanmalarını engelleyecektir. Bu durum yalıtkan tabakanın en az zorlanmaya maruz kalmasını ve kablo ömrünün uzamasını sağlar. Yarı iletken sayesinde kabloda elektriksel denge sağlanır, bölgesel deşarjlar önlenir, kablo yalıtkanında olan elektriksel alanın tüm yüzeye eşit dağılımını sağlar ve kablo yalıtkanında radyal bir elektrik alanı sağlanır.

XLPE İzolasyon (3): Hidrokarbon zinciri oldukça uzun olan doğrusal polietilenin bu zincirleri birbirlerine bağlı değildir. Polietilen malzemenin dayanıklılığının yüksek olmasını sağlayan etki, bu uzun zincirlerin kendi arasında ve diğer zincirlere dallanması ile ortaya çıkan etkileşimdir. Polietilene mukavemetini veren en önemli parametre zincir dolanması etkileşimidir. Polietilen zincirlerinin çapraz bağlanmasıyla elastomer özelliği kazandırılan polietilen molekül ağı ortaya çıkartılır. XLPE özellikli malzemeler ile elde edilen kablolar 90 °C' ye kadar olan ısı

değerlerinde kullanılabilir ve bu değer kısa devre gibi 130 °C' yi bulmaktadır [3]. XLPE malzeme bu özelliklerinin yanında alçak sıcaklıklarda da iyi performanslar sergilemektedir. Ayrıca mekanik etkilere karşı dayanım kapasitesi fazladır. Yeraltı kablolarında OG ve YG' de sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedeni çevreyle mükemmel uyumluluğu ve ısınmaya karşı dayanıklılığıdır. Başlıca görevi yalıtımı sağlamak olan, aynı zamanda kabloyu oluşturan zorlamalardan (stres) da koruyan, iletkeni veya ileten damarları içine alan bir gömlek gibidir.[33]

İzolasyon Ekranı (4): XLPE izolasyon ile metalik kılıf arasında oluşacak aşırı baskıyı azaltmak için kullanılır. Ayrıca kablo yalıtımının içindeki elektrik alanı düzleştirme ve sınırlandırmak için kullanılır.

Tampon Katmanı (5): Metalik kılıf ile izolasyon ekranının arasında yer almaktadır. Yarı iletken bant veya bakır telden dokunmuş kumaş bant halinde uygulanmaktadır. Kullanım amacı ısı çevrimle kablo iletkenlerinin genişleme ve büzülmesini önlemektir.

Metalik Kılıf (6): Metalik kılıf XLPE tipi kablolarda birçok görevi üstlenmektedir. Yüksek gerilim kabloları nem ve suya çok duyarlı olduğundan dolayı kurşun kılıf izolasyon kullanılır. Kurşun kılıf izolasyon, suya karşı oldukça dayanıklıdır. Çok uzun mesafelerde kullanılan kablolarda su geçirmezlikte son derece önemlidir. Bu da su geçirmeyen yarı iletken bantlar kullanılarak sağlanır. Bu bantların yarı iletken malzemeden yapılmasının öncelikli olarak iki amacı bulunmaktadır. Birinci yukarıda anlatılan metal kılıf içerisine su girişini engellemektir. İkincisi ise üzerine yerleştirildiği yalıtım ekranı ile metalik kılıf arasında tek yönlü iletkenlik gerçekleştirmektir. Bu özelliği ile yalıtım ekranı üzerinde gerçekleşebilecek aşırı akımları metal sipere ulaştırmayı sağlamaktadır. [33] Metalik kılıf belirli noktalarda topraklanmaktadır. Bunun amacı temas halinde aşırı akımlara karşı sigorta görevi ve yüksek gerilim kablolarının haberleşme sistemlerine olan bozucu etkisini gidermektir. Genellikle her damarın üzerine sarılan bakır teller veya şeritlerden oluşur. Metal kılıfın ana görevleri, deşarj akımlarının iletimi, radyal nem ve su bariyeri oluşturması, iletken hata akımlarının iletilmesi, mekanik koruma ve ekranlamadır.

Dış Kılıf (7): XLPE tipi kablolarda, kabloyu dış etkilere koruyan ve kablonun en dış tabakasını oluşturan kısımdır. Kabloyu özellikle kimyasal ve kablonun

çekilmesi, serilmesi ve sonrasındaki mekanik zorlanmalardan korur. Genellikle PE ve PVC gibi maddelerden oluşturulur. Dış kılıflar tatlı ve tuzlu suya dayanıklıdır. Dış kılıf, kablonun dayanabileceği en yüksek çalışma sıcaklığına dayanabilecek ve sert özelliklerde yapılmaktadır.

2.6. Kabloların Elektroteknik Özellikleri

Enerjinin iletilmesi ve dağıtılmasında kullanılan kablolarda oluşan ve elektriğin temelini oluşturulan parametrelerin hesaplanmasında kullanılan, direnç, endüktans ve kapasitans değerleri hat sabitleri olarak adlandırılmaktadır. Hat sabitlerinin oluşmasında birden fazla etken vardır. Enerji nakillerinde kullanılan gerilimlerin büyüklüğünden dolayı bu sabitlerin değerleri ihmal edilecek seviyelere kadar düşmektedir.

2.6.1 Direnç

En önemli hat sabitlerinden biridir. İletim ve dağıtım şebekelerinde gerilim düşümüne ve güç kaybına neden olmaktadır. Hatlarda oluşan AC ve DC dirençler ayrı değerlendirilmelidir. AC direnç aynı zamanda etkin direnç olarak da adlandırılmaktadır. Kablo üretici firmaların kataloglarında verdikleri direnç değeri 20 °C'deki direnç değeridir. Bu değer hem ölçülerek hem de hesaplanarak bulunabilmektedir.

Kablo iletkenlerinin AC direnci olan ve R_{AC} ile sembolize edilen direnç değeri, ısı etkisi (thermal effect), deri etkisi (skin effect), yakınlık etkisi (proximity effect) ve iletkenin örgülü yapısının etkisi (spirality effect) gibi nedenlerle artar. İlk olarak iletkenin DC direnci hesaplanır. RDC direnci denklem 2.1' de verildiği gibi elde edilir [3].

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

Bölüm 2.5.'de anlatıldığı üzere AC gerilimde deri etkisi, frekans ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Frekansın artmasıyla iletkenin geçen akım yoğunluğu merkezden uzaklaşarak dış yüzeyinden akmaya başlayacaktır. Bunun etkisi ile iletkenin kesiti küçülmüş olacaktır. Kesitin azalması ile direnç değeri artacaktır. Deri etkisinin iletkenin direnç değeri üzerindeki etkisi diferansiyel denklemler ve Bessel

fonksiyonları ile bulunur. ”k” ile ifade edilir. Doğru akımda ise frekans değeri olmadığından deri etkisinden söz edilemez.

AC gerilimde paralel ve yakın yerleştirilen iletkenler, birbirlerinin akı dağılımını bozarak, iletkenlerden akan akımı bozar. Buna yakınlık etkisi denir. Yakınlık etkisi ile iletkenlerin AC’ deki direnç değerleri artar. İletkenler arası mesafeler arttırıldığında bu ilave kayıplar ihmal edilebilmektedir. İletkenlerden geçen akım ile sıcaklık değeri artar. Sıcaklık değerinin artışının iletkenin direncine etkisi 2.2a’ da verildiği şekilde hesaplanır [3].

$$R_{AC} = R_{20}[1 + \alpha_{20} \cdot \Delta t] \quad (2.2a)$$

ile elde edilir. Ayrıca iletken üzerindeki güç ve akım değerlerinin ölçülmesi ile denklem 2.2b’ de verildiği şekilde AC direnç değeri hesaplanabilir [3].

$$R_{AC} = \frac{P}{I^2} \quad (2.2b)$$

Tablo 2.2. Kabloların 20 °C’deki dirençleri [3]

Nominal kesit mm ²	Direnç Ohm/km	Al Ohm/km
1.5 mm ²	12.10	-
2.5 mm ²	7.41	-
4 mm ²	4.61	-
6 mm ²	3.08	-
10 mm ²	1.83	-
16 mm ²	1.15	1.91
25 mm ²	0.727	1.20
35 mm ²	0.524	0.868
50 mm ²	0.387	0.641
70 mm ²	0.255	0.413
95 mm ²	0.193	0.320
120 mm ²	0.153	0.253
150 mm ²	0.124	0.206
185 mm ²	0.0991	0.164
240 mm ²	0.0754	0.125
300 mm ²	0.0601	0.100
400 mm ²	0.0470	0.0778
500 mm ²	0.0366	0.0605

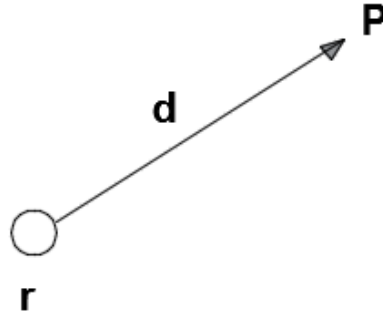
2.6.2. Endüktans

İletkenden üzerinden akım geçirildiği takdirde iletkenin etrafında bir manyetik alan meydana gelmektedir. İletken etrafındaki manyetik alan sabit değil ve sürekli değişken ise, bu durum bir EMK oluşturur. Bu emk'yi oluşturan manyetik alanın iletkeniden kaynaklanması nedeniyle buna öz endüksiyon denir. Oluşturulan emk'ya ise zıt emk denmektedir. Oluşan zıt emk iletkeniden akan akımı arttırıp azaltmaya çalışırken iletkenin AC direncini arttırır. Buna Lenz Kanunu da denmektedir. AC'de meydana gelen direnç değeri endüktif reaktans (X_L) olarak adlandırılır. Endüktif reaktans gerilim düşümüne neden olmasına rağmen aktif güç değişimine bir katkısı bulunmamaktadır.

Endüktif reaktansın değeri, iletim ve dağıtım hatlarının faz sayısına, kabloların döşeme şekillerine, kabloların döşenmesi sırasında aralarında bırakılan mesafelere ve kabloların kesitlerine göre değişmektedir.

Şekil 2.3.' de verilen yarıçapı r ve P noktasından d uzaklıktaki kablonun indüktans değeri [3],

$$L = \left(4,6 \cdot \log \frac{d}{r} + 0,5 \right) \cdot 10^{-4} \quad (2.3)$$



Şekil 2.3. Tek damarlı kablolarda indüktans değeri

Yukarıdaki formül simetrik hatlarda kullanılmaktadır. Simetrik sistemler, bütün fazların endüktansları birbirlerine eşit ve iletkenler arası mesafeler birbirine eşit ise geçerlidir.

İletkenlerin simetrik olarak döşenmediği durumlarda ise fazların endüktansları değişmektedir. Hatların döşenmesi sırasında çaprazlama olarak adlandırılan, dağıtım şebekelerinde belirli mesafelerde fazların çapraz olarak birbirinin üzerinden

geçirilmesi ile endüktans değerleri eşitlenirler. Ayrıca iletkenler arasındaki mesafeler farklı ise Denklem 2.4 ile eşdeğer mesafe bulunur ve bu değer kullanılır [3].

$$d_m = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} d_{31}} \quad (2.4)$$

Endüktif reaktans aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.5)$$

Tablo 2.3. PVC izoleli kablolarda X_L değerleri [3]

Nominal iletken kesiti	0.6/1 kV Çok damar	1 damar	3.6/6kV 3 damar	1 damar	6/10kV 3damar	1 damar
25	0.082	0.103	0.107	0.137	0.122	0.127
35	0.079	0.098	0.101	0.131	0.116	0.119
50	0.078	0.095	0.097	0.127	0.114	0.113
70	0.075	0.090	0.092	0.117	0.107	0.107
95	0.075	0.088	0.088	0.112	0.103	0.104
120	0.073	0.085	0.085	0.107	0.099	0.100
150	0.073	0.084	0.083	0.105	0.096	0.097
185	0.073	0.084	0.081	0.102	0.093	0.094
240	0.072	0.082	0.078	0.097	0.089	0.093
300	0.072	0.081	0.077	0.095	0.087	0.091
400	-	0.079	-	0.092	-	0.088

Tablo 2.3. incelendiğinde endüktif reaktansın kablonun kesitine, tek veya üç damarlı olmasına göre değiştiği görülmektedir. Kablo kesitinin yükselmesi ile endüktif reaktans azalmaktadır.

Tablo 2.4. XLPE izoleli kablolarda X_L değerleri [3]

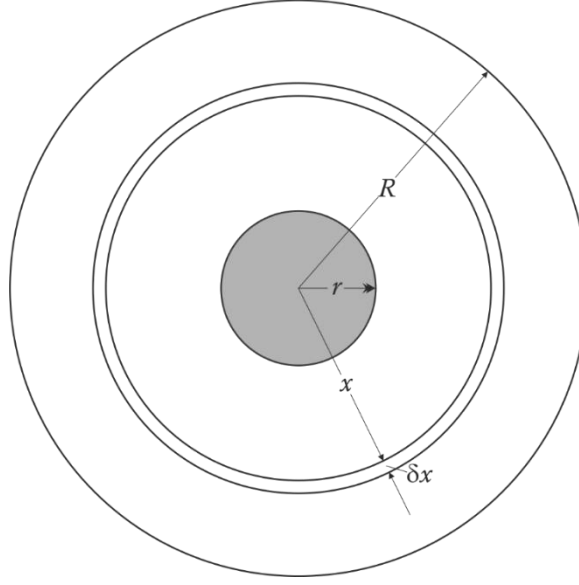
Nominal iletken kesiti (XLPE)	Nominal gerilim 0.6/1 kV 1.damar	Çok damar	6/10 kV 1. damar	Çok damar	12/20 kV 1. damar	Çok damar
35	-	0.075	0.133	-	0.144	-
50	0.088	0.072	0.127	0.110	0.137	0.123
70	0.085	0.072	0.119	0.103	0.129	0.115
95	0.082	0.069	0.114	0.099	0.123	0.110
120	0.082	0.069	0.109	0.095	0.118	0.106
150	0.082	0.069	0.106	0.092	0.114	0.102
185	0.082	0.069	0.102	0.090	0.110	0.099
240	0.079	0.069	0.098	0.087	0.105	0.095
300	-	-	0.095	0.084	0.102	0.092
400	-	-	0.091	-	0.098	-

Tablo 2.4'te görüldüğü gibi kesit değerlerine göre X_L değeri XLPE tipi kablolarda değişmektedir. Kablo kesiti azaldıkça X_L değerlerinin de arttığı görülmektedir.

2.6.3. Kapasitans

Yalıtkan bir madde ile birbirinden ayrılmış bulunan herhangi iki iletken plaka kondansatörü meydana getirmektedir. Bu gibi iki plaka arasına bir gerilim uygulandığı zaman, plakalarda ters polaritede elektrik yükleri toplanır veya iki plağa ters polaritede elektrik yükleri verilirse, plakalar arasında bir gerilim meydana gelir. Bir kondansatörün kapasite diye tarif edilen büyüklüğü plakalar arasındaki gerilim farkına karşılık plakalarda toplanan elektrik yükü ile verilmiştir. Gerilim-Volt ve elektrik yükü-Coulomb cinsinden ölçüldüğü takdirde, kapasite farad ile adlandırılır.

Yeraltı kablolarında tek damarlı kablolar topraklanmış metal bir kılıf yardımı ile ekranlanmıştır. Tek damarlı kablolarda üç faz üzerinden enerji taşındığı zaman, her faz topraklanmış metal kılıf yardımı ile yine ekranlanmış bulunduğundan, tek kollu kablolarda daima sadece iletkenle metal kılıf arasındaki elektrik alanının dikkate alınması yeterlidir.



Şekil 2.4. Tek damarlı kablolarda kapasite

Şekil 2.4’de iletken yarıçapı r ve izolasyon iç yarıçapı R olan tek damarlı bir kablo gösterilmiştir. İletkenin metre boy başına taşıdığı elektrik yükü q ise, x yarıçap mesafedeki elektriksel akı yoğunluğu [1],

$$D = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot x} \quad (2.6)$$

şeklinde olacaktır. Bu mesafede ve yarıçap istikametindeki potansiyel gradyenti [1],

$$E = \frac{D}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot x \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \quad (2.7)$$

olacaktır. İletkenle kılıf arasındaki gerilim farkı [1],

$$V = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \int_r^R \frac{dx}{x} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (2.8)$$

elde edilir. Kablonun metre boy başına kapasitesi [1],

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (2.9)$$

formülü ile elde edilir. Verilen sabitleri yerine koyacak olursak [1],

$$C = \frac{0,0242 \cdot \epsilon_r}{\log \left(\frac{R}{r} \right)} \quad (2.10)$$

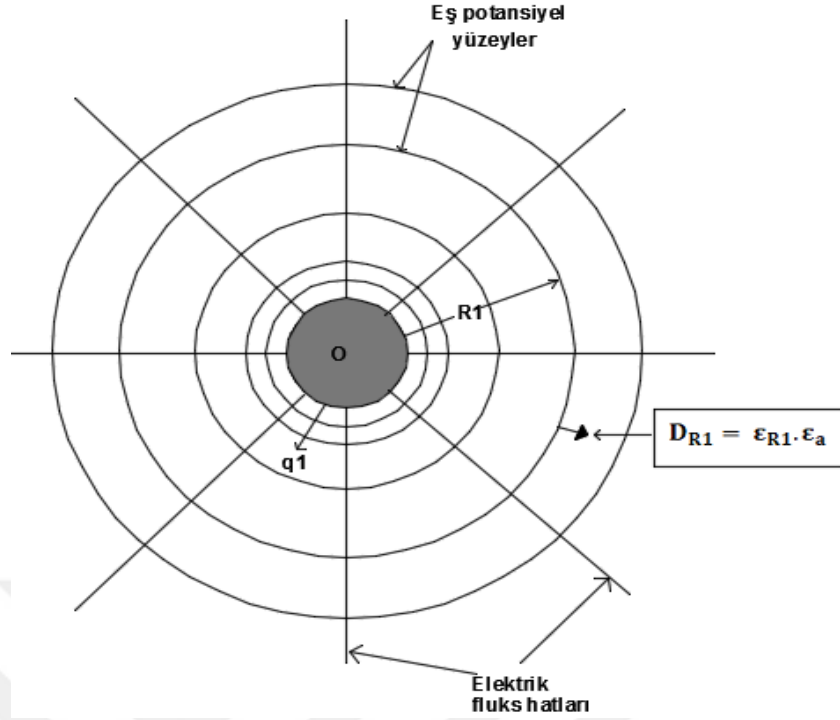
şeklinde yazılabilir.

Havai hatlarda ise, kısa taşıma hatlarında kapasite ihmal edilebilecek derecede küçüktür. Hat uzunluğunun büyümesi ve gerilimin artması ile birlikte, kapasitede artarak önemli bir büyüklük haline gelir. Yukarıda hesaplanan kapasite değerini havai hatlar içinde belirlenebilir.

Bir taşıma hattının iletkenleri arasındaki potansiyel farkı, plakaları arasına gerilim uygulandığı zaman elektrikle yüklenen bir kondansatörün plakaları gibi, iletkenlerin elektrikle yüklenmelerine yol açar. Dolayısı ile taşıma hattı iletkenlerinin de birer kapasiteleri vardır.

Taşıma hattının iletkenleri arasına uygulanan alternatif gerilim, gerilimin ani değeri değiştiğinde, iletkenlerdeki elektrik yükünün azalıp çoğalmasına sebebiyet verir. Elektrik yükünün bu hareketi bir elektrik akımı demek olup, alternatif akım nedeni ile elektrik yükünün birbirini takip eden bu şarj ve deşarjından kaynaklanan akıma hattın şarj akımı denir. Bir taşıma hattında hat açık devre halinde olduğu zaman bile, bir şarj akımı vardır. Şarj akımı hattın gerilim düşmesini, verimini, güç faktörünü ve hattın dahil olduğu taşıma sisteminin kararlılığını etkiler.

Endüktansın incelenmesi bakımından manyetik alan, kapasitenin incelenmesi bakımından da elektrik alanı önemlidir. Şekil 2.5’ de gösterilen boşlukta düz ve uzun, diğer elektrik yüklerinden izole edilmiş halde yuvarlak kesitli bir iletken parçasına herhangi bir şekilde bir elektrik yükü uygulanırsa, iletken çevresinde bir elektrik alanı meydana gelir. İletkenin boyu yeteri kadar uzun düşünüldüğünden birim uzunlukta elektrik yükünün her tarafta aynı olması gerekir. Bu nedenle, elektriksel akı hatları iletken eksenine dikey bir düzlem üzerinde yarıçap istikametinde eşit açılar oluşturarak etrafa yayılır. Elektriksel akı hatları pozitif bir elektrik yükünden başlayıp negatif bir elektrik yükünde son bulurlar.



Şekil 2.5. Pozitif bir elektrik yükünden etrafa yayılan elektriksel akı hatları [1]

Bir elektrik alandaki akı hatlarının yoğunluğu kullanılan ölçü sistemine bağlıdır. Rasyonelize edilmiş MKS ölçü sisteminde, bir coulomb büyüklüğündeki elektrik yükünden, bir coulomb büyüklüğünde akının etrafa yayıldığı kabul edilmiştir. Bu nedenle, herhangi bir R_1 yarıçap mesafede geçmek zorunda kalacağı alana bölümüne eşittir. İletkenin 1 metre boyuna ait elektrik yükü q_1 ise, R_1 yarıçap mesafedeki elektriksel akı hatları yoğunluğu [1],

$$|D_{R1}| = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot l} \quad (2.11)$$

Burada gerek elektrik yükü ve gerekse elektriksel akı aynı birimle ifade edilmiş bulunduklarından, tahmin edileceği gibi, R_1 yarıçap mesafede iletken yüzeyinde akı yoğunluğu ve yük yoğunluğu birbirine eşittirler.

Bir elektrik alanında, elektrik alan şiddeti birim elektrik yükü üzerine etki eden kuvvetle tarif edilmiştir. Bir noktadaki elektrik alan şiddeti o noktadaki elektriksel akı yoğunluğu ile orantılı ve aynı yöndedir. Örneğin, Şekil 2.5’ deki R_1 yarıçap mesafedeki elektrik alan şiddeti D_{R1} ile orantılı ve aynı yöndedir. Elektrik alan şiddeti [1],

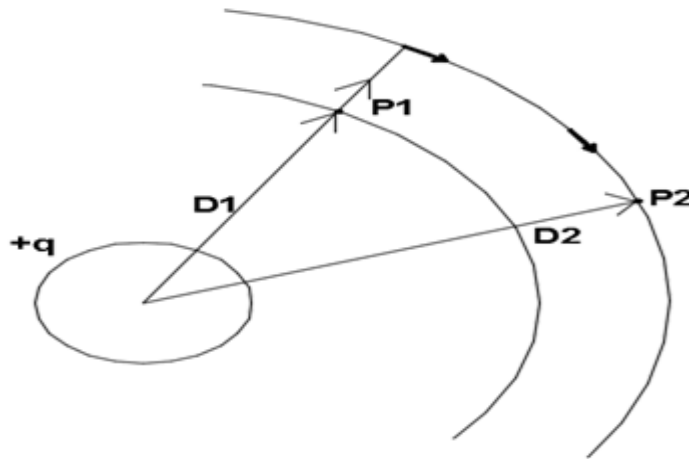
$$|E_{R1}| = \frac{|D_{R1}|}{\varepsilon_a} = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_a \cdot R_1 \cdot l} \quad (2.12)$$

bağıntısı ile verilmiştir.

Manyetik alan ortamına ait permabilite için yapıldığı gibi, elektrik alanı ortamının dielektrik sabiti de boşluk veya havanın mutlak dielektrik sabiti yönünden söylenir. Rasyonelize edilmiş MKS ölçü sisteminde hava veya boşluğun mutlak dielektrik sabiti ε_0 , bağıl veya relativ dielektrik sabiti ε_r ile gösterilirse [1],

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (2.13)$$

Elektrik alanı içinde herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı veya gerilim, birim büyüklüğündeki bir elektrik yükünü söz konusu iki nokta aralığında hareket ettirmek üzere gereken işe eşittir. Uygulamakta bulunduğumuz rasyonelize edilmiş MKS ölçü sisteminde yük birimi coulomb, iş birimi newton-metre (joule) ve potansiyel farkın birimi de voltur. Bir noktada volt/m yönünden elektrik alan şiddeti, bu noktada düşünülen bir coulomb büyüklüğündeki elektrik yükü üzerine newton yönünden etki yapan kuvvete eşittir. O halde, birim büyüklüğündeki bir yükün elektrik alanı içinde iki nokta arasında hareketi esnasında görülen iş, bu hareket esnasında yüke etki yapmakta olan kuvveti bildiren alan şiddetinin yükün hareketi esnasında kestiği mesafe üzerine alınan integralinden meydana gelir. Elektrik yükü alan şiddetine göre ters yönde hareket ediyorsa, bu hareket için dışarıdan bir iş sarfına ihtiyaç vardır. Aksi halde, elektrik yükünün bu hareketi ile bir iş kazanılır.

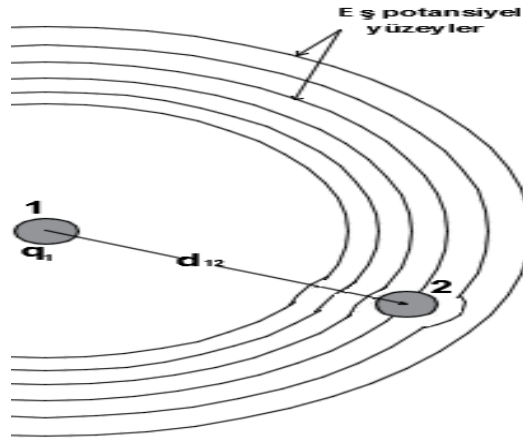


Şekil 2.6. Düzgün dağıtılmış vaziyette pozitif yüke sahip daire kesitli bir iletkenin etrafındaki elektrik alanında iki nokta arasındaki integral mesafesi [1]

Şekil 2.6' da P_1 ve P_2 noktaları iletken merkezlerinden D_1 ve D_2 uzaklıktadır. İletkenin üzerindeki pozitif elektrik yükü, alana konulduğu düşünülen birim pozitif elektrik yükünü iter. Pozitif yük üzerine olan kuvvet etkisi bir itme kuvveti olduğundan, bu yükü P_2 noktasından P_1 noktasına getirmek üzere dışarıdan bir iş veya enerji sarf edilmesi gerekir. P_1 noktasının potansiyeli P_2 noktasına göre daha yüksek olup, bu iki nokta arasındaki potansiyel farkı veya gerilim pozitif yükü P_2 noktasından P_1 noktasına taşımak için sarf edilen işten ibarettir. Öte yandan, pozitif yükü P_1 ' den P_2 ' ye hareket ederse, bir enerji kazanılır ve bu enerji P_1 ' den P_2 ' ye göre olan gerilim düşümüne eşit bulunur.

İki nokta arasındaki gerilim düşümünü en basit şekilde hesaplamak üzere, P_1 ve P_2 noktalarından geçen eş potansiyel yüzeyler arasındaki gerilim uygulanır ve bunun içinde elektrik alan şiddetinin yarıçap istikametinde eş potansiyel yüzeyler arasında kalan mesafe üzerinden integrali alınır. Birinci nokta iletken üzerinde ve ikinci nokta iletken merkezinden D_1 gibi uzak bir mesafede seçilirse, iletken yüzeyinin bu D_1 noktasına göre olan potansiyel farkı [1],

$$V_{11} = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \ln \frac{D_1}{r_1} \quad (2.14)$$



Şekil 2.7. Komşu ve paralel iki iletkenin eş potansiyel yüzeylerin yaklaşık durumu[1]

Şekil 2.7' de görüldüğü gibi, elektrik alanına 1 iletkenine paralel olan, fakat üzerinde herhangi bir elektrik yükü bulunmayan 2 iletkeninin sokulduğunu düşünelim. 2 iletkeni üzerinde herhangi bir yük bulunmasa bile, bu iletkenin varlığı 1 iletkeni

etrafındaki elektrik alanını değiştirir. Akı hatları artık tam yarıçap istikametinde olamayacakları gibi, eş potansiyel yüzeyler de tam daire şekillerini muhafaza etmezler, 2 iletkeninin yüzeyinin her tarafında potansiyel aynı kalmak zorundadır. Dolayısı ile 2 iletkenini kesebilecek tek eş potansiyel yüzey 2 iletkeninin potansiyeline sahip bir yüzey olabilir. Öteki eş potansiyel yüzeylerin şekilde görüldüğü gibi daire durumlarını kaybedecekleri görülmektedir. 1 iletkeni üzerinde herhangi bir elektrik yükünün bulunması, 2 iletkenin 1 iletkenine yakın kısımlarda endüksiyonla ters polaritede bir yükün meydana gelmesine sebep olur. 2 iletkeni üzerindeki toplam yükün sıfır olduğunu kabul etmiş bulunduğumuzdan, bu yükü dengelemek üzere, 2 iletkeninin karşı tarafında, yani 1 iletkeninden uzak olan tarafında, endüksiyonla başka bir yükün meydana gelmesi gerekir. Toplam sıfır olmakla beraber, 2 iletkeni üzerindeki bu yükler 1 iletkeni üzerindeki yük dağılışını biraz etkiler ve bu iletkende yüzey elektrik yükü yoğunluğunun 2 iletkenine bakan tarafında daha fazla ve 2 iletkeninden uzak olan tarafında da daha az olmasına sebebiyet verir. Doğal olarak bu yeni yük durumu da 2 iletkeninde indüklenmekte olan yükleri yeniden etkileyebilir. Bu karşılıklı etkilemeler birbirini izler. Ancak, bu etkiler gittikçe daha küçölerek nihayet daha fazla bir değişikliğin meydana gelemeyeceği dengeli bir durum oluşur. İkinci bir iletkenin varlığının her iki iletken üzerindeki yük dağılışına etki yapması olayına elektrik alandaki **yakınlık etkisi** denilir.

Taşıma hatlarında iletkenler arasındaki d_{12} mesafesine göre r_1 ve r_2 yarıçapları küçük oldukları takdirde, yakınlık etkisi küçük olup ihmal edilebilir. Bu takdirde, yaklaşık olarak, 1 iletkeni üzerindeki yükten dolayı 2 iletkenin kazandığı potansiyel şekil 2.7' de yarıçapı d_{12} olan ve dolayısı ile herhangi bir karşılıklı etki bulunmadığı zaman 2 iletkeninin merkezinden geçen eş potansiyel yüzeyininki ile verilmiştir. řu hâlde, 1 iletkeni üzerindeki q_1 yükünden dolayı 2 iletkeni ile bu iletkenen uzakta düşünölen D_1 mesafesi arasındaki potansiyel farkı [1],

$$V_{21} = \int_{R=d_{12}}^{R=D_1} |E_{R1}| \cdot d_{R1} = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \int_{d_{12}}^{D_1} \frac{d_{R1}}{R_1} = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \ln \frac{D_1}{d_{12}} \quad (2.15)$$

Buradan 1 iletkeni üzerinde herhangi bir elektrik yükü bulunmadığını, buna karşılık 2 iletkeninin l metre boyundaki kısmında q_2 büyüklüğünde bir elektrik yükü bulunduğunu düşünelim. Bu elektrik yükünden dolayı 1 iletkeninin yeniden kazanacağı potansiyel [1];

$$V_{12} = \frac{q_2}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \ln \frac{D_2}{d_{12}} \quad (2.16)$$

eşittir. Burada D_2 , 2 iletkeninden itibaren uzakta düşünülen bir mesafedir. Ortamın dielektrik sabiti, sabit kaldığı zaman elektrik yükleri veya potansiyel farkları toplanabilirler. Böyle bir halde her bir iletken üzerindeki yük bu ayrı ayrı alanlardan dolayı iletkende indüklenen yüklerin toplamı ve iki nokta arasındaki potansiyel farkı da ayrı ayrı alanların sebebiyet verdikleri potansiyel farkların toplamına eşittir. O halde, 1 iletkeni üzerindeki q_1 yükünden ileri gelen elektrik alanı ile 2 iletkeni üzerindeki q_2 yükünden ileri gelen elektrik alanı üst üste toplanırsa, net potansiyel farkı büyüklerin sebebiyet verdikleri potansiyel farklarını toplamak suretiyle bulunabilir. Örneğin, 1 iletkeni ile bu iletkeninden D_1 ve 2 iletkeninden D_2 uzaklıkta bulunan nokta arasındaki potansiyel farkı [1];

$$V_1 = V_{11} + V_{12} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \left[q_1 \cdot \ln \frac{D_1}{r_1} + q_2 \cdot \ln \frac{D_2}{d_{12}} \right] \quad (2.17)$$

eşittir. Şimdi, özel bir hal olarak $q_2 = -q_1$ olduğunu düşünürsek, bu takdirde [1];

$$V_1 = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12} + \ln \frac{D_1}{D_2} \right] \quad (2.18)$$

yazılabilir. Yukarıdaki denklem bağlantılarına dayanarak, 2 iletkeninin aynı uzak noktaya göre potansiyel farkını aşağıdaki gibi kolayca yazabiliriz [1].

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{q_2}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12} + \ln \frac{D_2}{D_1} \right] \\ &= \frac{-q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12} + \ln \frac{D_2}{D_1} \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

1 iletkeninden D_1 ve 2 iletkeninden D_2 mesafesinde düşünülen uzak nokta sonsuza kaydırıldığı zaman, 1 ve 2 iletkenlerinin potansiyel farkları için yazdığımız ifadeler bu iletkenlerin sonsuza göre olan potansiyel farklarını bildirir. Sonsuzun potansiyeli sıfır

kabul edildiğine göre, bu ifadeler aynı zamanda 1 ve 2 iletkenlerinin doğrudan doğruya potansiyellerine eşittir. O halde, 1 ve 2 iletkenlerinin potansiyelleri [1];

$$V_1 = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \left[\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12} \right] \quad (2.20)$$

$$V_2 = \frac{q_2}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \left[\ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12} \right] = \frac{-q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \left[\ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12} \right] \quad (2.21)$$

eşittir. Artık, 1 ve 2 iletkenleri arasındaki potansiyel farkını aşağıdaki denklemle hesaplayabiliriz [1];

$$V_{12} = V_1 - V_2 = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{1}{r_2} + 2 \cdot \ln d_{12} \right] \quad (2.22)$$

Bir kondansatörün elektrik yük, gerilimi ve kapasitesi arasındaki bağıntı [1],

$$C = \frac{q}{V} \quad (2.23)$$

formülü ile verilmiştir. Buna göre, 1 ve 2 iletkenleri arasındaki kapasite [1],

$$C_{12} = \frac{q_1}{V_{12}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{1}{r_2} + 2 \cdot \ln d_{12}} \quad (2.24)$$

veya $r_1 = r_2 = r$ ise [1],

$$C_{12} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{d_{12}}{r}} \quad (2.25)$$

eşittir. Buradan sonsuzdaki sıfır potansiyeline sahip noktanın kondansatörün bir elektrotunu ve iletkenlerin kondansatörün öteki elektrotunu teşkil ettikleri düşünülecek olursa, her bir iletkenle bu nokta arasındaki kapasiteleri ayrı ayrı belirlemek gereklidir. Böyle bir durumda her bir iletkenle sıfır potansiyelindeki bu nokta arasında bir kapasite mevcut olup, bu kapasiteler seri bağlı gibi olur [1].

$$C_1 = \frac{q_1}{V_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12}} \quad (2.26)$$

$$C_2 = \frac{q_2}{V_2} = \frac{-q_1}{V_2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12}} \quad (2.27)$$

yazılabilir. Bu kapasiteler arasında seri bağlı gibi olduğu için [1],

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} \quad (2.28)$$

bağıntısı vardır. Havai hatlarda $\epsilon_r = 1$ ’ dir. Ayrıca $\ln(x) = 2,3026 \cdot \log(x)$ bağlantısı mevcuttur. Buna göre, tek fazlı devrelerde iletken başına kapasite [1],

$$C = \frac{2,411 \cdot 10^{-8}}{\log \left(\frac{d_{12}}{r_1} \right)} \quad (2.29)$$

Enerji iletim ve dağıtım tesislerinde hat sonu boşta bile olsa gerilim yükselmeleri meydana gelir. İşte bu nedenle gerilim değerini düzenlemek ve sabit tutmak amacıyla hat sonlarında senkron makineler tesis edilir. Fakat enerjinin üretim noktasındaki senkron jeneratörler şebeke için ihtiyaç duyulan kapasitif güç değerini karşılayabilecek özelliklere sahip iseler hatlara kapasitör konulmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Elektrik şebekelerindeki yükler genellikle endüktif özelliktedir ve endüktif güç çekerler. Endüktif yüklerin bulunduğu şebekelerde akım ile gerilim arasında faz farkı bulunur ve gerilim akıma göre ileridedir. Bu nedenle hat başında uygulanan gerilim değeri hat sonunda görülemez. Aralarında farklılıklar oluşur.

Hat başı ve hat sonu arasında meydana gelen gerilim farkını gidermek amacıyla şebekelere şönt kapasitörler yerleştirilmektedir. Tam tersi olarak eğer iletim ve dağıtım şebekelerinde hatlara ait endüktans değeri yüksekse endüktif reaktans (X_L) tarafında oluşan gerilim düşümünü gidermek amacıyla bu kez seri kapasitörler tesis edilir.

Seri kapasitörlerin şebekelerde tesis edilecek yerleri önemlidir. Bu cihazlar kondansatör gruplarından oluşmaktadır. Hattın seri empedansını azaltıcı etki gösterirler. Seri kapasitörler genellikle havai enerji iletim hatlarında ve hattın toplam

uzunluğu göz önüne alınarak toplam mesafenin 2/3 oranında bir yere yerleştirilir. Şönt kapasitörlerin aksine devreye seri olarak bağlanırlar ve yapısı itibariyle endüktif reaktans değerini azaltır. Böylelikle hat empedansı da azalmaktadır. Direnç değerlerinin düşürülmesiyle aynı kesitteki iletim hattından daha fazla güç aktarılması sağlanır.

Enerji iletim ve dağıtım şebekelerinde seri kapasitörlerin haricinde şönt kapasitörler de kullanılmaktadır. Şönt kapasitörlerin tesis edilmesiyle hattan çekilen reaktif güç değerinin bir bölümü karşılanmış olur. Şönt kapasitörlerin şebekeye olan katkısı ile hatta meydana gelen kayıplar azaltılarak geriliminde yükselmesi sağlanır. Kayıpların azalması ile elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinin kapasiteleri artmış olur. Bu sayede daha fazla güç ihtiyacını karşılayabilirler. Ayrıca havai hatlar ile birlikte tesis edilen yeraltı hatları ile yeraltı kablolarının kapasitif etkileri ile hattın kapasitif güç ihtiyacı karşılanabilir.

2.7. Havai Hatları ile Enerji Taşınması

Elektrikle enerji taşınması yüksek gerilimli havai hatlar ve yeraltı kabloları ile yapılabilirse de özel şartlar zorlanmadıkça, teknik ve ekonomik avantajlardan dolayı, taşınmanın havai hatlar ile yapılması tercih edilmektedir [31].

Bir havai hat ile enerji taşınması sistemi kurulurken karşılaşılan ilk problem pratik ve teknik bakımdan uygun bir hat güzergâhının tespitidir. İkinci bir problem hava hattında kullanılacak elemanların tipidir. Bir havai hat sisteminde başlıca kullanılan elemanlar aşağıda sıralanmıştır.

2.7.1 Direkler

Direkler iletkenleri birbirinden ve yerden belli mesafelerde tutmaya yarar. Bir havai hatta direkleri çeşitli yönlerden sınıflandırabiliriz. Yapıldıkları malzemelere göre direkler ağaç, beton ve demir konstrüksiyon olmak üzere üçe ayrılırlar. Özel şekilde hazırlanmış bulunan ağaç direkler enerji taşınmasında ancak sınırlı maksatla kullanılabilirler. Demir malzemedен tasarruf sağlayan beton direkler, bu tip direklerin taşınması ve faydalanılması mümkün yerlerde kullanıldıkları takdirde, ekonomiktir [33]. Buna rağmen her ihtiyaca cevap verebilecek olan direkler ancak demir profillerden konstrüksiyon suretiyle hazırlanan direklerdir.

Diğer yandan, direkleri kullanıldıkları amaçlara göre de sınıflandırmak mümkündür. Bu bakımdan taşıyıcı, durdurucu, nihayet, köşe, dağıtma gibi çeşitli direk tipleri bulunmaktadır.

2.7.2 İzolatörler

Hava hatlarında kullanılan iletkenler çıplak olduklarından, bir taşıma hattının izolasyonu doğrudan doğruya iletkenleri direklerden izole eden izolatörler ile sağlanmaktadır. Havai hatlarda kullanılan izolatörler çoğunlukla porselenden yapılır. Bunun haricinde sertleştirilmiş camdan yapılan izolatörlerde bir dereceye kadar kullanılmaktadır.

İzolatörler yapılış şekillerine göre fincan tipi ve zincir tipi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [33]. Havai hatlarda kullanılan izolatörlerin hem elektrik hem de mekanik dayanıklılık bakımından maksadına uygun olmaları gerekir.

2.7.3 İletkenler

Havai hatlarda genellikle konsentrik damarlı (örgülü) konstrüksiyona sahip masif iletkenler kullanılır. Bu suretle gerekli esneklik sağlandığı gibi, titreşim nedeni ile iletkenlerin askı noktalarında zedelenmeleri önlenir.

Havai hatlarda özel maksatlar için başka tip iletkenler, örneğin, ortası boş örgülü iletkenler, demet iletkenler, bakır kaplı çelik iletkenler de kullanılmaktadır. Yapıldıkları malzeme itibarıyla havai hat iletkenleri bakır, alüminyum, çelik-alüminyum, bronz, kadmiyumlu bakır olabilir [33]. İletkenlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin birlikte göz önünde tutulmaları gerektiğinden, çeşitli iletken malzeme arasında kesin çizgilerle belirtilen bir mukayese yapılması zordur. Buna rağmen, üstün özelliklerinden dolayı, havai hatlarda birinci derecede bakır ve çelik-alüminyum iletkenlerin kullanıldıklarını ve ancak özel ihtiyaçlar karşısında başka malzemelerden yapılmış değişik konstrüksiyona sahip iletkenlerden faydalanılmaktadır.

2.8. Yeraltı Kabloları ile Enerji Taşınması

Aynı gerilim ve yük şartları altında yeraltı kabloları havai hatlara göre daha pahalı olduğundan, özel şartlar zorlanmadıkça, enerjinin iletilmesi öncelikle havai hatlar kullanılarak taşınması ekonomiklik açısından uygun olacaktır. Yeraltı kabloları

ile enerji iletimi ve dağıtımı, ekonomik nedenlerden dolayı daha üstün birtakım avantajlar bulunduğu zaman yapılır [31]. Örneğin:

- Şehir içlerinde yeraltı kabloları ile enerji iletimi havai hatlara göre daha avantajlıdır.
- Denizaltı enerji iletimi ancak yeraltı kablolarla yapılabilir.
- Santral ve şalter istasyonlarındaki tünel ve kanal gibi kapalı mahallerde sadece yeraltı kabloları kullanılabilir.

Gerekli olan esnekliği sağlamak üzere, yeraltı kabloları da hava hattı iletkenleri gibi damarlı konstrüksiyona sahip malzemelerden yapılmaktadır. Ancak, havai hatlarda sadece konsentrik damarlı konstrüksiyona sahip iletkenler kullanıldığı halde, yeraltı kablolarında mümkün en küçük hacmi elde etmek üzere, ayrıca kompakt damarlı konstrüksiyonda kullanılır [31]. Buna rağmen havai hatlarda iletken kesitleri yuvarlaktır. Yeraltı kablolarında ise çok damarlı yeraltı kablolarında, kablo çapını mümkün mertebe düşürebilmek üzere, bazı hallerde faz kesitleri daire dilimi tarzında tertiplenmiş iletkenler de kullanılmaktadır.

Yeraltı kablolarında iletken malzeme olarak bakır veya alüminyum kullanılabilir. Buna rağmen, alüminyum yeraltı kablolarında havai hatlardaki kadar faydalı bir malzeme olmadığından, yeraltı kabloları çoğunlukla bakırdan yapılmaktadır. Yeraltı kablolarında iletken malzemenin mekanik dayanıklılığı önemli değildir. Bu nedenle, elektriksel geçirgenlikten kaybetmemek üzere, yeraltı kablolarında soğuk haddeden geçirilmiş bakır yerine geçirgenliği %100 kabul edilen tavlı bakır kullanılmaktadır.

Yüksek gerilimli yeraltı kablolarında izolasyon vazifesini su geçirmez özellikli kâğıt görür. Bu kâğıt, bantlar halinde ve üst üste bindirerek sıkıca iletkenin etrafına sarılır. Kâğıt izolasyonlu kabloları yağ kanalsız ve yağ kanallı olmak üzere ikiye ayrılır. Birinci grup kablolarda kâğıt izolasyon viskozitesi kalın bir yağ ile su geçirmez hale getirilir ve bundan sonra kablonun kurşun kılıf ve diğer kısımları tamamlanır. Böyle bir kablo kesildiği zaman yağ akmaz. Yağ kanallı ikinci grup kablolarda ise, kablo yapımı tamamlandıktan sonra viskozitesi ince bir yağ kullanılarak kâğıt izolasyon su geçirmez hale getirilir. Bu maksatla kablo nihayetlerinde yağ tankları ve kablonun kendi içinde özel yağ kanalları bulunur. Birinci grup kablolarda iç basınç kendi haline bırakılmış olup, normla çalışma halinde atmosfer basıncının altına

düşebilir. İkinci grup kablolarda, izolasyon her türlü çalışma şartlarında atmosfer basıncından daha büyük bir basınç altında tutulur. Kablolarda izolasyonu korumak üzere izolasyonun üzerine kurşun veya alüminyum olabilen kılıf geçirilir ve bu kılıfı korumak üzere de koruyucu bir veya birkaç tabaka ve lüzum görülen hallerde ayrıca çelik bandaj kullanılır.

Kablolar çeşitli yönlerden sınıflandırılabilir. Kabloları kol sayısına göre tek kollu ve çok kollu diye ikiye ayırabiliriz. Her iki tip kablonun da kullanılma yeri vardır. Tek damarlı kablolar genellikle en yüksek gerilim ve en büyük kesitler için uygundur. Ekonomi sağlamak amacıyla yapılan çok damarlı kabloların çok yüksek gerilimlerde ve büyük iletken kesitlerinde pratiklik bakımından kullanılmayacak derecede ağır ve hantal olacaktır.

Çok damarlı kablolarda izolasyonu zorlayan maksimum gerilim fazlar arasında veya faz ile toprak arasında bulunabilir. Böyle bir halde kablo izolasyonunun bu husus göz önünde tutularak yapılmış olması gerekmektedir. Çok damarlı kabloları bu bakımdan izolasyon şekillerine göre kuşak izolasyonlu ve ekranlı olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Kuşak izolasyonlu kablolarda her bir kolun kendi izolasyonundan başka bütün kolları kuşak tarzında içine alan ilave bir izolasyon daha vardır. Bu nedenle, belli bir maksimum gerilim şartı altında, faz izolasyonu nispeten zayıf tutulabilir. Ekranlı kablolarda faz izolasyonlarının üstünde ince metal gömlekler ve bütün metal gömlekleri çevreleyip hepsine temas ederek eşit potansiyelde bulunmalarını sağlayan bir metal kuşak vardır. Bu nedenle ekranlı kablolarda faz izolasyonlarının kuşak tipi kablolardakine göre daha kalın olması gerekir. Ekranlı kablolar daha pahalı fakat en yüksek gerilimlere göre yapılabilirler.

Taşıma sistemlerinde aşırı gerilimlerin toprağa göre büyüklükleri ve devam süreleri taşıma sisteminin nötr noktasının topraklanıp topraklanmadığına göre değişir. Nötr noktası topraklanmış sistemlerde aşırı gerilimlerin büyüklükleri ve devam süreleri nötr noktası topraklanmamış sistemlere göre daha küçük ve daha kısadır. Bu nedenle nötr noktası topraklanmış sistemlerde kablo izolasyonu nispeten daha ince olabilir.

2.9. Reaktif Güç Kompanzasyonu

Çağımızda gelişmiş ülkeler, artan enerji ihtiyaçlarını karşılanabilmek amacıyla yeni enerji kaynakları araştırırken, mevcut kaynaklarını en verimli şekilde tüketme çabası içine girmişlerdir.

Mevcut kaynaklardan en çok kullanılanı ve ihtiyaç duyulan olan elektrik enerjisi, üretim noktasından son kullanıcıya kadar maksimum verimle taşınması gerekmektedir. Günümüzde artan maliyetler, hammadde sıkıntısı gibi nedenlerle elektrik enerjisinin pahalılaşması, iletilen ve dağıtılan enerjinin de iş yapmayan, hatta ekstra yük bindirerek kapasiteyi azaltan bileşenlerinden arındırılması gerekmektedir.

Yapısı itibarıyla manyetik alan meydana getirerek çalışan endüktif özellikteki makineler aktif enerjinin yanında reaktif enerjiye de ihtiyaç duymaktadır. Bu cihazlar hattan hem aktif güç hem de reaktif güç çekmektedirler. Elektrik üretim şebekelerinden son alıcıya kadar akım, aktif ve reaktif bileşenleri olarak iletilmektedir. Reaktif akım manyetik alan prensibine göre çalışan makinelerde manyetik alan üretimini sağlarken, şebekede bulunan diğer havai hat, transformatör, şalt malzemeleri ve yeraltı kablolarında kayıplara neden olmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu yapılarak hatlarda oluşan reaktif akımı gidererek, enerji nakil hatlarının, transformatörlerin ve şalt malzemelerinin kapasiteleri arttırılmış olacak ve bu sayede aynı şebeke malzemeleri ile daha fazla güç aktarılması sağlanabilecektir. Sadece bir defa tesisi için harcanan ve bakım maliyetleri dışında ekstra bir maliyet ödenmeden hem üretici hem de tüketiciler açısından yüksek faydalar sağlanmış olacaktır.

Reaktif gücün aktif güç ile birlikte elektrik santrallerinde üretilip son alıcıya kadar birlikte taşınmasına gerek yoktur. Bunun yerine ihtiyaç duyulan noktada üretilerek tüketilmesi verimlilik açısından en uygun olanıdır. Bu sayede hattın verimliliği yükselecektir [30]. Reaktif güç kompanzasyonu, çeşitli noktalarda ve farklı metotlar kullanılarak reaktif gücün kompanze edilmesi işlemidir.

Güç ihtiyacının artması ile daha yüksek güçlü elektrik üretim santralleri tesis edilmiş ve üretim noktaları ile yükler arasındaki mesafeler oldukça artmıştır. Bu nedenle kompanzasyona olan ihtiyaca neden olmuştur. İlk zamanlarda güçlerin düşük olması sebebiyle reaktif güç ihtiyacı küçük senkron motor ve kapasitörler ile karşılanmasına rağmen güçlerin artmasıyla bunların yerini kompanzasyon sistemleri ile karşılanma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Çok yüksek gerilimle enerji nakil hatlarının

ortaya çıkmasıyla da şönt reaktörler ve seri kapasitörler önemli kompanzasyon cihazları olarak oluşturulmuştur.

2.9.1 Tanımlar

2.9.1.1 Reaktif Güç

Elektrik enerjisi dağıtımında büyük oranda alternatif akım kullanılmaktadır. Alternatif akımı oluşturan bileşenlerden biri olan aktif bileşen, elektrik motorlarında mekanik gücü, omik yük olan ısıtıcılarda teknik gücü, aydınlatma lambalarında ise aydınlatma gücünü oluşturan faydalı, iş yapan bileşendir. İş yapmayan güç olarak görülen reaktif bileşen ise, elektrik motorları, transformatörler, reaktörler ve jeneratörlerde manyetik alanı oluşturan mıknatıslanma akımı olarak da bilinir. Reaktif akım bileşenlerinden endüktif akım, manyetik alanı oluştururken hattan çekilir, manyetik alan yok olunca hatta geri verilir. Söz konusu hareketi ile reaktif bileşen şebeke ve yük arasında kesintisiz bir şekilde uygulanan frekansın iki katı oranda bir frekansla salınım yapar [35].

Reaktif güç sadece alternatif akıma ait bir özellik olup, endüktif reaktif güç ve kapasitif reaktif güç olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Transformatörler, asenkron motorlar, redresörler, bobinler, güç konvertörleri, endüksiyon ocakları, kaynak makineleri, sürücüler ve floresan, cıva buharlı, sodyum buharlı, neon lamba balastları etkin güçlerinin yanı sıra endüktif reaktif güç de çekerler. Manyetik alan oluşturdıkları için endüktif güç çeken bu aygıtlara karşılık, arı direnç olan elektrik ocakları, ısıtıcılar, ütüler, akkor telli lambalar yalnız etkin güç çekerler, endüktif veya kapasitif etkin güç çekmezler. Kablolar ve kondansatörler gibi kapasitif etki mantığı ile çalışan cihazlar ise kapasitif reaktif güç çekerler.

Tüketicilerin şebekeden çekmiş olduğu görünür güç [35]:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (2.30)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Aktif güçte akım ve gerilim arasında faz farkı yoktur. Endüktif özellikteki şebekelerde, akım ile gerilim arasında θ açısı kadar faz farkı vardır ve akım gerilimden geridedir.

Şekil 2.8 incelendiğinde güç ve akım bileşenleri [35],

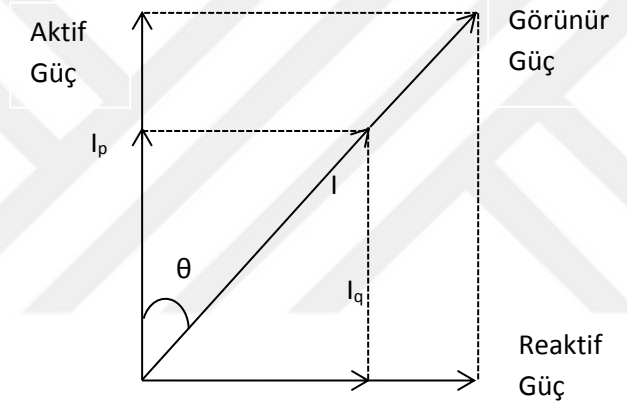
$$P = S \cdot \cos\theta \quad (2.31)$$

$$I_p = I \cdot \cos\theta \quad (2.32)$$

$$Q = S \cdot \sin\theta \quad (2.33)$$

$$I_q = I \cdot \sin\theta \quad (2.34)$$

şeklinde olup I ile I_p veya S ile P arasındaki θ açısına faz açısı, bu açının kosinüsüne de güç faktörü (kat sayısı) denilmektedir. Ayrıca hat akımı, görünür güç ve bunları oluşturan bileşenleri arasında aşağıdaki bileşenler bulunmaktadır [29].



Şekil 2.8. Endüktif bir tüketicinin akım ve güç bileşenleri [29]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.35)$$

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.36)$$

Endüktansların reaktif güç tükettiği, buna karşıt kapasitörlerin reaktif güç ürettiği kabul edilmektedir. Üretilen (-), tüketilen güç (+) olarak gösterilmesi ile her iki durumda da toplam güç daima artı olmaktadır. Dolayısıyla Denklem 2.38' den elde edilen değer daima artı olmakta, reaktif gücün üretildiğini veya tüketildiğini belirtememektedir. Yüklerin genellikle reaktif enerji tüketir şekilde olmasına rağmen, $\cos\theta$ tanımının tam olabilmesi için bu enerjinin tüketildiği durumlarda endüktif, üretildiği durumlarda ise kapasitif eklerinin ilave edilmesi gerekmektedir.

2.9.1.2 Reaktif Güç Tüketen Cihazlar

Alternatif akımda manyetik veya statik alan prensibine göre çalışmakta olan yükler şebekeden aktif gücün yanında reaktif güçte çekmektedir. (Ayrıca bazı çalışma durumlarında reaktif güç de vermektedir.) Şebekeden reaktif güç çeken bazı elektrikli cihazlar aşağıda belirtilmiştir [36].

- Transformatörler
- Düşük uyartımlı senkron cihazlar
- Endüksiyon ve ark fırınları
- Havai hatlar
- Floresan, sodyum buharlı lamba balastları
- Redresörler
- Bobinler
- Senkron motorlar
- Kaynak makineleri

2.9.1.3 Reaktif Güç Üreticileri

Alternatif akımla çalışan sistemlerin ihtiyacı olan reaktif gücü karşılamak için kullanılacak olan malzemeler [36];

- Dinamik faz kaydırıcılar,
- Senkron makineler (aşırı ikazlı)
- Statik faz kaydırıcılar,
- Kondansatör gruplarıdır.

Reaktif güç üreticilerinden kondansatörlerin kayıplarının oldukça düşük olması, bakımlarının kolay ve masraflarının düşük olması ve ihtiyaç olan yerlerin hemen yanına ve ihtiyaç olan büyüklükte kurulabilmesi gibi üstünlüklerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir.

Dinamik Faz Kaydırıcılar: Dinamik faz kaydırıcılar içinde en çok bilinen ve kullanılan senkron makinalardır. Bu motorlar çalışma prensibi olarak aşırı uyarılacak olurlarsa, şebekeden boşta çalışma kayıplarını karşılayacak kadar etkin güç çekerler. Buna karşılık, kondansatör gibi çalışarak şebekeye kapasitif güç verirler. Sonuç olarak bir manada endüktif güç üreticisi gibi çalışırlar. Bu özelliği ile güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan senkron motorlara senkron kompanzatör denilmektedir.

Günümüz teknolojilerinde güç kondansatörleri ile kompanzasyon yapıldığından dolayı senkron kompansatörler neredeyse önemini tamamen yitirmiş, var olanların dışında artık kullanılmamaktadır. Çünkü güç kondansatörleri ile kıyaslandıklarında, senkron kompansatörlerin kuruluğu pahalı, kayıpları fazla, bakım giderleri yüksektir.

2.9.2 Düşük Güç Faktörü

Şebekenin güç faktörü yüklerin güç faktörü değerleri ile doğrudan alakalıdır. Yüklerin özellikleri gereği oluşan güç faktörü belirli limitlerin altında kaldığı sürece (1'e yakın olduğu sürece) şebekenin de güç faktörü aynı oranda olacaktır. Güç faktörünün düşük olması ile şebekeye etkileri ise aşağıda belirtilmiştir [36].

Mevcut olan şebekeler kurulacak ve kurulu olan tesislerde,

- Şebekeyi besleyen trafo ve jeneratörlerin kurulu güçlerinin arttırılmasına,
- İletim ve dağıtım kablolarının kesitlerinin yükselmesine, kullanılan şalt malzemelerinin büyümesine,
- Tüm şebekenin veriminde azalma oluşmasına,
- Yüksek gerilim düşümü ve kayıplara sebebiyet verir.

Tüketici yönünden kurulacak ve kurulu olan tesislerde,

- Alıcı transformatörün, şalt malzemelerinin olması gereken değerlerden yüksek güçte seçilmesine,
- Kabloların kesitlerinin büyümesine,
- Trafo tesisatının yüklenebilme oranının azalmasına,
- Hattan çekilen reaktif gücün artmasına,
- Kayıpların artmasına, gerilim düşümünün yaşanmasına sebebiyet verir.

2.9.3 Güç Kompanzasyonunun Sisteme Getirdiği Yararlar

2.9.3.1. Şebeke Yüklene Kapasitesinin Arttırılması

Güç kompanzasyonun tesis edilmesiyle, reaktif akım kompanzasyon sistemi tarafından karşılanacağından, şebekeden çekilen akım değeri küçülecektir. Şebekeden çekilen akımın azalması ile transformatörlerin, ana ve tali hatların daha az yüklenmelerine neden olacak ve kapasiteleri artacaktır. Buradan hareketle güç kompanzasyonu, kurulu oldukları sistemlerde aşırı yüklenmelerin önüne geçecektir.

Eğer şebekede güç fazlalığı yoksa sistem kapasitesini arttırarak ilave güç desteği sağlayacaktır.

2.9.3.2 Sistem Kayıplarının Azaltılması

Elektrik sisteminde meydana gelen enerji kayıplarının tamamıyla ortadan kaldırılması veya azaltılması için reaktif güç kompanzasyon sistemi kurmak yeterli bir neden olmasa da büyük oranda önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Yapılan araştırmalar sonucunda endüstriyel ve yerleşim yerlerini besleyen dağıtım sistemlerinde, enerji kayıpları ($I^2 \cdot R_1$) yükün en yoğun olduğu dönemlerde ve minimum yük saatlerinde, hattaki iletken kesit ve mesafelerine göre değişmekle birlikte hattın toplam gücünün ortalama %2,5 – 7,5 arasındadır. Kompanzasyon yapılmadan önce ve sonra çekilen akımlar [35]:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi_1} \quad (2.37a)$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi_2} \quad (2.37b)$$

buradan hareketle akımda meydana gelen yüzde artış değeri [35]:

$$\%i = \left(1 - \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right) \cdot 100 \quad (2.38)$$

olacaktır. Fakat uygulamada sisteme ait kablo kesiti belirlenirken, kompanzasyon sisteminin devre dışı kalmasında seçilen kablo kesitinin yeterli olmayacağı sonucu ortaya çıkacağından, kompanzasyon nedeniyle akım azalması dikkate alınmamaktadır.

Kompanzasyon yapılmadan önce ve sonra görünür güçler aşağıdaki şekilde bulunmaktadır [35]:

$$S_1 = \frac{P}{\cos\phi_1} \quad (2.39a)$$

$$S_2 = \frac{P}{\cos\phi_2} \quad (2.39b)$$

buradan hareketle görünür güçte meydana gelen yüzde artış değeri [35]:

$$\%S = \left(1 - \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right) \cdot 100 \quad (2.40)$$

olacaktır. Kompanzasyon yapılmadan önce ve sonra etkin güçler aşağıdaki şekilde bulunmaktadır [35]:

$$\Delta P_1 = 3 \cdot \left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cos\phi_1} \right)^2 \cdot R \quad (2.41a)$$

$$\Delta P_2 = 3 \cdot \left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cos\phi_2} \right)^2 \cdot R \quad (2.41b)$$

buradan hareketle etkin güçte meydana gelen yüzde artış değeri [35]:

$$\%p = \left(1 - \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right)^2 \cdot 100 \quad (2.42)$$

olacaktır. Kompanzasyon yapılmadan önce ve sonra reaktif güçler aşağıdaki şekilde bulunmaktadır [35]:

$$\Delta Q_1 = 3 \cdot \left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cos\phi_1} \right)^2 \cdot X \quad (2.43a)$$

$$\Delta Q_2 = 3 \cdot \left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cos\phi_2} \right)^2 \cdot X \quad (2.43b)$$

buradan hareketle etkin güçte meydana gelen yüzde artış değeri [35]:

$$\%q = \left(1 - \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right)^2 \cdot 100 \quad (2.44)$$

olacaktır. Güç faktörünün düzeltilmesiyle, sistem kapasitesi artırılarak bu artış kullanılacak olursa, görünür güç değeri değişmeyecektir. Görünür gücün değişmemesinden dolayı sistemlerdeki kayıplarda aynı kalacak ve değişmeyecektir. Ancak etkin gücün artmasıyla kayıpların yüzde oranı düşecektir.

2.9.3.3 Gerilim Düşümünün Sağlanması

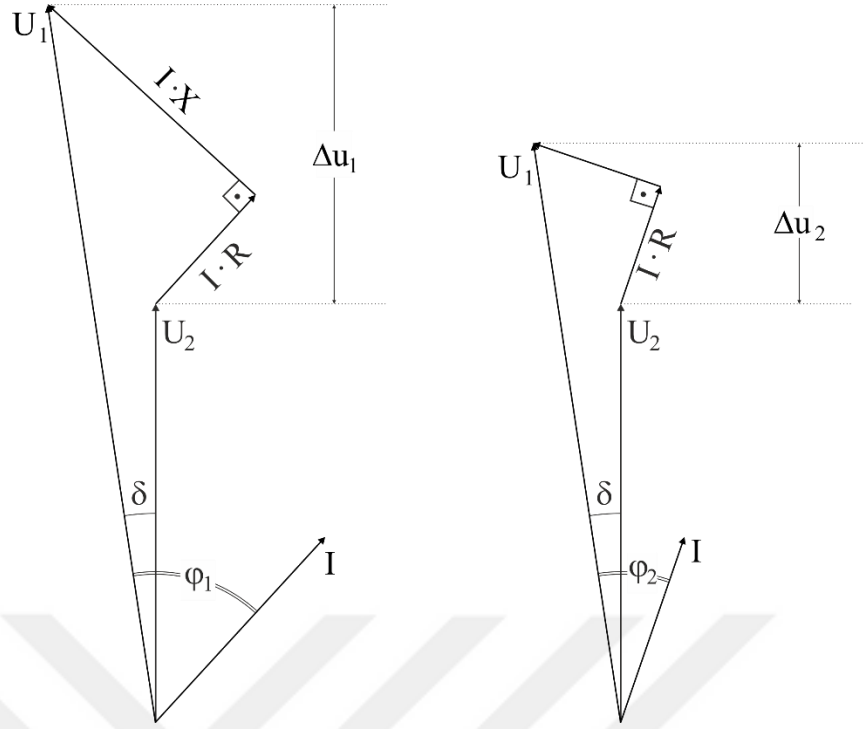
Enerji dağıtım sistemlerinde reaktif gücün negatif olduğu anlarda şebekede gerilim yükselmeleri meydana gelmekte, diğer durumlarda ise gerilim düşümü meydana gelmektedir. Buradan hareketle reaktif güç kompanzasyonu gerilim düzenlemesinin sağlanması için kullanılabilir. Reaktif güç kompanzasyonunun gerilim kontrolü için kullanılabilecek iki yöntemi bulunmaktadır [37].

- **Şönt kompanzasyon;** kompanzasyon sisteminde şebekeden reaktif güç çekilmesi veya verilmesi ile güç faktörünün minimum değerine indirgenmesidir.
- **Seri kompanzasyon;** şebekede seri kompanzatörler eklenmesiyle hattın endüktif empedansının küçültülmesidir.

Yukarıda anlatılan gerilimin kontrol etme tekniklerinden çoğunlukla şönt kompanzasyon kullanılmaktadır. Diğer yöntem seri kompanzasyon ise genellikle geçici durumlarda kararlılığın yükseltilmesi amacıyla tesis edilmektedir.

Burada bir ana noktanın gözden kaçırılmaması gerekmektedir. Buda enerji dağıtım sistemlerinde gerilimin kontrol edilmesi için santral ve dağıtım merkezlerindeki jeneratör ve trafo gerilim kademeleri ile ayar yapılmasıdır. Ancak kademe ayarlarının eksik kaldığı durumlarda güç kompanzasyonu yapılmalıdır.

Reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan kondansatörlerin yapısı gereği gerilimi yükseltici özelliği bulunmaktadır. Şekil 2.9' daki fazör diyagramları incelenecek olursa, kondansatör kullanımının gerilimi yükselttiği görülmektedir. Şekil 2.9a'da hatta kompanzasyon yapılmadan önceki durum, Şekil 2.9b'de ise kompanzasyon yapıldıktan sonraki durum görülmektedir. Burada X ve R değerleri hattın reaktif ve aktif dirençlerini, U_1 hat başı gerilimini, U_2 hattın sonundaki gerilimi, Δu boyuna gerilim düşümünü ve ϕ faz açısını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kompanzasyon öncesi gerilim değeri kompanzasyon sonrası gerilim değerinden daha büyüktür. Bu da gerilim düşümlerinin kompanzasyon sonrasında azaldığını göstermektedir.

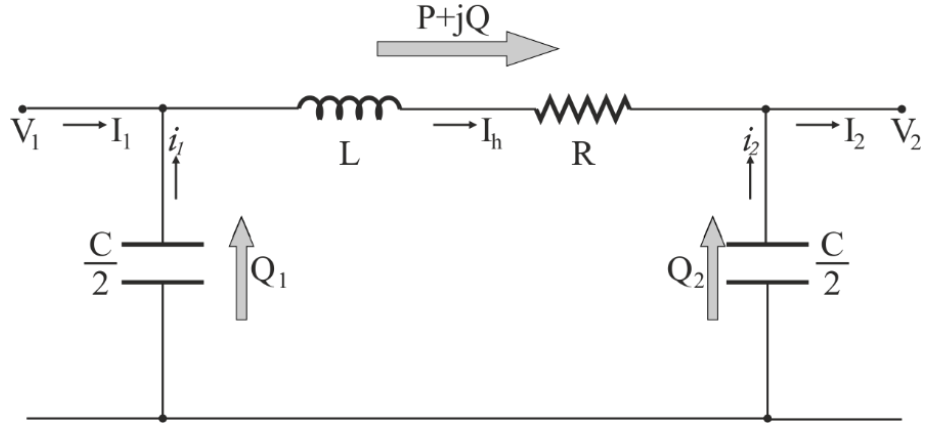


Şekil 2.9. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisi [38]

2.9.4 Sistemin Reaktif Enerji Gereksinimleri

İletim ve dağıtım sistemlerinde bulunan havai hatlar ve kablolar ile transformatörlerin de reaktif enerjiye ihtiyaçları vardır ve yükler gibi bunların da uygun çalışabilmelerini sağlamak için bu enerjinin karşılanması gerekmektedir.

- Transformatörlerde elektrik enerjisinin sargıları arasında enerji transferi için, manyetik alanın oluşmasına ihtiyaç duyar. Bu manyetik alanın oluşturulmasında her zaman reaktif enerji tüketilir. Bu oran toplam akımın %3'ü oranında reaktif akım değerine denk gelmektedir.
- Enerji hatları ise besledikleri yüke göre reaktif enerjiyi üretip tüketebilirler. Gerilimin düşmesinin ve yükselmesinin meydana gelmediği varsayılırsa, enerji hattının kapasitansı nedeniyle üretilen reaktif güç, taşınan yükün gücünden bağımsızdır. Bu sebeple, enerji hattının seri endüktasında tüketilmekte olan reaktif enerji hatta taşınan yükün bir fonksiyonu olarak kabul edilir.



Şekil 2.10. İletim hattının, hat sabitleri ile ifade edilmesi

Enerji hatlarında yükün sürekli ve anlık olarak değişebileceği değerlendirildiğinden, hatlardaki reaktif güç dengesinde yüksek farklılıklar görülebilir. Doğal yük olarak tanımlanmakta olan bu sabit yük değerlerinde, enerji hatlarında üretilen ve tüketilen reaktif enerji eşit olmaktadır.

Matematiksel olarak yukarıdaki durumu daha iyi incelemek mümkündür. Eğer Şekil 2.10'da verilen hattın R'si ihmal edilecek olursa, hattın kapasitans- endüktansları yaygın parametrelerle (birim uzunluk için C ve L) olarak ifade edilirse, Y_L yükü bağlı olan hatta besleme ucundaki admittansı Y_{in} aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir [1].

$$Y_{in} = Y_L \cdot \frac{1 + (\cot \gamma l)^2 + j \cdot (\cot \gamma l) \left(\frac{Y_0}{Y_L} - \frac{Y_L}{Y_0} \right)}{\left(\frac{Y_L}{Y_0} \right)^2 + (\cot \gamma l)^2} \quad (2.45)$$

Hattın doğal admittansı [1],

$$Y_0 = \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.46)$$

Hattın yayılma sabiti [1],

$$\gamma = \sqrt{L \cdot C} \quad (2.47)$$

Yukarıdaki denklemin irdelemesi yapıldığında üç değişik durum ortaya çıkmaktadır.

- Yük admittansı hat doğal admittansına eşit ise, Y_{in} ile Y_0 eşit olacak ve sanal bölüm olmayacaktır, böylece hattın reaktif enerjiye ihtiyacı olmayacaktır.
- $Y_0 > Y_L$ olduğu durumlarda, alıcı uçtaki eşdeğer admittans kapasitif özellikte olacaktır. Böylelikle iletim hattı reaktif enerji üretecektir. Fazla miktarda üretilen reaktif enerji gerilim yükselmelerine neden olmakta, bunun önlenmesi için hattın uçlarına şönt reaktörler yerleştirilmektedir.
- $Y_L > Y_0$ olduğu durumlarda ise, eşdeğer admintans endüktif özellikte olacaktır. Bu durumda iletim hattı enerji tüketicektir. Bu da gerilim düşmelerine neden olmakta ve sisteme şönt kapasitörlerle reaktif enerji basılmasını gerektirmektedir.

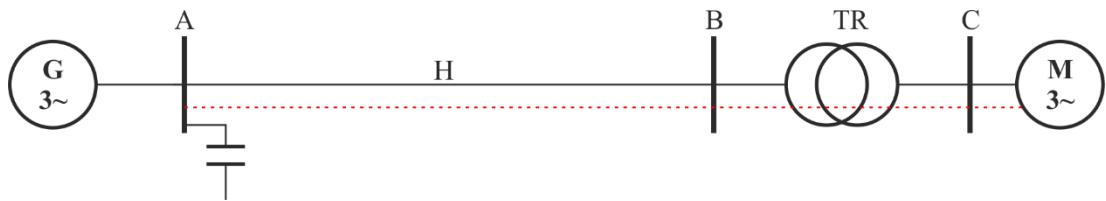
Hatların doğal empedansları ($1/Y_0$) yaklaşık 400Ω , buna karşılık kabloların ise 50Ω civarındadır [1]. Dolayısıyla kabloların reaktif enerjiyi tüketebilmeleri için, yükleri havai hatlara nazaran 8 katı fazla olması gerekmektedir. Bu nedenle kablolar genellikle reaktif enerji üretirler.

2.9.5 Kompanzasyon Kurulacak Noktalar



Şekil 2.11. Kompanzasyon yapılmayan sistemler [39]

Şekil 2.11.' de kompanzasyon sistemi öngörülmemiştir. Güç kompanzasyonu yapılmadığından motorun gereksinimi olan tüm reaktif gücü jeneratör üretmek zorundadır. Kompanzasyon yapılmadığı için, motor besleme hattı, transformatör, iletim hattı ve özellikle jeneratör endüktif akım ile boşuna yüklenir.



Şekil 2.12. Jeneratörün A barasına kompanzasyon yapılan sistemler [39]

Şekil 2.12.' de jeneratörün A barasında kompanzasyon yapılmıştır. Bu yapılan kompanzasyon sisteminde sistemde görülecek iyileştirme etkisi sadece jeneratörde görülecektir. A barasından sonraki sistemde etki görülmecektir.



Şekil 2.13. Transformatörün B barasına kompanzasyon yapılan sistemler [39]

Şekil 2.13.' de transformatörün yüksek gerilim tarafındaki B barasında kompanzasyon yapılmıştır. Kompanzasyonun iyileştirme etkisi jeneratörün yanı sıra iletim hattında da görülecektir.



Şekil 2.14. Transformatörün C barasına kompanzasyon yapılan sistemler [39]

Şekil 2.14.' de transformatörün alçak gerilim tarafındaki C barasında kompanzasyon yapılmıştır. Kompanzasyonun iyileştirme etkisi jeneratör ve iletim hattın yanı sıra transformatörde de görülecektir.



Şekil 2.15. Motor uçlarının bağlı olduğu noktaya kompanzasyon yapılan sistemler [39]

Şekil 2.15.' de motor uçları olan D noktasında kompanzasyon yapılmıştır. Kompanzasyonun iyileştirme etkisi tüm devre elemanlarında görülecektir.

Bu incelemeden çıkan sonuca göre, teknik açıdan kompanzasyonun yapılacağı en uygun yerin tüketicinin bulunduğu yer olarak görülmektedir. Ayrıca dikkat edilmesi gereken önemli konu ise kompanzasyondan en büyük yararlanmayı sağlayabilmek için, kompanzasyonun kurulacağı yer hem teknik hem de ekonomik açıdan değerlendirilmelidir.

2.9.6. Birli (Tekil) Kompanzasyon

Şebekede bulunan yüke uygun değerde ayrı bir kondansatör bağlanarak yapılan kompanzasyon modelidir. Bu model genellikle büyük güçlü cihazların bulunduğu, yükün ve güç katsayısının sabit olduğu ve yükün sabit olarak kısa süreli devrede kaldığı zamanlarda kullanılır. Birli kompanzasyon özellikle asenkron motorlara, transformatörlere ve boşalmalı (floresans lamba vb.) yüklere uygulanmaktadır.

Birli Kompanzasyon Üstünlükleri: Kompanzasyon doğrudan endüktif gücün üretildiği noktada yapıldığından, teknik açıdan kompanzasyon için en uygun yerdir.

- Bu noktaya kadar olan transformatörlerden ve kablolardan çekilen kompanzasyonlu akım azalacağından, bunların üzerindeki güç kayıpları ve gerilim düşümü azalır.
- Kondansatör doğrudan yükün uçlarına bağlı olduğundan, yüklerle birlikte aynı şalterle devreye girip-çıkacağı ve kompanzasyon rölesine gerek kalmayacağından dolayı ekonomiktir.

Birli Kompanzasyon Dezavantajları

- Bir tek büyük güçte kondansatör yerine tüketim alanına dağılmış birden çok küçük güçte kondansatör gerektirdiğinden pahalı, bakımı ve denetlemesi zordur.
- Uzun süre devrede kalmayan yüklerde kondansatörlerden yararlanma oranı düşük olur.

2.9.7. Toplu Kompanzasyon

Birçok yükün toplu olarak bir arada bulunduğu durumlarda her alıcıda birli kompanzasyon yapmak yerine, birden çok motor veya floresans lamba kümesi için bir tek sabit kompanzasyon yapmak daha kullanışlı ve ekonomik olabilir. Toplu kompanzasyon genellikle 10 kW'tan [39] küçük motorlar için uygundur. Toplu kompanzasyonda kondansatörler de motorlarla veya floresans lambalarla birlikte aynı şalterlerle devreye girer çıkarlar.

Toplu Kompanzasyon Üstünlükleri

- Birden çok küçük güçte kondansatör yerine bir tek büyük güçte kondansatör kullanıldığından ucuz, bakımı ve denetlenmesi kolaydır.
- Kondansatör için ek donanım gerekmediğinden ekonomiktir.

- Transformatörlerden ve besleme kablolarından çekilen akım azalacağından, bunların üzerindeki güç kaybı ve gerilim düşümü azalır.

Toplu kompanzasyonun bu üstünlüklerine karşılık, yükleri besleyen kablolardan çekilen akımda azalma olmayacağından, bunlar üzerinde kompanzasyonun olumlu etkisi görülmez.

2.9.8. Ortak Kompanzasyon

Ortak kompanzasyon büyük tüketim merkezlerinde, tüketim merkezinin tümünü veya bir bölümünü içine almak üzere bir ve birçok noktada, genellikle döşemenin beslediği dağıtım transformatörlerinin çıkışındaki ana tablolarda yapılır.

Ortak kompanzasyon, çok sayıda değişik ve küçük yükler farklı ve kısa sürelerle devrede kalıyorsa, bu yükler sürekli değişiyorsa, işletmede üretim koşulları sıkça değişiyorsa uygulanır ve uygulanmak zorunda kalabilir. Devrede değişik cins yükler bulunduğundan kompanzasyonun otomatik yapılması gerekir. Kondansatör kümeleri gereken güç katsayısına göre otomatik olarak devreye girerler-çıkırlar.

Ortak Kompanzasyonun Üstünlükleri

- Kondansatörlerden yararlanma oranı yüksektir.
- Bir tek noktadan güç katsayısı istenen değere hassas olarak ayarlanabilir.
- Kompanzasyonun ilk kurulumu ve genişletilmesi basittir.
- Kompanzasyon kümelerinin hepsi bir arada bulunduğundan kolay denetlenebilir.
- Sistemin gerilim düzeyinde genel düzelme sağlanır.
- Kompanzasyon otomatik olarak hassas ayarlandığından aşırı kompanzasyon önlenir.
- Toplam kompanzasyon gücü, birli kompanzasyondaki kondansatör güçlerinin toplamından küçük olacağından ekonomiktir.

Tüketim merkezinde birden çok noktada ayrı ayrı ortak kompanzasyon yapılıyorsa, bu kompanzasyonların birbirlerini desteklemeleri için kompanzasyon güçlerinin %20 dolayında büyük seçilmesi uygundur. Ortak kompanzasyon gücünün hesaplanmasında istek gücünün saptanması için AG tablosunun istek katsayısı göz önüne alınır. İstek katsayısı küçükse, ortak kompanzasyon daha da ekonomik olur. Ortak kompanzasyonun bu üstünlüklerine karşılık, ana kablolarda ve besleme kablolarında kompanzasyonun olumlu etkisi görülmez.

2.9.9 Karma Kompanzasyon

Birli kompanzasyon sınırlı yüklere, toplu ve ortak kompanzasyon ise geri kalan yüklere, bu yükler bir araya getirilerek uygulanır. Birli, toplu ve ortak kompanzasyonun birlikte bulunduğu kompanzasyona karma kompanzasyon denir [39].

2.9.10 Kompanzasyon Yöntemleri

2.9.10.1 Dinamik Kompanzasyon

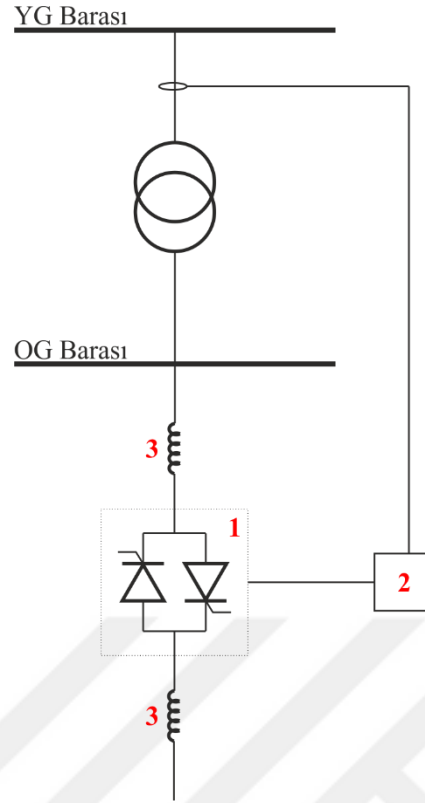
Dinamik kompanzasyon modellerinden bilinen model senkron motorlardır. Senkron motorlar yapısı gereği aşırı uyarılacak olursa, hattan yüksüz çalışma durumunda oluşan kayıpları kapatacak kadar etkin güç çekerler. Aynı zamanda şebekeye kapasitif güç verirler. Burada kondansatör gibi çalıştığından dolayı bu makineler senkron kompanzatör (kondansatör) denilmektedir.

Günümüz kompanzasyon uygulamalarında artık kondansatörler kullanıldığından dolayı statik senkron kompanzatörler uygulama alanlarını yitirmişlerdir. Güç kondansatörleri ile karşılaştırıldıklarında ilk kurulum maliyetleri yüksek, kayıpları fazla ve bakım giderleri yüksektir. Bu nedenlerden dolayı artık tercih edilmemektedir.

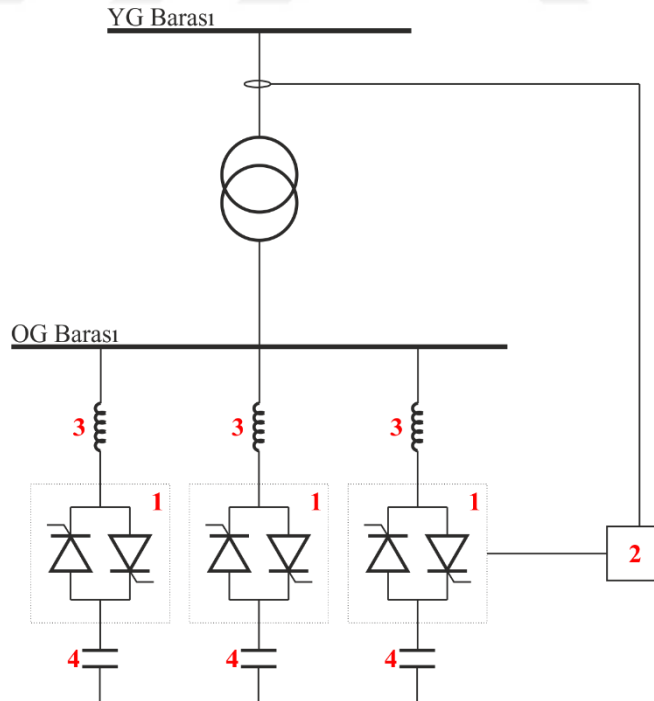
2.9.10.2 Statik Var Kompanzasyon

Son yıllarda yapılan kompanzasyon metotları da teknolojinin gelişmesi ile çeşitlilik kazanmıştır. Statik kompanzasyon genel olarak sürücü olarak kullanılan tristör, reaktör, harmonik filtreler ve tristör anahtarlama kondansatör gruplarından oluşmaktadır. SVC olarak bilinen statik VAR kompanzasyon ilk olarak 1970'li yıllarda YG'de kullanılmıştır. SVC'nin genel olarak aşağıdaki avantajları bulunmaktadır:

- Güç katsayısını çok hızlı bir şekilde düzeltir.
- Gerilim kararlılığı sağlarlar.
- Statik ve dinamik iletim kararlılığını ve güç salınım sönümünü artırır.
- Dengesiz yüklerin bulunduğu şebekelerde yüklerin dengelenmesini sağlar.
- İletim hattında meydana gelen kayıpları azaltır.
- Güç dalgalanmasının azalmasını sağlar.
- İletim hattında meydana gelen ısı kayıplarını azaltır.
- Güç kalitesini ve enerji verimliliğini artırır.



Şekil 2.16. TCR tristör kontrollü reaktör [39]



Şekil 2.17. TSC tristör anahtarlamalı kondansatör [39]

Statik kompanzasyon iki tipte yapılmaktadır. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve Tristör Anahtarlama Kondansatör (TSC) Şekil 2.16. ve 2.17.' de [39] iki tip statik kompanzasyonun sadeleştirilmiş tek hat şemaları görülmektedir.

Şekil 2.16' daki TCR uygulamasında kondansatörlerin tamamı sürekli olarak devrede kalmaktadır. Klasik kompanzasyon sisteminde kondansatörler kademeli olarak devreye girip çıkarken, TCR uygulamasında ise kondansatörler sabit bırakılıp reaktörler devreye alınıp çıkartılarak kompanzasyon sağlanmaktadır. Bu uygulamada reaktörler tristörler yardımı ile kumanda edilmekte ve devreye alınıp çıkartılmaktadır. Burada tristörlerin iletim açısının kontrolü ile aktif güç sıfır ile maksimum değer arasında sürekli ve kesintisiz değiştirilmekte ve ihtiyaç duyulan reaktörler devreye alınmaktadır. TCR'lerde kondansatörlerin devreye alınıp çıkartılırken meydana gelen geçici olay etkisi görülmemektedir.

Şekil 2.17'de TSC uygulamasında TCR'lerin tam tersine, klasik kompanzasyon sisteminde olduğu gibi kondansatörler anahtarlanarak devreye alınıp veya devreden çıkartılır. Fakat burada kondansatörlerin devreye girip çıkmasında meydana gelen geçici olayları önlemek için, tristör gerilim sıfır iken tristörler ateşlenmektedir. TSC'ler TCR'ler ile benzer özellikler göstermektedir. Fakat iki uygulama arasında görülen en belirgin fark, TCR'lerde sadece reaktörler, TSC'lerde ise hem reaktör hem de kondansatörler sürülmektedir. Bu tip uygulamalarda görülen başlıca özellikler:

- Anahtarlama tristörler yardımı ile yapıldığından dolayı sürekli ve kesintisiz kontrol sayesinde tam kompanzasyon sağlanmaktadır.
- Klasik kompanzasyon sistemlerinde meydana gelen geçici olaylar bu tip kompanzasyon modellerinde yaşanmamaktadır.
- Harmonik bulunmamaktadır.
- Kayıplar klasik sistemlere göre oldukça düşüktür.

işletmeler, g trafolarını kendi bünyelerinde barındırmaktadır. Böyle sayacın OG’de bulunduğu işletmelerde alçak gerilim tarafında yapılan klasik kompanzasyon sistemleri reaktif güç sorununu tam anlamı ile gidermemektedir. Özellikle aktif tüketin düşük olduğu, trafonun boşta çalıştığı zamanlarda klasik alçak gerilim tarafında yapılan kompanzasyon sistemleri yetersiz kalmaktadır. Bunun nedenleri:

- Trafodan kaynaklanan endüktif etkinin değişken akımlara göre ayarlanamaması,
- Yapılan kompanzasyon sistemlerinin lme ve cevap hassasiyetlerinin yüksek glerde yetersiz kalması,
- Tketin düşük olduğu zamanlarda çekilen düşük akımlardan dolayı l trafolarının ve l aletlerinin hassasiyetlerinin yetersiz kalması,
- Boşta alışan trafolarda oluşan faz dengesizliğinden dolayı OG tarafta da oluşan reaktif gn endüktif ve kapasitif yönde değiştirici bir durum oluşturması,
- Ölüm sayaçları ile transformatör merkezleri arasında hatların uzunluğunun varlığı oluşturmaktadır.

2.10 şönt Reaktörler

şönt reaktörler, kompanzasyon sisteminin bir parçasıdır. Endüktif g reteleri olarak da adlandırılmaktadır. Hatlarda ferranti etkisi nedeniyle oluşan gerilim yükselmelerini ve reaktif (kapasitif) güç kompanze etmek amacıyla uygulanmaktadır. Ferranti etkisi; kompanzasyon yapılmamış uzun hatlarda şebeke geriliminin 1,2 katına kadar yükselmesidir [40]. Kapasitif özellikteki yüklerin oluşturdukları g şönt reaktörler tüketirler.

şönt reaktörler, yapısı itibariyle endüktif karakterli olarak değerlendirildiklerinden dolayı transformatörlere benzemektedir. Fakat transformatörlerle elektriksel özellikleri, yapıları ve uygulama şekilleri bakımından karşılaştırıldıklarında farklılıklar gösterirler.

2.10.1. şönt Reaktörleri Yapısı

Havai iletim hatları kurulu güçlerinin altında yüklendikleri zaman, reaktif güç üretirler ve bunun sonucunda da hat sonu gerilimlerinde yükselmeler meydana gelir. Ayrıca dağıtım şebekelerinde kullanılan yeraltı kabloları da yapısal karakteristikleri gereği reaktif güç üretirler. şönt reaktörler genel olarak bu iki nedenle oluşan reaktif

gücü kompanze etmek amacıyla kullanılır. Şönt reaktörler şebekeye üç şekilde bağlanmaktadır. Bunlar:

- İndirici merkezlerde baralara bağlanarak,
- Havai hatlara belirli noktalarda doğrudan bağlanarak,
- Transformatörlerin tersiyer sargılarına bağlanarak şebekeye dahil edilirler.

Şönt reaktörler, hava nüveli ve yağa daldırılmış şekilde iki tipte yapılmaktadır. Hava nüveli olanlar 36kV ve altındaki gerilim değerlerinde kullanılmaktadır. Yağa daldırılmış olan tiplerinde ise aralıklı nüveler kullanılmaktadır [41]. Aralıklı nüveler sayesinde nüve doyma bölgesinin dışında tutulur. OG ve YG' de kullanılan şönt reaktörler hattaki yükün azalıp artmasına göre sık aralıklarla devreye girip çıkartılabilecek özelliktedir. Ayrıca şönt reaktör şebekeye bağlandığı yere göre nötr noktası toprağa direkt veya nötr reaktörü ile bağlanabilmektedir.

Yağa daldırılmış tipteki şönt reaktörlerde nüve bacaları aralıklı nüve yapısında aralara mesafe bırakılarak ve bu aralıklara seramik diskler yerleştirilerek nüve bacalarının üst üste dizilmesiyle oluşturulur. Yağlı tip şönt reaktörlerde aralıklı nüve kullanılması sayesinde daha düzenli bir yapı elde edilir. Bu sayede kayıplar azalır, titreşim düşer ve gürültüde önemli ölçüde azalır. Gürültünün azaltılmasında seramik diskler önemli rol oynar. Ayrıca toplam kütle de önemli ölçüde azalmış olur. Bu yapı sayesinde enerji yoğunluğu da yükselir. Yağlı tip şönt reaktörler ile hava nüveli reaktörler karşılaştırıldıklarında manyetik geçirgenlik eğrisinin eğimi daha yüksektir. Hava nüveli yapıda ise nüve veya nüve bacağı kullanılmamaktadır [42].

Şönt reaktörlerin nüve bacaları sac paketlerden oluşturulur. Bu sac paketler aralıklı nüveler için çeşitli yapılarda üretilmektedir. Sac paketleri radyal ve kademeli dizimli şekilde imal edilmektedir. Ayrıca şönt reaktörler bir fazlı, üç fazlı üç bacaklı ve üç fazlı beş bacaklı olarak imal edilmektedir. Yüksek güçlerde kullanılacak olan şönt reaktörler kayıpların düşürülmesi amacıyla radyal dizimli sac reaktör bacaları şeklinde imal edilirler.

Şönt reaktörün çalışma yapısından gereği endüktif yük gibi çalıştığından dolayı, şönt reaktör şebekedeki kapasitif yüklerin tersi olacak şekilde enerji çeker veya verir. Bu olay alternatif akımın her periyodunda sürekli tekrarlanır. Bu durum

endüktası oluşturacak büyüklükteki enerjinin, manyetik alan yardımı ile nüve bacakları ve bacak boyunduruk arasındaki boşluklarda biriktirilip salınması ile gerçekleştirilir. Şönt reaktörler, ihtiyaç duyulan endüktif güce göre farklı güç ve gerilimlerde üretilebilmektedir. Ayrıca şönt ayarlı güç ve gerilim kademesine sahip olacak şekilde üretilmektedir. Güç ve gerilim ayarlı reaktörler, yükte veya boşta kademe değiştiriciler sayesinde yapılmaktadır.

Şönt reaktörlerin nüve bacak aralıkları, anahtarlanmaları, yük altında şebekeden ayrılması, baskın harmoniklere etkisi, histeresiz etkisi ve kayıpları incelenerek elektriksel karakteristiğini belirleyebiliriz.

2.10.1.1 Nüvelere Ait Bacak Aralıkları

Şönt reaktörlerde nüve bacağının belirli aralıklar ile bölünmesinin nedeni, nüvenin doyma bölgesine girmesini engellemektir. Nüve bacak aralıkları milimetre seviyesindedir. Manyetik alan şiddetini yükseltmek amacıyla bu aralıklar bacağına dağıtılır. Transformatörler ile histeresiz açısından karşılaştırıldıklarında B-H eğrisinin eğimi aralıklı nüveye sahip şönt reaktörlerde daha alçaktır. Yani şönt reaktörlerin devreye giriş akımları transformatörlere göre histeresiz bandının dar olması ve kalıcı mıknatıslığının neredeyse olmaması nedeniyle küçüktür. Şönt reaktörlerde aralıklı nüve sayesinde endüktans değerinin oldukça yüksek olması, kayıpların az olması ve sargılarda olan akım değerinin düşük olması sağlanır.

2.10.1.2. Anahtarlama Yapılması

Aralıklı nüve şeklinde imal edilen şönt reaktörler için endüktans değeri değişkendir. Manyetik geçirgenlik manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddetine göre değişir. Gerilim ve akım arasındaki ilişki incelendiğinde bu durum birbirini kesen iki doğru ile gösterilen bir eğri şeklinde ifade edilebilir. Söz konusu eğri ile doyma noktası ile doyma olmayan bölge birbirinden ayrılır. Bu iki doğrunun kesim noktası ise büküm noktası olarak adlandırılmaktadır ve doymanın başladığı yerdir. Büküm noktasında nominal gerilimin 1.25 – 1,35 katı değerler görülmektedir [41].

Şönt reaktörün devreye alınması anında manyetik geçirgenlik yükselir ve büküm noktasının üzerine çıkar. Manyetik geçirgenliğin büküm noktasının üzerine çıkması ile üzerinden giriş akımının 3 ila 5 kat daha büyük kısa süreli bir akımın

geçmesine sebep olmaktadır. Kısa süre akan bu akımın hemen ardından üzerinde sürekli hal akımı dolaşmaya başlar. Doyma bölgesinden sürekli hal bölgesine geçişte akım değeri ile birlikte, manyetik iletkenlikte azalarak sabit bir değer ulaşır. Aynı zamanda sönümlenme süresinde (τ) manyetik geçirgenlikle birlikte düşmektedir.

2.10.1.3. Şebekeden Ayrılmaları

Şönt reaktörlerin şebekeden ayrılması demek akımın birden kesilmesidir. Özellikle yüksek güçlü şönt reaktörlerde akımın aniden kesilmesi nedeniyle ortaya aşırı anahtarlama gerilimleri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu olayın önemle dikkate alınması gerekir ve son derece tehlikeli bir işlemdir. İşletme de kullanılan yeni tip parafudurlar, oluşabilecek olayları karşılayacak şekilde üretilmektedir. Fakat tipik kesiciler için reaktör akımının kesildiği anda ortaya koyacağı davranışı kestirebilmek çok kesin değildir.

2.10.1.4. Şönt Reaktörlerde Baskın Harmonikler

Özellikle kayıpları düşük olan şönt reaktörlerin devreye alınması ve çıkartılması anında zaman sabiti 0-1 saniye arasında değişen frekans değeri 0 olan DC bileşen akımları görülür. Şönt reaktörlerde devreye giriş akımları transformatörlerde görüldüğü gibi diferansiyel akımları şeklinde değil, akım trafoları doyuma ulaşmadığı müddetçe DC bileşen akımları şeklindedir. Ayrıca benzer özelliklerdeki trafolar ile karşılaştırıldıklarında 2' nci harmoniğe ait akımları da küçüktür. Sargılarında bulunan küçük asimetrikler nedeniyle şönt reaktörlerde baskın harmonik 3'ncü harmoniktir. Ayrıca şönt reaktörlerin nötr terminallerinden de 3' ncü harmonik görülebilir.

2.10.1.5. Histeresiz

Aralıklı nüveye sahip şönt reaktörlerde B-H eğrisinin eğiminin transformatörlerle karşılaştırıldığında çok küçük olduğunu belirtilmişti. Bu nedenle şönt reaktörlerin daimî mıknatıslanması yok denecek kadar azdır. Daimî mıknatıslanması çok küçüktür çünkü sargılar arasında bulunan boşluklar histeresiz bandının çok küçük olmasına neden olur.

2.10.1.6. Şönt Reaktörün Kayıpları

Şönt reaktörlerde toplam kayıpları sargı direncinden kaynaklanan kayıplar, nüve mıknatıslanma akımı kayıpları, girdap akımlarından kaynaklanan kayıplar oluşturmaktadır. Fakat en yüksek değerdeki kayıplar sargı direncinden kaynaklanan

kayıplardır ve diğer kayıplar bunun yanında oldukça küçüktür. Şönt reaktörlerin sargılarında kullanılan malzemenin ağırlığı ve oluşan akım yoğunluğunun karesi ile sargı direncinden kaynaklanan kayıplar artarken, nüve sacında oluşan mıknatıslanma kayıpları da nüvede oluşan akı yoğunluğunun karesi oranında yükselir. Toplam kayıp, reaktörlerde güce göre değişiklik göstermektedir. Küçük güçteki şönt reaktörlerde ise toplam reaktif gücün %2 oranında olurken, reaktör gücünün yükselmesi ile bu oran %0,2'ye kadar azalmaktadır. Şönt reaktörlerin kayıplarının oranlarına göre dağılımı, sargılarındaki direnç nedeniyle oluşanlar %60- %70, nüvede meydana gelen kayıplar %20- %30, girdap akımları nedeniyle oluşan kayıplar ise %5- %15 şeklindedir [41].

2.10.2. Şönt Reaktör Uygulamaları

Şönt reaktörler, YG ve OG hatlarının kablolarından kaynaklanan kapasitif etkinin kompanze edilmesinde kullanılmaktadır. Temel olarak etkileri aşağıda sıralanmıştır:

- Ferranti etkisi sebebiyle boşta olan hatlardaki gerilim yükselmesini önlemek,
- Gerilimin düzenli olması için kontrolünün sağlanması,
- Açık devre olan hatlarda reaktif gücün giderilmesi için kompanzasyon yapılması,
- Tek kutuplu yeniden kapamalarda meydana gelen ikincil ark akımlarını giderilmesi şeklindedir.

2.10.2.1 Hatta veya Baraya Bağlanan Reaktörler

Şönt reaktörler şebekelerde iletim hattına veya baraya doğrudan ya da bir anahtarlama elemanı ile bağlanabilirler. İletim hattına bağlanan şönt reaktörler iletim hattının başında ve sonunda tesis edilir. Bu sayede hata her iki yönden ve birbirleriyle bağımsız olacak şekilde enerjilendirilir veya enerjisi kesilebilir. Ayrıca şönt reaktörlerin nötr noktaları doğrudan veya bir nötr topraklama reaktörü üzerinden genellikle topraklanır.

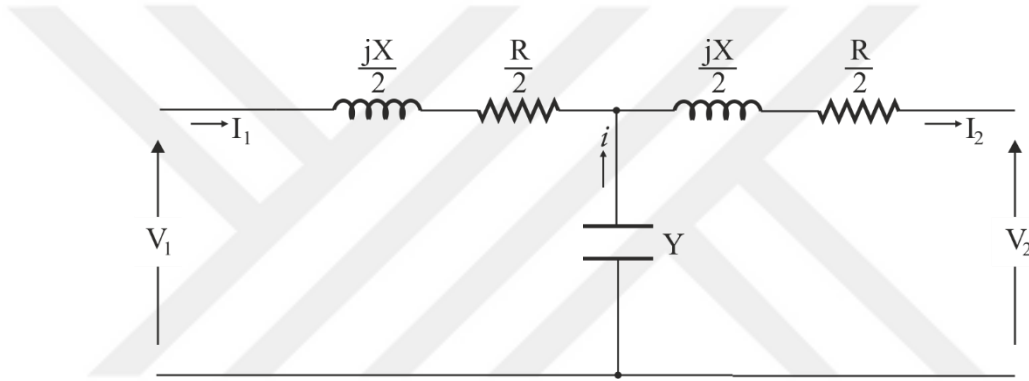
2.10.2.2 Tersiyer Sargısına Bağlanan Reaktörler

Hatta veya baraya bağlanan şönt reaktörlerinin tersine tersiyer sargısına bağlanan reaktörler genellikle topraklanmaz ve bir anahtarlama elemanı yardımıyla bağlanırlar. Söz konusu anahtarlama sağlayan ekipman reaktörün nötr terminallerine ya da besleme terminallerine bağlanır.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

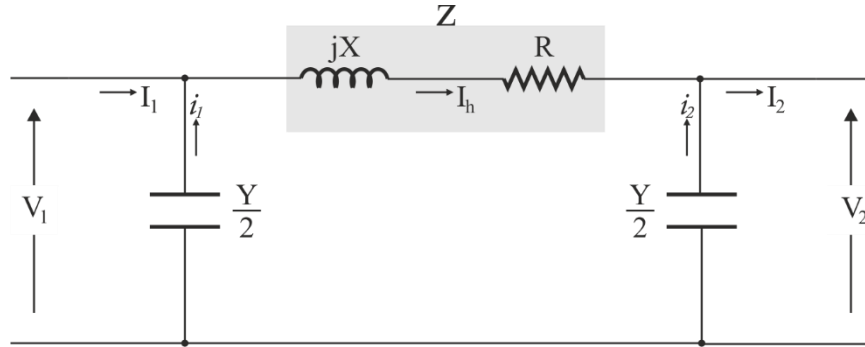
3.1. Taşıma Hatlarının Modellenerek Analizi

Kısa taşıma hatlarında hat kapasitesi çok küçük olduğundan dolayı ihmal edilebilir. Fakat hat boyu uzadıkça özellikle yeraltı dağıtım hatlarında hat kapasitesi oldukça büyür ve hesaplamalara dahil edilmesi gerekir. Orta uzunlukta iletim hatları olarak adlandırdığımız sistemlerde kapasite gerçekte olduğu gibi hat boyunca yayılmış vaziyette düşünülmeyp, hattın belli bölgelerinde bloklar halinde düşünülebilir. Orta uzunluktaki taşıma hatlarında en çok kullanılan analiz metotları Nominal T modeli ve Nominal Pi modelleridir. Şekil 3.1.'de verilen Nominal T modelinde bir iletkenin toplam kapasitesi hattın ortasında iletkenle nötr arasına bağlı olarak değerlendirilir.



Şekil 3.1. Nominal T modeli [1]

Nominal Pi modelinde ise, Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi iletkenin kapasitesi eşit iki kısma ayrılmış şekilde ve her biri hattın bir tarafında iletken ile nötr arasına bağlı iki blok halinde değerlendirilir. Pratikte her iki devre şeklide kullanılır ve yaklaşık olarak aynı sonuçları vermektedir.



Şekil 3.2. Nominal pi modeli [1]

$$Z = R + jL \quad (3.1)$$

$$Y = G + jC \quad (3.2)$$

$$Z = (Zl) \times \frac{\sinh(\gamma l)}{(\gamma l)} \quad (3.3)$$

$$Y = \left(\frac{Yl}{2} \right) \times \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\left(\frac{\gamma l}{2}\right)} \quad (3.4)$$

$$\tau = l\sqrt{LC} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki hat sabitlerinin hesaplanması için verilen formüllerdeki hiperbolik düzeltme katsayıları, düşük frekanstaki ve kısa iletim hatları için 1'e çok yaklaşır ve bu nedenle ihmal edilir. Böylece nominal pi devresinin hat sabitleri sabit olarak kabul edilebilir. Bu sayede simülasyon programları ile zaman tabanında simülasyon yapılabilir. Bu hat sabitleri kullanılarak simülasyon programlarında nominal pi devreleri ardışık şekilde bağlanarak geçici durum analizleri yapılabilir.

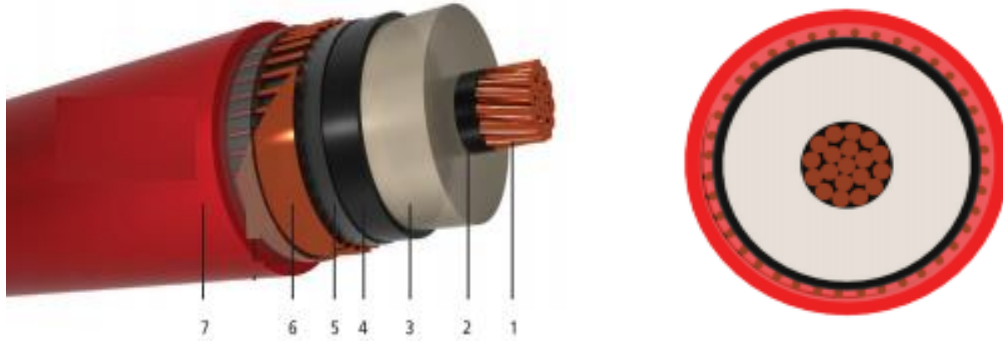
Genel olarak, T ve pi modelleri ile frekansı 50 Hz olan taşımahatlarında 200 km' ye kadar olan uzunluklardaki hatlarda doğru sonuçlar elde edilir. Orta uzunluklardaki taşıma hatlarında iki modelin sonuçları arasındaki fark küçüktür. Bu nedenle orta uzunlukluktaki hatlardaiki modelde kullanılabilir. Uzun iletim hatlarında ise hat sabitlerinin, kendi gerçek durumlarına uygun bir şekilde, hat boyunca dağıtılmış vaziyette düşünülmesi gerekmektedir.

3.2. PSCAD / EMTDC Programı ile Kablo Hat Sabitlerinin Hesaplanması

Tez çalışmamın bu bölümünde analizi yapılan dağıtım şebekesinin PSCAD / EMTDC programında simülasyonunun yapılabilmesi için gerekli olan kullanılan hat sabitlerinin hesaplanması yapılacaktır. Simülasyon programında kablo modellemesine ait hat sabitleri, yine PSCAD / EMTDC programı içinde yer alan kablo sabitleri alt programı ve üretici firma katalog verileri kullanılarak elde edilmiştir.

Analizi yapılan 5.586 km. uzunluğunda 34,5 kV ve 1x95/16 mm² XLPE izoleli, tek damarlı, bakır iletkenli yeraltı kablosuna ait veriler kullanılmıştır. Şekil 3.3.' de

kablo modeline ait enine kesiti verilmiştir. Analizi yapılan kabloya ait üretici firma enine kesit verileri ise çizelge 3.1.' de verilmiştir.



Şekil 3.3. Yeraltı kablosu enine kesiti

(1) Kablo iletkeni (2) İçyari iletken katman (3) XLPE izolasyon (4) Dış yari iletken katman (5) Su geçirmez şerit (6) Bakır kılıf iletkeni (7) HDPE dış izolasyon

Tablo 3.1 XLPE tipi kablo katalog değerleri

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Kalınlık (mm)	5.6	1	30	1	0.325	0.1	3

PSCAD / EMTDC programında kablo hat sabitlerinin hesaplanması için, tablo 3.1.' de verilen katalog değerlerinin programın hesap yapabileceği giriş verilerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Gerçekte kablo iletkenleri parçalara ayrılmış iletkenlerin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu nedenle kablolar arasındaki boşluklarında hesaba katılabilmesi için iletkenin öz direncinin artırılması gereklidir. Kablo iletkeninin DC direnci biliniyorsa yeni öz direnç Denklem 3.6'daki gibi hesaplanabilir [34].

$$\rho = R_{DC} \cdot \pi \cdot r_x^2 \quad (3.6)$$

$$\rho = 2,433 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$$

PSCAD / EMTDC programında kablo hat sabitleri alt programında yeraltı kablolarının yari iletken ekranlarının veri girişine izin vermemektedir. Bu nedenle yari iletken katmanlar, kablo iletkeni yarıçapı ve ana izolasyon kalınlığına dahil edilir [31].

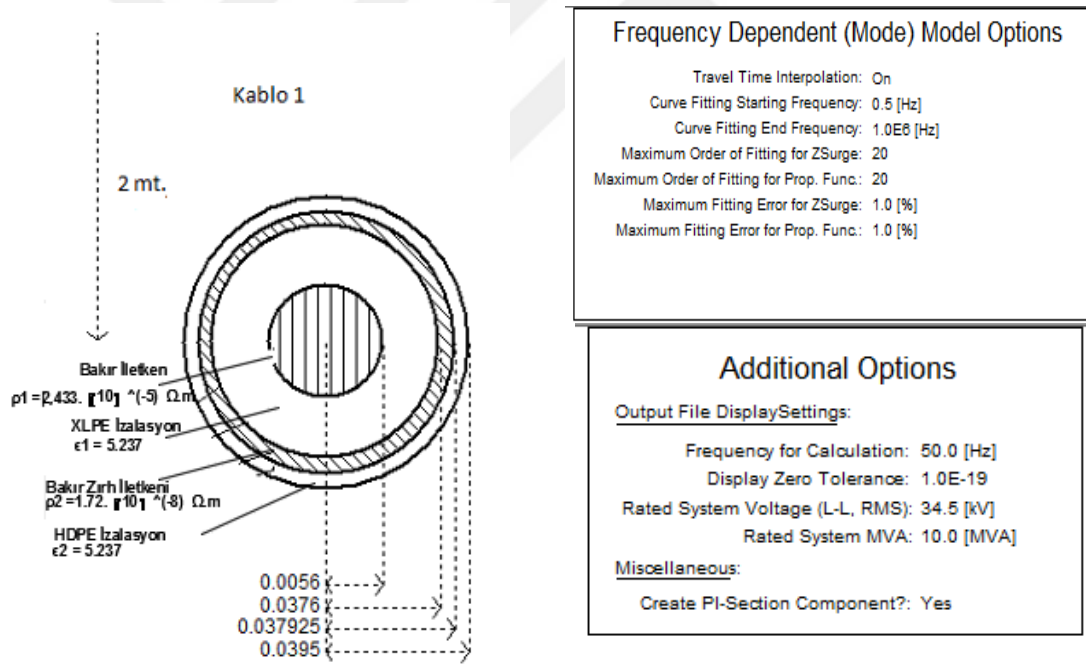
$$r_2 = 37,6 \text{ mm} \quad (3.7)$$

İzolasyon yarıçapının bulunması ile kablo kapasitansının değişmemesi için izolasyon dielektrik sabiti Denklem 3.2. ile yeniden hesaplanır [34].

$$\varepsilon_r = \frac{c \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_x}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_r = 5,237 \frac{F}{m}$$

Hat parametrelerinin hesaplanmasında gerekli olan bakır kılıf iletkeninin öz direnci = $1.72 \times 10^{-8} \Omega m$ ’ dir.



Şekil 3.4. PSCAD/EMTDC kablo sabitleri hesaplama alt programı

Elde edilen verilerin Şekil 3.4’de verilen kablo sabitleri alt programına hesaplamalar yapılmıştır. PSCAD / EMTDC kablo hat sabitleri alt hesaplama programı ile modellemesi yapılacak yeraltı kablosuna ait elde edilen sonuçlar birleştirilerek Tablo 3.2 hat sabitleri karşılaştırma tablosunda verilmiştir. Bu hesaplama programı ile Şekil 3.4’de verilen PSCAD/EMTDC kablo sabitleri

hesaplama alt programı ile pi eş değer devre modellemesine ait seri empedans ve şönt admintans matrisleri hesaplanabilir. Ayrıca ek ayarlar özelliği kullanılarak pi devresine ait direnç, endüktans ve kapasitans değerleri hesaplanabilmektedir.

Tablo 3.2 Hat sabitleri karşılaştırma tablosu

Hat Sabitleri	Katalog Değerleri	PSCAD/EMTDC
Direnç (R)	0.247 Ω/km	0.247 Ω/km
Kapasitans (C)	0.153 $\mu\text{F}/\text{km}$	0.153 $\mu\text{F}/\text{km}$
Endüktans (L)	0.604 mH/km	0.663 mH/km

3.3. PSCAD / EMTDC Programı ile Hat Analizi

Pscad programı ile yeraltı kablolarının sürekli ve geçici durum davranışlarının incelenmesi yapılabilir. Bu analizlerin yapılabilmesi için programda iki devre modeli bulunmaktadır. Bunlar toplu parametrelili ve dağıtık parametrelili modellerdir. Hattın frekansına ve uzunluğuna göre analiz için uygun model kullanılır.

3.3.1. Toplu Parametrelili Kablo Modeli

Toplu parametrelili modeller eşdeğer veya nominal pi modeli öncelikle çok kısa bir havai iletim hattını veya yeraltı kablosunu analiz etmek için kullanılır. Bu model temel frekans empedansını doğru sağlayacak olmasına rağmen, diğer frekanslardaki özellikleri doğru bir şekilde modelleyememektedir. Başka bir deyişle, pi modeli, kararlı durum çalışmaları (yük akışı gibi) için iletim sistemlerini temsil etmek için basitleştirilmiş bir yol sağlar, ancak doğru, tam frekanslı geçici (deri etkisi gibi) bir yanıt sağlayamamaktadır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi R, L ve C elemanları kullanılarak bir pi bölümü oluşturulur. Bu değerler kullanıcı tarafından girilir. R ve L elemanları matris biçiminde temsil edilir ve böylece üç faz arasında birleşme sağlar. Her iki uçta da karşılıklı bir kapasitans C vardır. Toplu parametrelili modellerde şönt kondüktans ihmal edilir. Toplu parametrelili model için programın kütüphanesinde kuplajlı veya nominal pi şeklinde modüller bulunmaktadır. Bu modeller kullanılarak veya pasif devre elemanları ile oluşturulan pi modelleri ile analiz yapılabilecektir.

3.3.2. Dağıtık Parametrelili Kablo Modeli

Dağıtık parametrelili hat modellerinden Bergeron modeli, yığılmış dirençli ve dağıtılmış bir LC parametresi ile hareket eden dalga hattı modeline dayanmaktadır. Bir pi modelinin L ve C elemanlarını dağıtılmış bir şekilde temsil eder (yani toplanmış

parametreleri kullanmaz). Hatta oluşan toplam direncin hattın ortasında yarısının 1/2 ve diğer yarısının hattın her iki ucunda 1/4 şeklinde oranlanıp dağıtıldığını ele alması hariç, sonsuz sayıda yanana dizilen pi model kullanıldığının varsayılmasına eşdeğerdir. Pi model gibi, Bergeron modeli de sadece temel frekansı doğru bir şekilde temsil etmesinin yanında, ayrıca kayıpların değişmemesi dışında diğer frekanslardaki empedansları da temsil eder. Söz konusu modeller, temel frekans yük akışının önemsendiği çalışmalar (röle çalışmaları, yük akışı vb.) için uygundur [34]. Dağılık parametrelili Bergeron modeli ise uzun iletim hatları ile yüksek frekans aralıklarında kullanılır ve gerçeğe daha yakın değerler vermektedir.

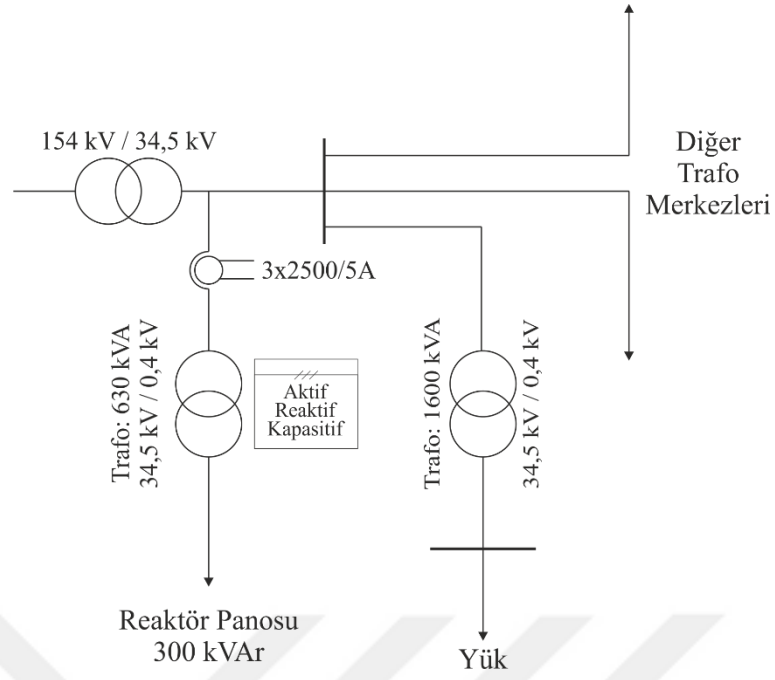
Yukarıda açıklanan Bergeron modeli gibi, frekans bağımlı (FD) modeller de hareket eden dalga modelidir. Bununla birlikte, sistem direnci R , uç noktalarda toplanmak yerine sistem uzunluğu boyunca (L ve C ile birlikte) dağıtılır. Daha da önemlisi, FD modelleri, sistemin frekans bağımlılığını da içeren bir dizi frekans noktasında çözülmektedir. PSCAD' de iki frekans bağımlı model mevcuttur. Frekans Bağımlı (Faz) modeli, iç dönüşüm matrislerinin frekans bağımlılığını göz önünde bulundurduğundan (böylece dengesiz ve dengeli sistemleri doğru bir şekilde temsil eder) en doğru modeldir. Eski Frekans Bağımlı (Mod) modeli sabit bir dönüşüm olduğunu varsayar ve bu nedenle yalnızca dengeli sistemleri modellerken doğrudur. Bir veya iki iletkenden oluşan sistemler için, iki model aynı sonuçları verecektir (dönüşüm yine de sabit olduğu için).

tarafından paylaşılmıştır. Mevcut transformatör merkezleri ring şebeke şeklinde tesis edilmiş olup herhangi bir noktada oluşacak arıza anında hattın diğer bölümden beslenebilecek ve enerji kesintisi yaşanmayacak şekilde tesis edilmiştir. Bir tanesi yedek olarak kullanılmak amacıyla 34,5 kV, 4x(1x95/16 mm²) XLPE tipi kablo kullanılan hattın toplam uzunluğu yaklaşık olarak 5586 metredir.

Her transformatör merkezinde biri yedek olmak üzere 2 adet 1600 kVA gücünde iki adet hermetik tip transformatör bulunmaktadır. Ayrıca trafo merkezlerinde bire bir oranında yine bir tanesi yedek olmak üzere iki adet 1600 kVA gücünde tam otomatik jeneratör bulunmaktadır. Her transformatör merkezinde besledikleri yüklere göre hesaplanmış olan endüktif / kapasitif kompanzasyon sistemi bulunmaktadır.

Bu dağıtım şebekesinde her merkez birbirinden bağımsız olarak besledikleri yüklere göre kendi kompanzasyonlarını yapmakta ve endüktif – kapasitif güç tüketim miktarlarını ayarlanan seviyelerde tutmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ise, her bir transformatör merkezlerindeki kompanzasyon sistemlerindeki reaktif güç kontrol röleleri, kompanzasyon yapabilmek için ihtiyaç duyulan akım değerlerini kendi AG baralarında bulunan akım trafolarından almakta ve buna göre kompanzasyon yapmaktadırlar. Bu noktada yapılan kompanzasyon orta gerilim kablosu tarafından üretilen kapasitif reaktif güce etki etmemektedir.

Şekil 4.2’ de ölçüm sayacının dağıtım şebekesine bağlantı şekli görülmektedir. Buradan görüldüğü üzere elektrik sayacı, ring şebekenin giriş noktasında bulunmakta ve referans değerlerini OG tarafına koyulan akım trafolarından gelen referans değerlerine göre ölçüm yapmaktadır.



Şekil 4.2 Reaktör panosu ve sayaç bağlantı şeması

Yapılan periyodik ölçümler neticesinde enerji tüketimin mesai saatleri dışında azaldığı, özellikle gece saatlerinde güç tüketimi minimum seviyelere düştüğü görülmüştür. Enerji tüketiminin azaldığı gece saatlerinde, dağıtım şebekedeki OG kablolarının uzun olmasından kaynaklanan kapasitif güç sebebi ile 9 adet trafo merkezinde bulunan kompanzasyon sistemlerine ek olarak ana enerjinin giriş noktasındaki orta gerilim şebekesinden referans alan bir şönt reaktör panosu tesis edilmiştir. Şönt reaktör panosuna ait bağlantı şeması Şekil 4.2’ de görülmektedir.

Hatta oluşan kapasitif güç aşağıdaki formül ile bulunur [36].

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_c \quad (4.1)$$

$$U = \sqrt{3} \cdot I_c \cdot X_c \quad (4.2)$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (4.3)$$

Üretici firmalar tarafından kabloların kataloglarında her kesitteki kablo için iletken dirençleri, iletken başına endüktansları ve işletme kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.1’ de mevcut şebeke hattında kullanılan kablo için katalog değerleri görülmektedir.

Tablo 4.1. XLPE Tipi Kablo Katalog Değerleri

BOYUT VE AĞIRLIKLAR			ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER									
Normal Kesit	Dış Çap	Net Ağırlık	Sevk Uzunluğu	İletken DC 20 °C Max	İletken DC 90 °C Max	Çalışma İndüktansı		İşletme Kapasitesi	Akım Taşıma Kapasitesi (A)			
mm ²	mm	kg/km	m	ohm/km	ohm/km	*** mH/km	** mH/km	µF/km	Toprakta 20 °C		Havada 30 °C	
									***	**	***	**
1x25/16	33.5	1200	1000	0.727	0.9306	0.711	0.486	0.105	-	-	-	-
1x35/16	34.5	1300	1000	0.524	0.6707	0.685	0.464	0.115	214	192	233	202
1x50/16	36.0	1550	1000	0.387	0.4954	0.659	0.444	0.125	251	226	279	241
1x70/16	37.5	1800	1000	0.268	0.3430	0.628	0.420	0.140	306	276	348	299
1x95/16	39.5	2100	1000	0.193	0.2470	0.604	0.402	0.153	363	329	421	362
1x120/16	41.5	2400	1000	0.153	0.1958	0.585	0.388	0.165	410	373	483	416
1x150/25	43.0	2850	1000	0.124	0.1587	0.567	0.376	0.178	449	415	540	469
1x185/25	44.5	3200	1000	0.0991	0.1268	0.551	0.365	0.191	503	468	615	536
1x240/25	47.5	3800	1000	0.0754	0.0965	0.531	0.351	0.209	576	541	718	630
1x300/25	49.5	4500	1000	0.0601	0.0769	0.514	0.341	0.226	641	608	812	717
1x400/35	53.0	5650	500	0.0470	0.0602	0.493	0.328	0.252	697	684	904	823
1x500/35	56.0	6700	500	0.0366	0.0468	0.477	0.318	0.274	768	762	1011	929

1x95/16 mm² XLPE tipi kablo için katalog değeri incelendiğinde 1km uzunluk için ortaya çıkan kapasitans C= 0,15 µF/km olduğu görülmektedir. Buradan;

$$X_c = 2,12. 10^4 \Omega$$

$$I_c = 0,941 A$$

$$Q_c = 56,24 \frac{kVAR}{km}$$

bulunur.

Dağıtım şebekesinin toplam uzunluğu Şekil 4.1’ de görüldüğü üzere 5,586 km olduğundan dolayı hattın toplam kapasitif gücü:

$$Q_{CT} = 314,5 kVAR$$

olarak bulunur.

Enerji tüketimin düştüğü zamanlarda orta gerilim kablosunun kapasitif etkisinden dolayı yaklaşık 315 kVAR'lık bir kapasitif reaktif güç meydana gelecektir. Mevcut dağıtım sisteminde XLPE tipi yeraltı kablosundan kaynaklanan kapasitif etkiyi gidermek için 300 kVAR gücünde bir şönt reaktör panosu tesis edilmiştir. Şekil 4.3.'de tesis edilen şönt reaktör panosu görülmektedir.

Sayacın orta gerilimde olduğu sistemler, AG' de olduğu sistemlere göre farklılık göstermektedir. Ayrıca buradaki gibi uzun OG yeraltı hatları ile beslenen şebekelerde klasik kompanzasyon sistemleri yeterli kalmamaktadır. Bu nedenle buradaki dağıtım şebekesinde bulunan her bir trafo merkezlerinin AG bölümlerinde bulunan kompanzasyon sisteminin haricinde ring şebekenin giriş noktasına OG'den referans alan bir şönt reaktör panosu tesis edilerek reaktif gücün etkisi giderilmeye çalışılmıştır. Tesis edilen şönt reaktör panosuna ait tek hat şeması Şekil 4.4' de gösterilmiştir.

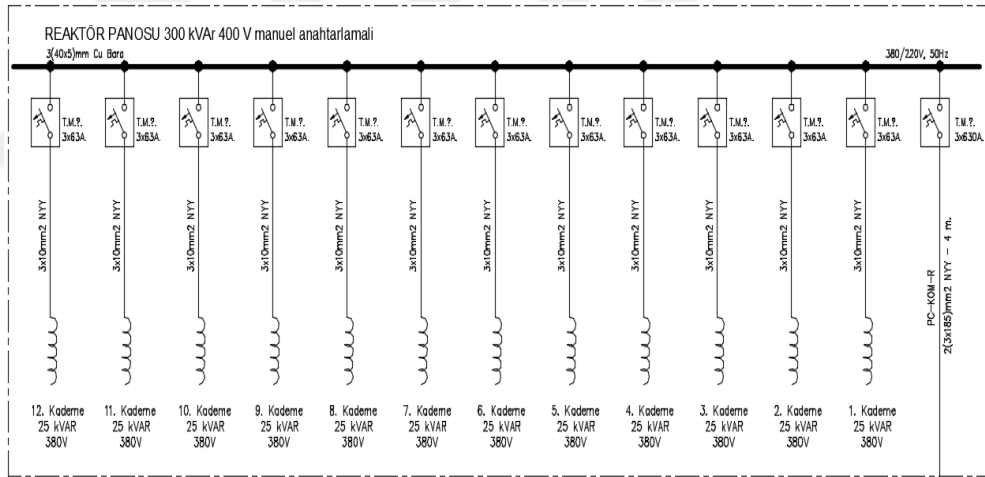


(a)



(b)

Şekil 4.3 Şönt reaktör panosu (a) Önden görünüm, (b) Pano içi görünüm



Şekil 4.4 Reaktör panosu bağlantı şeması

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi reaktör panosu 300 kVAR gücünde 12 kademelidir. Her kademe manuel olarak anahtarlama ve 25 kVAR gücündedir. Sayaçtan alınan aktif ve reaktif güç değerlerine göre kademeler devreye alınarak kompanzasyon gerçekleştirilmektedir. Dağıtım şebekesinin beslediği yerleşkede yükün düştüğü gece saatlerindeki güçler uzaktan okuma yapabilen enerji analizörü ile ölçülmüştür. Şönt reaktör devrede değilken ve farklı kademeleri devredeyken alınan ölçümler Şekil 4.5’de görülmektedir. Ölçüm sonuçları Tablo 3.2.’de listelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde mesai saatlerinde çekilen gücün yoğunluğunun arttığı ve gece saatlerinde

ise aktif güç ihtiyacının oldukça düşük seviyelere indiği görülmüştür. Yük yoğunluğunun fazla olduğu aralıklarda yeraltı kablosundan kaynaklanan kapasitif etki endüktif yüklerin etkisi ile kompanze edilmektedir.

	Gerilim	Akım	Aktif Güç	Reaktif Güç	PF1
L1-N	19.9 kV	14.4 A	271.6 kW	-102.3 kvar	0.93
L2-N	19.9 kV	14.6 A	271.5 kW	-102.4 kvar	0.93
L3-N	19.9 kV	14.6 A	271.5 kW	-102.4 kvar	0.93
L4-N	0.03 V	0.00 A	0.00 kW	-0.00 var	1.00
L1..L3	50.0 Hz	0.00 A	815.0 kW	-307.0 kvar	0.93
Dij. Çıkış			Dij. Giriş		

(a)

	Gerilim	Akım	Aktif Güç	Reaktif Güç	PF1
L1-N	19.9 kV	14.0 A	267.3 kW	-68.3 kvar	0.96
L2-N	19.9 kV	13.9 A	267.2 kW	-68.2 kvar	0.96
L3-N	19.9 kV	13.9 A	267.2 kW	-68.2 kvar	0.96
L4-N	0.03 V	0.00 A	0.00 kW	-0.00 var	1.00
L1..L3	50.0 Hz	0.00 A	802.0 kW	-205.0 kvar	0.96
Dij. Çıkış			Dij. Giriş		

(b)

	Gerilim	Akım	Aktif Güç	Reaktif Güç	PF1
L1-N	19.9 kV	13.7 A	270.3 kW	-32.6 kvar	0.99
L2-N	19.9 kV	13.7 A	270.2 kW	-32.5 kvar	0.99
L3-N	19.9 kV	13.7 A	270.2 kW	-32.5 kvar	0.99
L4-N	0.03 V	0.00 A	0.00 kW	-0.00 var	1.00
L1..L3	50.0 Hz	0.00 A	811.0 kW	-98.0 kvar	0.99
Dij. Çıkış			Dij. Giriş		

(c)

	Gerilim	Akım	Aktif Güç	Reaktif Güç	PF1
L1-N	19.9 kV	13.7 A	274.3 kW	-2.0 kvar	1.00
L2-N	19.9 kV	13.7 A	274.3 kW	-2.0 kvar	1.00
L3-N	19.9 kV	13.7 A	274.3 kW	-2.0 kvar	1.00
L4-N	0.03 V	0.00 A	0.00 kW	-0.00 var	1.00
L1..L3	50.0 Hz	0.00 A	823.0 kW	-6.0 kvar	1.00
Dij. Çıkış			Dij. Giriş		

(d)

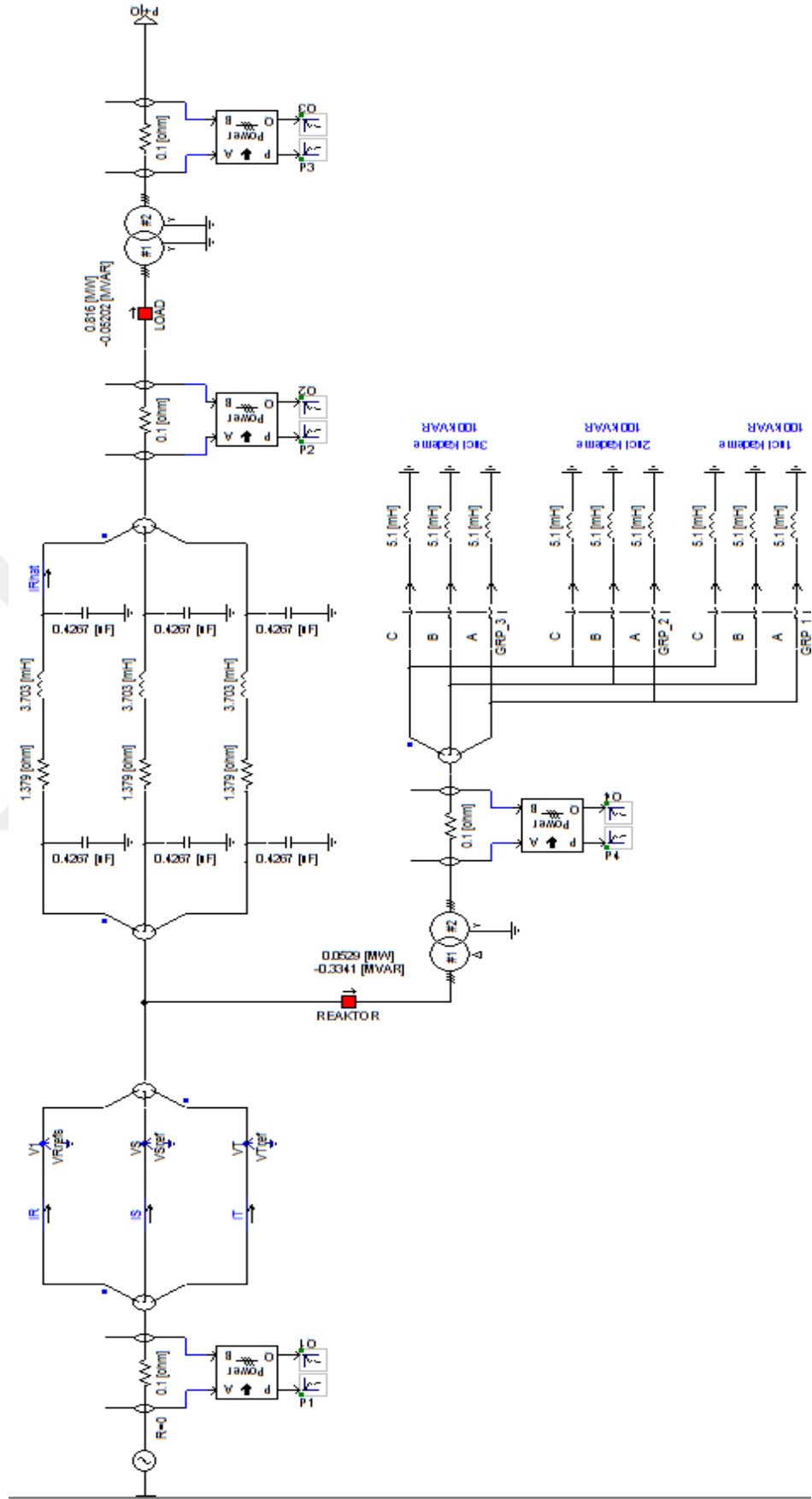
Şekil 4.5 Analizör ölçüm değerleri (a) Şönt reaktör devrede değil, (b) 4 kademe devrede, (c) 8 kademe devrede, (d) 12 kademe devrede

Tablo 4.2. Sayaç ölçüm sonuçları

S.Nu.	Aktif Güç (KW)	Kapasitif Reaktif Güç (kVAR)	Devredeki Reaktör Kademe Sayısı	Devreye Alınan Endüktif Güç (kVAR)
1	815	-307	-	-
2	802	-205	4	100
3	811	-98	8	200
4	823	-6	12	300

(1) durumunda şönt reaktör devrede değildir. Bu durumda dağıtım hattından çekilen üç faza ait aktif güç, 815 KW' tır. Bununla birlikte şebekeden çekilen kapasitif

reaktif güç, 307 kVAR' dır. Bu değer yeraltı kablosunun kapasitif etkisinden kaynaklanmaktadır ve hesaplanan değere yakındır. (2) durumunda şönt reaktörün 4 kademesi devreye alınmıştır. Devreye alınan 4 kademe ile dağıtım şebekesine 100 kVAR' lık bir güç verilmektedir. Bunun sonucunda kapasitif reaktif güç değeri 205 kVAR seviye düşmüştür. (3) durumunda devrede bulunan kademe sayısı artırılarak 8 kademe devreye alınmıştır. Yeni devreye alınan kademeler ile dağıtım hattından çekilen aktif güç, 811 KW' tır. Kapasitif reaktif güç ise azalarak 98 kVAR' a kadar gerilemiştir. Son olarak (4) durumunda şönt reaktörün tüm kademeleri devreye alınarak ölçüm yapılmıştır. Burada üç faza ait toplam aktif güç 823 KW, kapasitif reaktif güç ise 6 kVAR' a kadar gerilemiştir. Burada dikkat edilmesi gereken ilk konu dört durumda aktif güçlerde görülen değişimlerin şönt reaktör ile gerçekleşen kompanze sistemiyle alakalı olmayıp, ölçüm yapılan anlardaki anlık aktif güç kullanımlarından kaynaklanmaktadır.

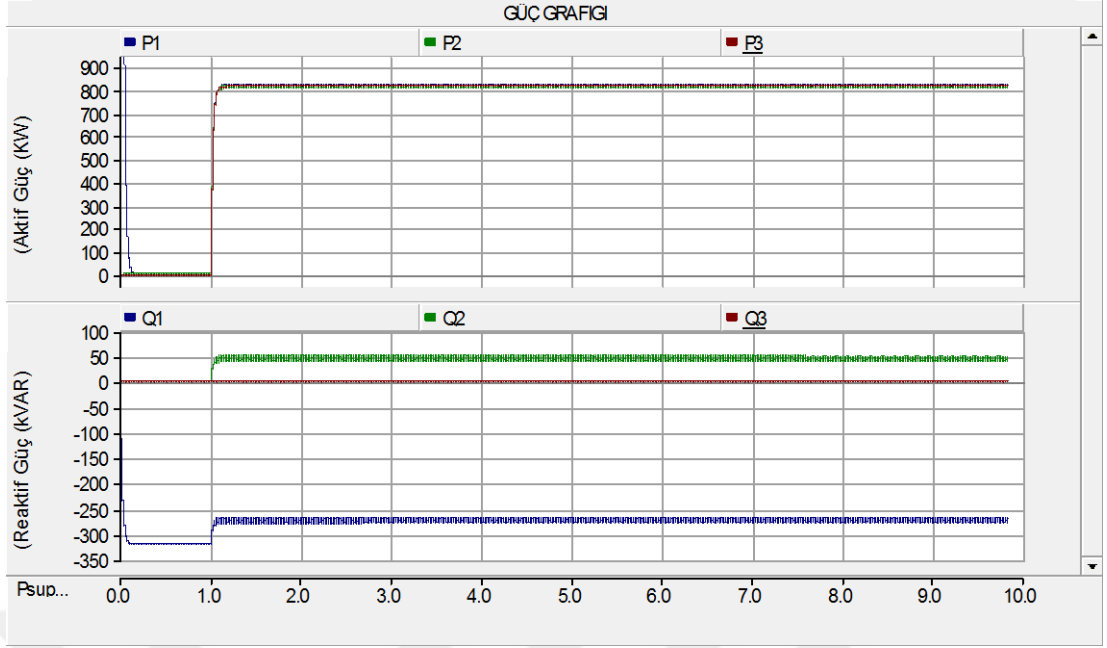


Şekil 4.6 PSCAD programı XLPE yeraltı kablosu simülasyon çalışması

4.2. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları

Bölüm 4.1’de ölçümler alınarak analizi yapılan dağıtım şebekesine ait veriler ile PSCAD/EMTDC programında oluşturulan tek baralı güç dağıtım hattı Şekil 4.4’ de sunulmuştur. Hattı besleyen kaynak dengeli 3 faz sistemi ve faz – faz arasındaki gerilimi 34,5 kV, çalışma frekansı 50 Hz olarak ayarlanmıştır. Simülasyon programı için hattın toplam uzunluğu olan 5.586 metre uzunluk için gereken hat parametrelerine sahip tek bir pi modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Pi modellerinin seri olarak bağlanarak oluşturulması veri boyutunu, düğüm sayısını, hesaplama süresini ve matris boyutunu arttırdığından dolayı, tek pi modeli kullanılmıştır. Analiz için kullanılan pi modeli pasif devre elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. Yük kısmında bir transformatör ile analiz yapılan dağıtım sistemindeki toplam yük tek noktada gösterilmiştir. Şönt reaktör analizi yapılan dağıtım şebekesinde her biri 25 kVAR gücündeki 12 kademeden oluşmaktadır. Simülasyon yapılırken analiz çalışmasındaki senaryo ile aynı fakat simülasyon süresi ve veri boyutu nedeniyle şönt reaktörde dört kademe birleştirip her biri 100 kVAR üç kademeden oluşturulmuştur. Her bir kademenin anahtarlanması için ayrı ayrı anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Şönt reaktörün dağıtım şebekesi ile bağlantısı, hatta paralel bağlı 630 kVA gücünde bir transformatör ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon süresi 10 saniye ve 250 μ s’lik zaman adımı ile gerçekleştirilmiştir.

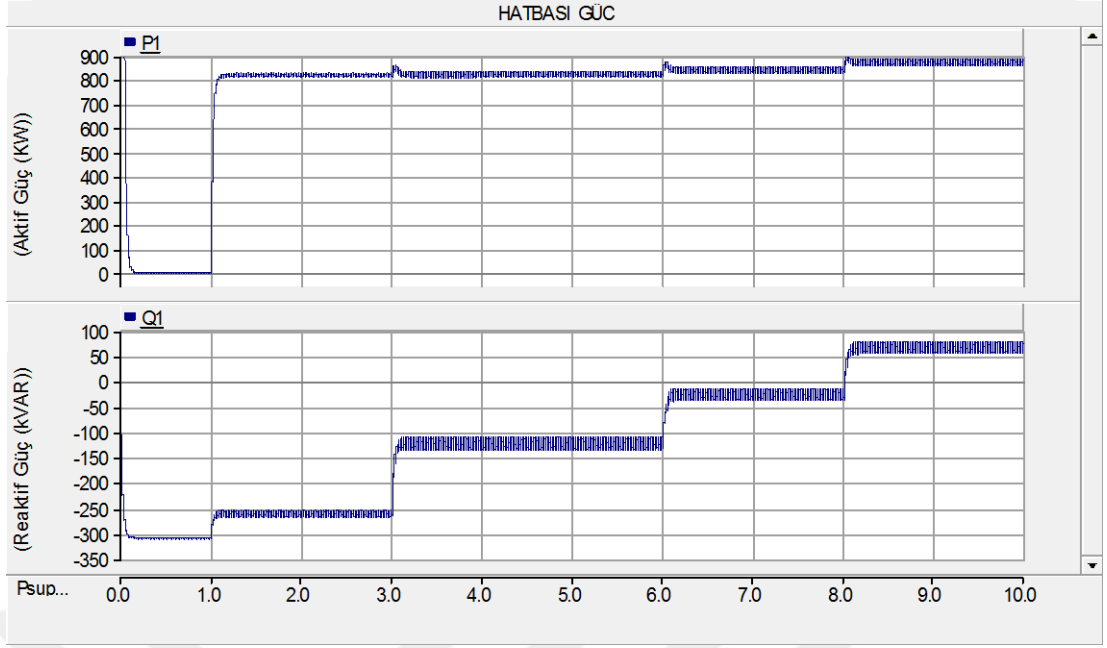
Şekil 4.7.’ de simülasyon çalışması yapılan tek baralı güç dağıtım sisteminin kaynak-hatsonu-yük kısımlarının toplam üç faz aktif- reaktif güç değerlerine ait grafik verilmiştir. Yük devrede değilken (0–1 sn.), P1 grafiği incelendiğinde şebekeden çekilen aktif gücün değeri yaklaşık olarak 7 KW’ tır. Şönt reaktör ve yükün devrede olmaması nedeniyle XLPE tipi yeraltı kablosunun reaktif etkisi nedeniyle hat üzerinden kapasitif özellikteki reaktif şarj akımları akmaktadır. Bahse konu akımlar nedeniyle kapasitif reaktif güç oluşmakta ve aktif gücün aksine şebekeye verilen güç olduğundan dolayı yönü kaynağa doğrudur. Bu yüzden negatif eksende görülmektedir. Bu gücün ölçülen değeri Q1 yaklaşık olarak -318 kVAR’dır. Yükün devreye girmesi ile birlikte (1–10 sn.) aktif güç değeri yaklaşık olarak 818 KW olarak ölçülmüştür. Reaktif güç değeri ise -277 kVAR değerine düşmüştür. Buradaki fark yük ve hat arasındaki endüktif ve kapasitif güç alışverişinden kaynaklanmaktadır. Burada dikkat edilecek bir nokta, yük önündeki transformatör sargılarından dolayı endüktif özelliktedir ve reaktif güce etki etmektedir.



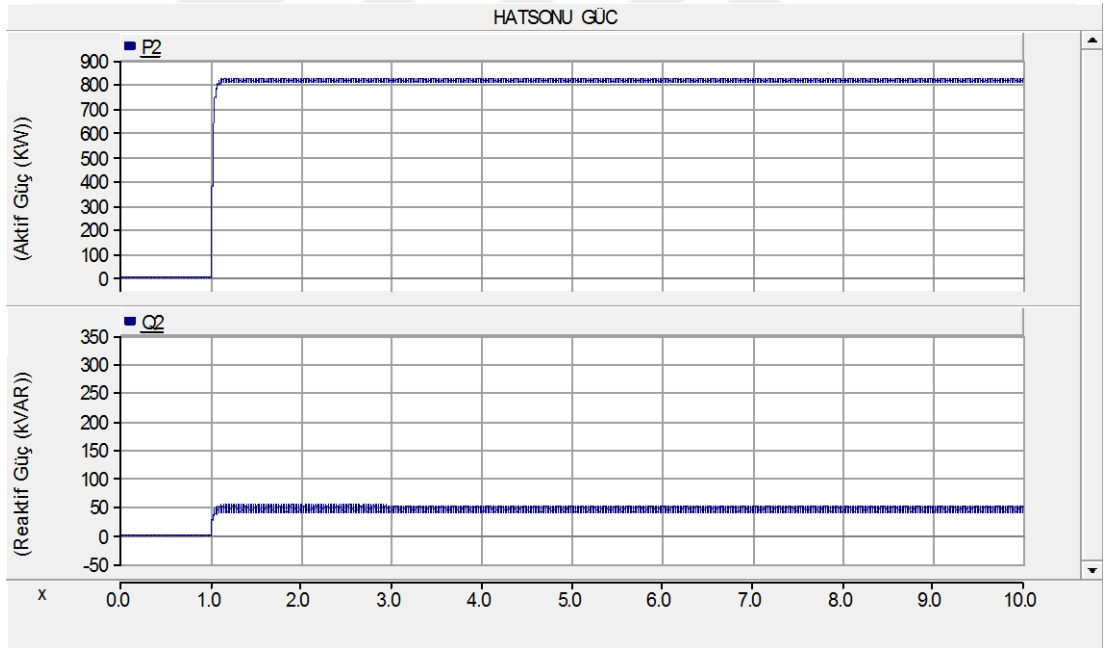
Şekil 4.7. Kaynak –hat sonu-yük üç faz toplam aktif ve reaktif güç grafiği

Şekil 4.7.' deki P2-Q2 hat sonu aktif ve reaktif güç grafiği incelendiğinde yük devrede değilken (0-1 sn.) aktif güç değeri 1,18 KW'tır. Reaktif güç ise yaklaşık 9,8 kVAR olarak ölçülmüştür. Burada görüldüğü üzere hat başı reaktif gücü -308 kVAR iken hat sonunda 9,8 kVAR olduğu görülmektedir. Hat sonunda XLPE kablonun kapasitif etkisinin bulunmaması nedeniyle reaktif güçteki bu değişim görülmektedir. Yüken devreye girmesi ile birlikte ölçülen P2 aktif güç değeri 817 KW 'tır. P1 hat başı aktif güç değeri ile yaklaşık olarak aynıdır. Reaktif güç Q2 ise 45 kVAR değerindedir.

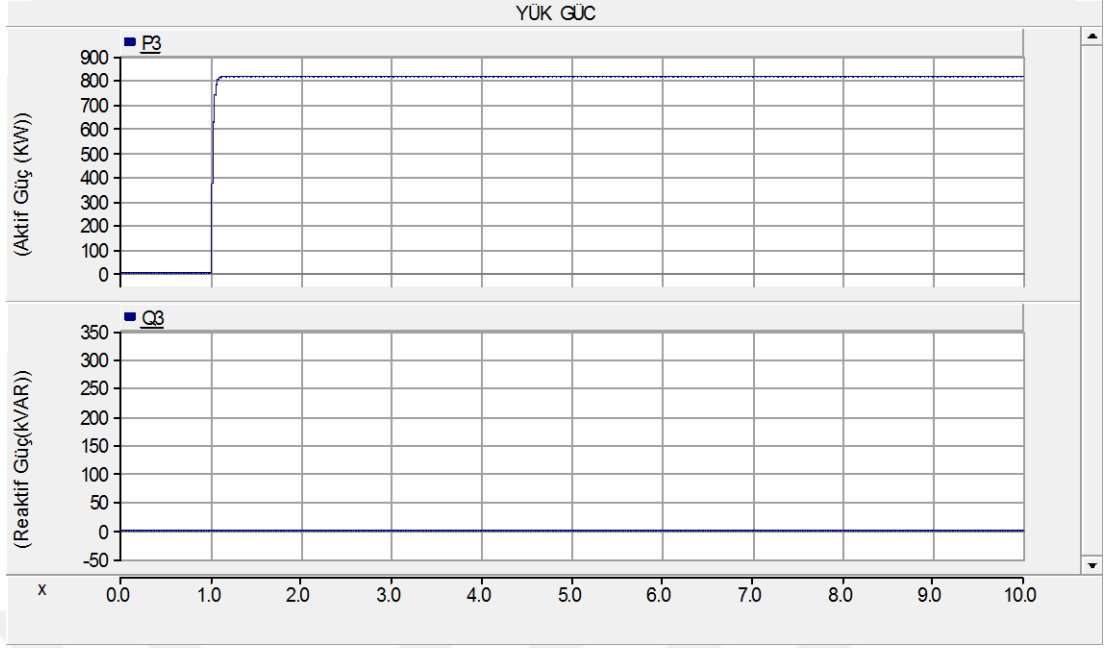
Şekil 4.7.' de P3-Q3 yük tarafı üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde 0 – 1 sn. arasında yük devrede olmadığından dolayı hem aktif güç hem de reaktif güç değeri 0' dır. Yüken devreye girmesi ile birlikte (1 – 10 sn.) P3 aktif güç değeri 817 KW'tır. Q3 Reaktif güç ise yaklaşık olarak 1 kVAR'dır. Burada ölçüm noktası AG bölümünde olduğundan dolayı, transformatörden kaynaklanan endüktif reaktif güç değeri okunmamaktadır.



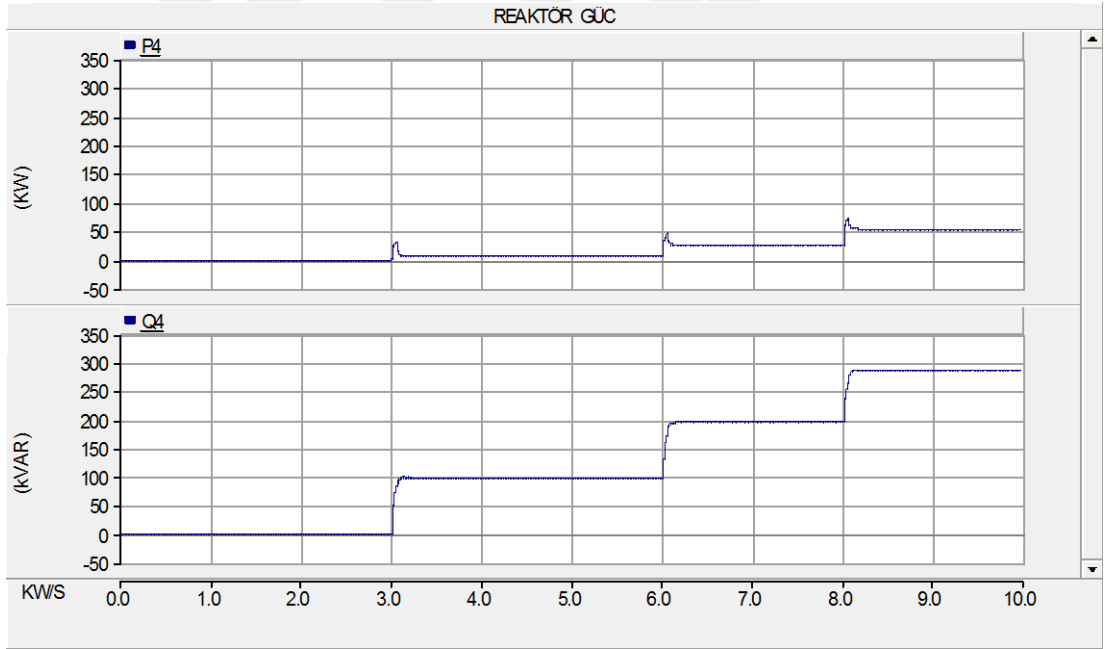
Şekil 4.8. Kaynak tarafındaki üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (Şönt reaktör devrede)



Şekil 4.9. Hat sonu üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (Şönt reaktör devrede)



Şekil 4.10. Yük tarafı üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (Şönt reaktör devrede)



Şekil 4.11. Şönt reaktör tarafı üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği (Şönt reaktör devrede)

Şekil 4.8.' de simülasyon çalışması yapılan tek baralı güç dağıtım sisteminin besleme kaynağına ait şönt reaktör devrede iken üç faz için toplam aktif ve reaktif güç değerlerine ait grafik verilmiştir. Burada şönt reaktör kademeleri farklı zaman aralıklarında devreye alınmıştır. Yükün devreye girmesi ile birlikte (1 – 3 sn.) aktif güç değeri yaklaşık olarak 818 KW olarak ölçülmüştür. Reaktif güç değeri ise -259

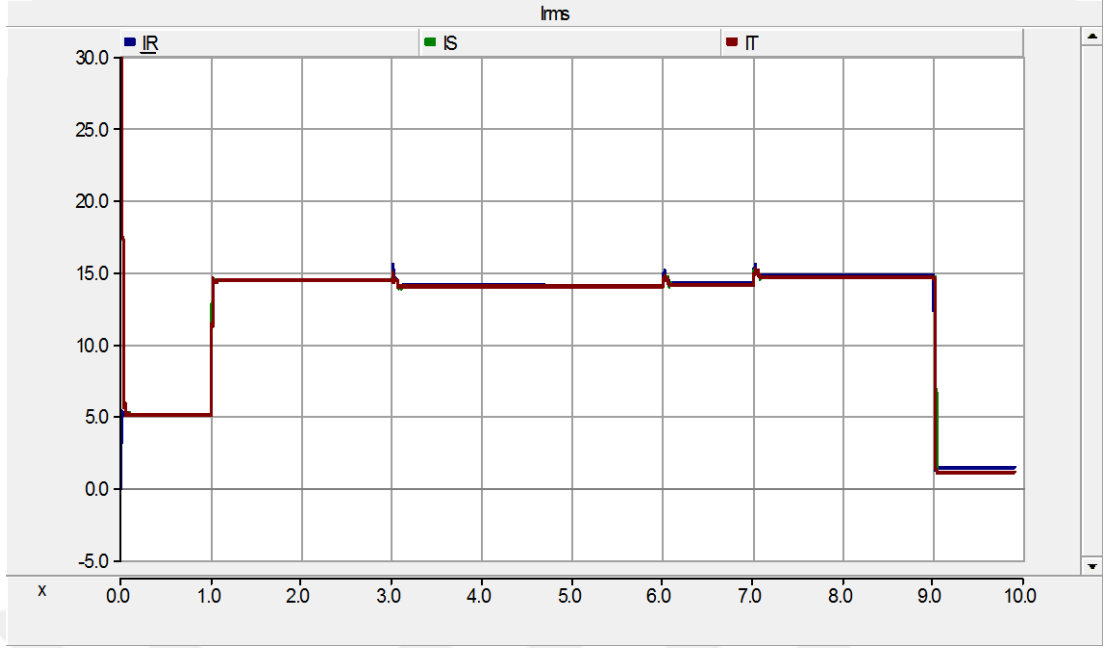
kVAR değerine düşmüştür. Buradaki fark yük ve hat arasındaki endüktif ve kapasitif güç alışverişinden kaynaklanmaktadır. Şönt reaktörün ilk kademesinin (100 kVAR) devreye girmesi ile birlikte (3-4 sn.) aktif güç değeri 820 KW ölçülmüştür. Grafikten görüldüğü aktif güç değerinde, reaktörün devreye girmesi ile küçük güç dalgalanmaları meydana gelse de yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Reaktif güç değeri ise -121 kVAR olarak ölçülmüştür. Aradaki -138 kVAR'lık fark şönt reaktör önündeki transformatörün bobin sargıları ve şönt reaktörün 100 kVAR'lık birinci kademesinden kaynaklanmaktadır. 6 – 8 sn. aralığında şönt reaktörün 100 kVAR gücündeki ikinci kademesi devreye girmektedir. Aktif güç değeri 843 KW olarak ölçülmüştür. Reaktif güç değeri ise -36 kVAR değerine düşmüştür. 8 – 10 sn. aralığında şönt reaktörün son kademesinin devreye girmesiyle birlikte reaktif güç değeri +78 kVAR değerine yükselmiştir. Aktif güç değeri ise 875 kW olarak ölçülmüştür. Buradaki aktif güç değerinde yaşanan artış şönt reaktörün devreye alınan kademelerinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.9'daki güç grafiği incelendiğinde yükün devreye alınmasıyla aktif güç değeri 817 KW, reaktif güç değeri ise 45 kVAR olarak ölçülmektedir. Şönt reaktörün kademelerinin devreye girdiği zaman aralıklarında ise hem aktif güç değerinde hem de reaktif güç değerinde değişiklik olmamaktadır.

Şekil 4.10'de yük tarafı üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği incelendiğinde aktif güç değeri 817 KW, reaktif güç değeri ise 2 kVAR olarak ölçülmektedir. Şönt reaktörün devreye girmesi yük tarafında da bir değişikliğe neden olmamakta ve hem aktif güç değeri hem de reaktif güç değeri sabit kalmaktadır.

Şekil 4.11'de şönt reaktör kısmına üç faza ait aktif ve reaktif güç grafiği incelendiğinde, reaktörün devreye girmesiyle aktif güç değeri birinci kademe devrede iken 6 KW, ikinci kademe 25 kW, üçüncü kademe ise 54 KW olarak ölçülmüştür. Reaktif güç değeri ise birinci kademe devrede iken 99 kVAR, ikinci kademe 195 kVAR, üçüncü kademe ise 287 kVAR olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.10'deki besleme kaynağına ait şönt reaktör devrede iken üç faz için toplam aktif ve reaktif güç değerlerine ait grafik incelendiğinde şönt reaktörün sisteme olan katkısı bütünüyle görülebilmektedir.



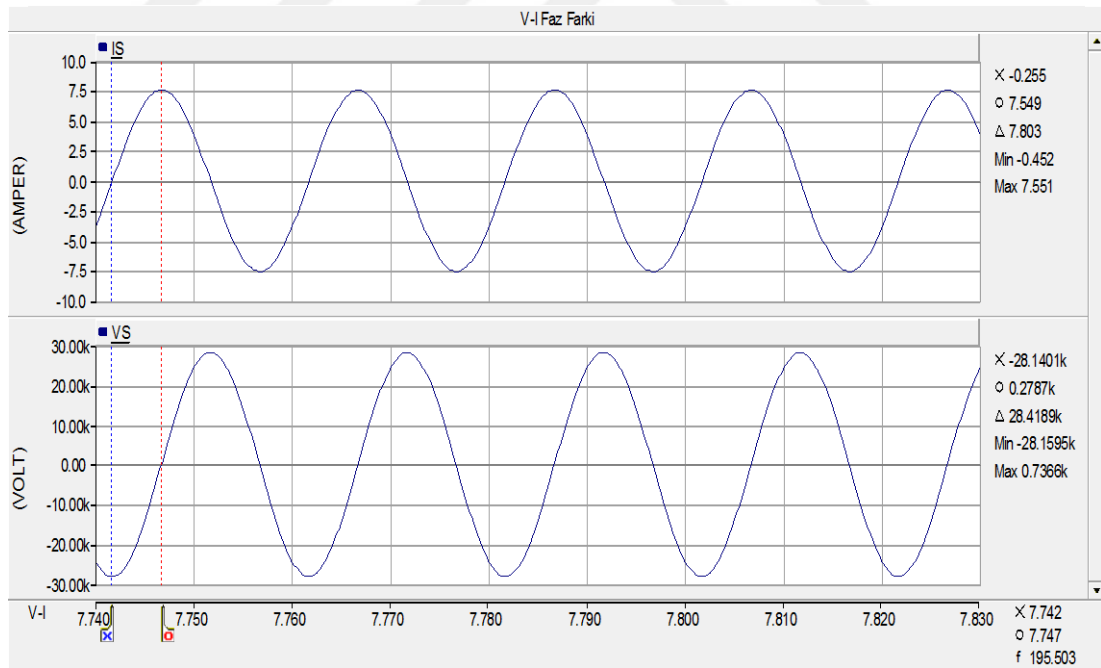
Şekil 4.12. Kaynaktan çekilen faz akımlarına ait RMS değişim grafiği

Şekil 4.12’de kaynaktan çekilen faz akımlarına ait değişimin rms değerlerine ait grafik verilmiştir. 0 – 1 sn. arasında yük devrede değilken kaynaktan 5,16 A akım çekilmektedir. Çekilen bu akım değeri XLPE tipi yeraltı kablosunun hat sabitlerinden kaynaklanmaktadır. Hat sonundaki yük devrede değilken çekilen bu akım değeri hattın gereksiz yere yüklenmesine neden olmaktadır. 1 – 3 sn. arasında yükün devreye girmesiyle çekilen akım değeri şebekeden çekilen aktif güç değeri artmış, şebekeden çekilen akım değeri de 14,40 A değerine kadar çıkmaktadır. 3 – 6 sn. arasında şönt reaktör kademeleri tamamıyla devreye girmesiyle kararlı çalışılmaya ulaşmış, rms değeri 14,70 A olan dengeli faz akımları akmaya başlamıştır. 9 sn. sonrasında yük devreden çıkmış, fakat şönt reaktör devrede olduğundan dolayı 0-1 sn. arasındaki yeraltı kablosunun kapasitif etkisinden kaynaklanan reaktif akımda kompanze edilmiştir. Şebekeden yaklaşık 1 A değerinde akım çekilmektedir. Bu değer yeraltı kablosunun seri empedanslarından kaynaklanmaktadır.

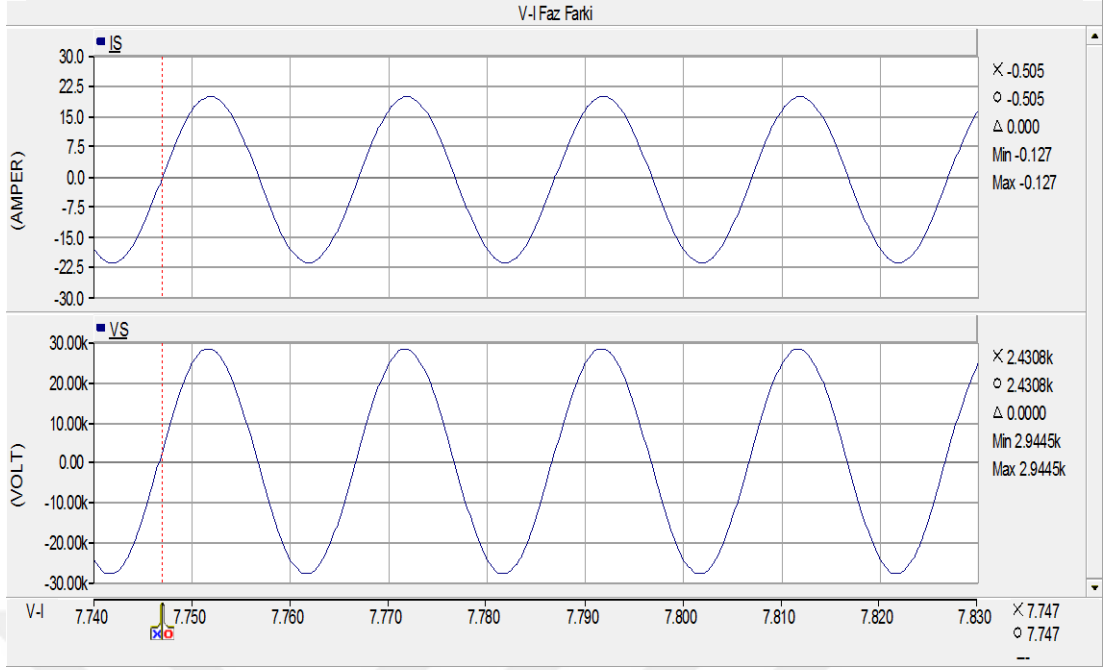
Tablo 4.3. Reaktif güç sonuçlarının karşılaştırması

S.Nu.	Kapasitif Reaktif Güç (kVAR)		Devredeki Reaktör Kademe Sayısı	Devreye Alınan Endüktif Güç (kVAR)
	Sayaç	Simülasyon		
1	-307	-259	-	-
2	-205	-121	4	100
3	-98	-36	8	200
4	-6	+78	12	300

Tablo 4.3.'de simülasyon çalışmasında alınan sonuçlar ile analizi yapılan dağıtım şebekesinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Tablo incelendiğinde elde edilen sonuçlar yaklaşık olarak aynıdır. Aradaki fark yükün ve şönt reaktörün önüne yerleştirilen transformatörlerin sargıları nedeniyle oluşan endüktif etkiden kaynaklanmaktadır. Dağıtım şebekelerinde trafoların endüktif etkilerini gidermek için sabit kompanzasyon uygulaması yapılmaktadır. Bu nedenle dağıtım şebekesinden alınan ölçümlerde transformatörlerden kaynaklanan endüktif etki görülmemektedir.



Şekil 4.13. Kaynaktan çekilen S fazına ait akım ve gerilimin değişimi (Yük devrede değilken)



Şekil 4.14. Kaynaktan çekilen S fazına ait akım ve gerilimin değişimi (Yük ve reaktör devrede)

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de kaynaktan çekilen S fazına ait akım ve gerilimin farklı zaman aralıklarındaki değişimine ait grafikler verilmiştir. Tablo 4.3.’ de V-I periyot yükselme zamanlarına ait çizelge verilmiştir. Şekil 4.13’de yük ve şönt reaktör devrede değilken, gerilim ve akım arasındaki faz farkı görülmektedir. XLPE tipi kablunun kapasitif etkisi nedeniyle oluşan akım ve gerilim arasında yaklaşık faz farkı 4.4. ile bulunur.

Tablo 4.4. V-I periyot ölçüm sonuçları

S.Nu.	Periyot Yükselme Zamanı		Fark (sn)
	I	V	
1	7,742	7,747	0,005
2	7,747	7,747	0

$$\theta = \frac{t \cdot 360^\circ}{T} \quad (4.4)$$

$$\theta_1 = \frac{5.360^\circ}{20} = 90^\circ$$

bulunur. Şekil 4.13' de görüldüğü gibi akım gerilime göre ileridedir. Şekil 4.14'de verilen grafik incelendiğinde, yük ve şönt reaktör devrede iken akım ve gerilim arasındaki faz farkı şönt reaktörün devreye girmesiyle endüktif kapasitif akım alışverişiyle, akım ve gerilim arasında faz farkı giderilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Elektrik enerjisinin üretim noktalarının tüketim bölgelerinden genellikle uzakta olması, üretilen enerjinin tüketim yerlerine iletilmesini gerektirmektedir. Elektrik enerjisinin üretim maliyetlerinin yüksek olmasının yanında, iletim ve dağıtım maliyetleri de oldukça yüksektir. Ayrıca uzun mesafelere iletiildiğinden kayıplar büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle santrallerde üretilen elektrik enerjisinin son kullanıcıya kadar minimum kayıpla ve en düşük maliyetle iletilmesi gerekmektedir. Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımını özellikle yerleşim yerlerinde yeraltı kabloları ile gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında XLPE tipi yeraltı kablosu kullanılarak tesis edilmiş yaklaşık 5500m. uzunluğundaki OG dağıtım şebekesinin alınan ölçümler ile analizi yapılmıştır. Analizi yapılan dağıtım şebekesinin verileri ve PSCAD / EMTDC programı ile XLPE kablonun modellemesi ile simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında alınan sonuçlar ile analizi yapılan dağıtım şebekesinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Aradaki farkın simülasyon çalışmasında yük ve şönt reaktörlerin beslemesi için kullanılan transformatörlerin sargılarından dolayı oluşan indüktif etkiden kaynaklandığı doğrulanmıştır.

XLPE tipi yeraltı kablolarında iletken olarak bakır veya alüminyum malzeme kullanılması km başına meydana gelen kapasitans değerinde bir değişikliğe neden olmamaktadır. Fakat alüminyum iletken ile bakır iletkenin akım taşıma kapasiteleri farklı olduğundan dolayı, aynı güç değeri için daha yüksek kesitli alüminyum iletken kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle alüminyum kablo kullanılması durumunda aynı güç değeri için bakır iletkenli kabloya göre hat üzerinde oluşacak kapasitif reaktif güç değeri de fazla olacaktır.

OG seviyelerinde elektrik enerjisinin dağıtımını XLPE tipi yeraltı kabloları ile gerçekleştirilmektedir. Bu tip OG yeraltı kablolarının yapısı nedeniyle üzerinde kapasitif güç indüklenmektedir. Kablonun uzunluğuna göre değişen bu güç değeri, kablo üzerinden kapasitif reaktif akımlar akmasına neden olmaktadır. Analizi yapılan OG şebekesinde, alınan ölçüm sonuçları ile enerji tüketimin çok düşük olduğu saatlerde kapasitif reaktif güç değerleri incelenmiştir. Burada ortalama 800 KW

gücündeki aktif güç tüketimin olduğu zaman aralıklarında, yaklaşık 300 kVAR kapasitif reaktif güç değeri okunmuştur. Üretici firmaların kataloglarında her kesitteki XLPE kabloları için verilen kapasite değeri ile yapılan hesaplarda, analizi yapılan şebeke için 314 kVAR kapasitif güç değeri bulunmuştur. Hesaplanan değer ile ölçüm sonuçlarını birbirini doğrulamaktadır. Şebeke üzerinde olumlu etkisi bulunmayan bu güç değeri, aktif güç değerinin yaklaşık %37,5 oranında olduğu görülmüştür. Bu oran TEDAŞ ve enerji dağıtım firmalarının müsaade ettiği %15 değerinin iki katından daha fazladır. AG şebekelerinde oluşan reaktif enerjinin giderilmesi için yapılan klasik kompanzasyon sistemlerinin tersine, burada şönt reaktörler kullanılmaktadır. İncelenen dağıtım şebekesinde paralel bağlı ve hattın AG tarafına bağlanmış 300 kVAR güce sahip 12 kademeli manuel anahtarlama şönt reaktör panosu kullanılmıştır. Üç grup halinde kademeli olarak devreye alınan şönt reaktörün etkileri gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her kademe devreye girdiğinde kapasitif reaktif güç değeri azalmıştır. 12 kademenin tamamının devreye alınması ile şebeke üzerinde oluşan bu güç değerinin tamamı yok edilmiştir.

Yeraltı kablolarının analizi için PSCAD / EMTDC simülasyon programı kullanılmıştır. Analizi yapılan kablo hattının çok uzun olmaması nedeniyle, kısa kablo hatlarının analizi için simülasyon çalışması için uygun olan toplu parametrelili tek bir pi model ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Pi model parametreleri üretici firma kablo enine kesit verileri kullanılarak PSCAD / EMTDC programında yer alan kablo hat sabitleri hesaplanabilmesine olanak sağlayan bir alt program kullanılarak hesaplanmıştır ve simülasyon programında bu veriler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar üretici firma katalog değerlerinde veriler ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Simülasyon çalışmasında veri boyutunu küçük tutmak amacıyla 5586m. uzunluğa sahip hat parametreleri kullanılarak tek bir “ π ” modeli kullanılmıştır. Simülasyon çalışması için hat parametreleri, analizi yapılan şebekeye ait alınan sonuçlarının simülasyon çalışmasında elde edilen veriler ile karşılaştırılarak doğrulanabilmesi için kablo üretici firmaların katalog değerleri kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmasında yük devrede değilken kaynak tarafındaki aktif ve reaktif güç değerleri ölçülmüştür. Şebeke ucunda herhangi bir yük bulunmamasına rağmen kaynak tarafında yaklaşık olarak -308 kVAR kapasitif reaktif güç değeri ölçülmüştür.

Aktif ve endüktif reaktif gücün aksine, kapasitif reaktif güç değeri kaynağa doğrudur. Yüksüz durumda simülasyon çalışmasında ölçülen reaktif güç değeri, hesaplan güç değeri ve şebekeden alınan güç değeri yaklaşık olarak birbiri ile aynıdır. Bu sonuç ile XLPE tipi kablunun şebekeye olan etkisi hem uygulama hem de simülasyon çalışması ile doğrulanmıştır. Simülasyon çalışmasındaki şönt reaktör kademeleri, analizi yapılan şebekeye göre, analiz süresi ve veri boyutu nedeniyle birleştirilmiş ve üç grup kademe ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Belirli zaman aralıklarıyla devreye alınan kademeler ile kapasitif reaktif güç değeri kompanze edilerek giderilmiştir. Simülasyon çalışmasında şönt reaktör için kullanılan transformatörün sargıları nedeni ile endüktif etki gösterdiği gözlemlenmiştir.

Simülasyon çalışmasında yükün ve şönt reaktör kademelerinin devreye alınması esnasında aktif ve reaktif güç dalgalanmalarının olduğu gözlemlenmiştir. XLPE tipi yeraltı kablolarının seri dirençleri havai hatlara göre düşüktür. Bunun sonucunda seri direnç üzerinde meydana gelen gerilim düşümü daha düşük olmakta ve hat sonlarında gerilim regülasyonu çok fazla olmamaktadır. Simülasyon çalışmasında hat boşta iken şönt reaktör yardımıyla kompanzasyon yapılması ile hat üzerinden çekilen reaktif akım bileşenlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda söz konusu akım bileşenlerinin hattın seri empedansında oluşturduğu gerilim düşümlerini azalttığı ve hat sonu gerilim regülasyonun fazla olmadığı doğrulanmıştır.

Hat üzerinden kapasitif ve endüktif reaktif güç çekilmesi hat üzerinden akan akım ile gerilim arasında faz farkı oluşturmaktadır. Simülasyon çalışmasında, hat boşta iken ölçülen akım ve gerilim arasında yaklaşık 90° farkı olduğu gözlemlenmiştir. Şönt reaktörün devreye alınması ile reaktif güç değeri azaltılmış ve bununla birlikte akım ve gerilim arasındaki faz farkının giderildiği gözlemlenmiştir.

5.2. Öneriler

Klasik kompanzasyon metotları kullanılarak AG şebekelerinde son kullanıcıya yakın noktalarda yapılan kompanzasyon sistemleri ihtiyaçları karşılamamakta ve yetersiz kalmaktadır. Bu kompanzasyon metotlarında, kompanzasyon için gereken referans değerleri akım trafoları ile AG' den alınmakta ve bu değerlere göre kompanze işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bunun sonucu olarak uzun mesafeli yeraltı kablolarının etkileri giderilememektedir. Analizi yapılan şebekedeki gibi uzun

mesafeli XLPE tipi yeraltı kabloları ile tesis edilmiş dağıtım şebekeleri için, OG referanslı şönt reaktörlerin kullanılması, özellikle güç tüketiminin azaldığı saatlerde, şebekenin güç kapasitesinin arttırılması, güç kaybının azalması ve gerilim düşümünün azalmasını sağlamaktadır.

Klasik anahtarlama reaktörler ile gerçekleştirilen kompanzasyon sistemlerinde kademelerin devreye giriş ve çıkışlarında akım ve güç yükselmeleri meydana gelmektedir. Yüklerin çok sık ve kısa süreli devreye girip çıktığı sistemlerin bulunduğu dağıtım şebekelerinde klasik anahtarlama kompanzasyon sistemleri kompanzasyon yapmaya yeterli olmayacaktır. Bunun yerine çok hızlı sürelerde anahtarlama yapan tristör anahtarlama kompanzasyon sistemlerinin kullanılması daha uygun olacaktır. Ayrıca yük çeşitliliğinin fazla olduğu dağıtım sistemlerinde hem endüktif hem de kapasitif özellikteki yüklerinde dikkate alınması ve iki bölgede çalışabilen kompanzasyon sistemleri kullanılmalıdır.

Sonuç olarak doğru analiz yapılarak elektrik enerjisinin minimum maliyet maksimum verim ile kullanılması sağlanabilir. Yük analizinin doğru yapılması ile doğru kompanzasyon metodu ve yeri belirlenmelidir. Seçilen sistem ekonomik, uygulanabilir ve reaktif güç alışverişini sağlamalıdır. AG tarafında yapılan kompanzasyon sistemlerinin yanında OG kompanzasyonları da yapılarak, tam verimlilik açısından doğru noktaya yapılmalıdır. OG dağıtım merkezleri, indirici merkezler, birden fazla hattın ayrıldığı transformatör merkezleri doğru noktalar olabilir. Enerji sürekliliği ve verimliliği açısından enerji iletim ve dağıtım sistemindeki tüm elemanlar bir bütün olarak değerlendirilmelidir.

Ayrıca simülasyon programları yardımı ile dağıtım şebekeleri tesis edilmeden önce, kullanılacak yeraltı kablosunun katalog değerlerindeki hat sabitleri ile çeşitli durumların analizi yapılabilir. Bu sayede ihtiyaç olan ve doğru sistemin tesis edilmesi sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Demirkut, B. Elektrikle Enerji Taşınması. İstanbul Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Yayınları, İstanbul, 1971, 727 s.
2. Enerji İletim Hatları, <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane>, (Erişim Tarihi: 12.02.2020).
3. Millî Eğitim Bakanlığı, Elektrik-Elektronik Teknolojisi Yeraltı Enerji Hatları. MEĞEP Yayınları, Ankara, 2012, 131 s.
4. Aydoğdu, E., Olgun, O. Statik Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Uygulama Devresi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2007, 36 s. (Bitirme Tezi).
5. Kıyan, M., Kayabaşı, M. Alçak Gerilim Reaktif Güç Sistemlerinin Deneysel Karşılaştırılması. EMO İzmir Şubesi Haber Dergisi, 2010, 22(234), 32-35.
6. De Silva, J., Kothalawala, L. PSCAD/EMTDC ile Yeraltı ve Havai Hatların Modellenmesi. Manitoba Research Centre Webinar, 2016, 1-10.
7. Shekhar, A., Kontos, E., Ramírez-Elizondo, L., Rodrigo-Mor, A., Bauer, P. Grid capacity and efficiency enhancement by operating medium voltage AC cables as DC links with modular multilevel converters. Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2017, 93(1), 479–493.
8. Santos, M., Calafat, M. A. Dynamic simulation of induced voltages in high voltage cable sheaths: Steady state approach. Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2019, 105(1), 1–16.
9. Liu, Y., Zhang, S., Cao, X., Zhang, C., Li, W. Simulation of electric field distribution in the XLPE insulation of a 320 kV DC cable under steady and time-varying states. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2018, 25(3), 954–964.
10. Popović, L. M. Inductive influence of surrounding metal installations on power transfer capacity of HV cable lines with applied cross-bonding. Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2020, 120(1), 16-20.
11. Schönleber, K., Collados, C., Pinto, R. T., Ratés-Palau, S., Bellmunt, O. Optimization-based reactive power control in HVDC-connected wind power plants. Renew. Energy, 2017, 109(1), 500–509.
12. Ra, N. S., Mustafa, B., Kawashima, T., Murakami, Y., Hozumi, N. Development of a Partial Discharge Measuring Method for a Long-Distance Cable Line. IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng., 2019, 14(7), 996–1001.
13. Yu, Q., Li, X., Zhang, P., Yang, P., Chen, Y. Properties of Water Tree Growing in XLPE and composites. 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, Proceedings, 2019, 409–412.
14. McDermid, W., Partyka, M., Black, T. Water Tree Detection in Medium Voltage XLPE Cables. IEEE Electrical Insulation Conference, 16-19 Haziran, 2019, Kanada, (Bildiriler Kitabı, 217–220).
15. Asano, A., Takahashi, T., Maeda, K., Niwa, T. Water tree retardant XLPE cable using VLDPE, IEEE Trans. Power Deliv., 1994, 9(1), 553–558.
16. Kaminaga, K., Yoshifuji, N., Uozumi, T., Yorita, J., Inoue, Y., Fukunaga, S. Study on Deterioration Mechanism of XLPE Cables, IEEJ Trans. Fundam. Mater., 1997, 117(1), 35–41.
17. Ra, N., Futami, H., Kawashima, T., Murakami, Y., Hozumi, N., Kurihara T., Okamoto, T. Study on charge dynamics in water-Tree XLPE insulation for deterioration diagnosis, International Symposium on Electrical Insulating Materials, 11-15 Eylül, 2017, Japonya, (Bildiriler Kitabı, 343–346.)

18. Thomas, A. J., Saha, T. K. Frequency domain dielectric relaxation in water tree degraded XLPE cables. Australasian Universities Power Engineering Conference, 09-12 Aralık, 2007, Avustralya, (Bildiriler Kitabı, 17-24.)
19. Watanabe, K., Yagyu, H., Sekii, Y., Marumo, M. Development of new water tree suppressive XLPE cable. IEEE Trans. Power Deliv., 1986, 1(1), 27–33.
20. Nagata, T., Shimizu, N. Deterioration in aged XLPE cables. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 19-21 Ekim, 1992, Kanada, (Bildiriler Kitabı, 579–585.)
21. Werelius, P., Holmgren, B., Gafvert, U. Diagnosis of medium voltage XLPE cables by high voltage dielectric spectroscopy. IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 22-25 Haziran, 1998, İsveç, (Bildiriler Kitabı, 79–84.)
22. Zhou, L., Cheng, R., Jiang, J., Peng, Q., Wang, D., Zeng, Y., Influence of partial air pressure on the growth characteristics of electrical tree in XLPE cable. Gaodianya Jishu/High Volt. Eng., 2015, 41(8), 2650–2656.
23. Malik, N. H., Pazheri, F. R., Al-Arainy, A. A., Qureshi, M. I. Analytical Calculation of AC and DC Electric Field Distribution at High Voltage Cable Terminations. Arab. J. Sci. Eng., 2014, 39(4), 3051–3059.
24. Hoogendorp G. Steady State and transient behavior of underground cables in 380 kV transmission grids. Delft University of Technology, Hollanda, 2012, 178s. (Doktora Tezi)
25. Anadol M. A., Aydın M., Yalçınöz T. Laboratuvar Ölçekli Yeraltı Kablo Modelinin Tasarımı ve Uygulaması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi. 2012, 27(2), 245-253.
26. Sürmeli B. Marmaray Bc1 Projesi Kapasitif/Endüktif Kompanzasyon Sistemi. EMO Elektrik Mühendisliği Dergisi. 2014, 541(1), 56-58.
27. Angay M. N., İşletme Halindeki Iğdır Üniversitesi Dağıtım Şebekesinin Yer Altı Elektrik Kablolarında Kapasitif Etkinin İncelenmesi ve Şönt Reaktör Tesisi. Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Iğdır, 2019, 71s. (Yüksek Lisans Tezi)
28. Zabudskiy E. I., Balandina G. I. XII. International Symposium Intelligent Systems, 05-07 Ekim, 2016, Moskova, 103(1), (Bildiriler Kitabı, 511-516.)
29. Yoldaş, M. A. Orta Gerilim Dağıtım Sistemlerinde Reaktif Güç Kompanzasyon Tekniklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği, İstanbul, 2011, 207 s. (Yüksek Lisans Tezi)
30. Erol, S. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Orta Gerilim Şebekesinde Uygulanması ve Enerji Kalitesine Etkilerinin Araştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş, 2011, 83 s. (Yüksek Lisans Tezi)
31. Saner, Y. Güç Dağıtımı (Enerji Dağıtımı) 3. Birsen Yayın Evi, İzmit, 2007, 830 s.
32. Kablolarda Akım Taşıma Kapasitesinin Sıcaklıkla Değişimi, <https://www.elektrik.gen.tr>, (Erişim Tarihi: 12.02.2020).
33. Ay, S. Enerji İletim Sistemleri Cilt 2. Birsen Yayınevi, İstanbul 2019, 418 s.
34. Anadol, M. A. Laboratuvar Ölçekli Bir Karma İletim Hattında Statcom Kullanılarak Sistem Dinamik ve Sürekli Hal Davranışlarının İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Konya, 2012, 133 s. (Doktora Tezi).

35. Demiray, O. Enerji Ekonomisinde Reaktif Güç Kompanzasyonu. Reaktif Güç Kompanzasyonu Semineri, 10-11 Ocak, 1983, İstanbul, (Seminer Notları Kitabı, 224-225).
36. Özay, N. Reaktif Enerji Kompanzasyonu ve Yük Denetimi. Reaktif Güç Kompanzasyonu Semineri, 10-11 Ocak, 1983, İstanbul, (Seminer Notları Kitabı 217-218).
37. Sabır, R., Kuyugöz A., Ateş, M. Orta Gerilim Tesislerinde Güç Katsayısının Düzeltilmesi. Y.Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2010, 15(2), 102-111.
38. Engin, B., Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Fakültesi, İstanbul. 2008, 104s. (Yüksek Lisans Tezi).
39. Saner, Y. Güç Dağıtım-8 Güç Kompanzasyonu. Birsan Yayın Evi, İzmit, 2007, 288 s.
40. İsmailoğlu, H. Aşırı Gerilimler, Oluşumları, Etkileri ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma. I. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi-Yüksek Gerilim Çalıştayı. 07-10 Mayıs, 2009, İzmir, (Bildiri Özetleri Kitabı 190-196).
41. Şönt Reaktörlerin Yapı Karakteristik ve Uygulamaları <http://www.3eelectrotech.com.tr>, (Erişim Tarihi: 15.02.2020).
42. Yürekten, S. New Trends in UHV Shunt Reactor Core Technology. International Conference on New Technologies in Transmission, Distribution, Load Despatch & Communication. 19-21 Nisan, 2011, Yeni Delhi, (Bildiriler Kitabı, 1-6).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Salih BİLGİÇ
Doğum Yeri ve Yılı : Ankara, 1986
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : 171271005@ogr.cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Çok Programlı Astsubay Hazırlama Lisesi, 2003
Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2017
Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2020

Mesleki Deneyim

Kurum bilgisi : Türk Silahlı Kuvvetleri Kara Kuvvetleri Komutanlığı Astsubay 2005-2017
Kurum bilgisi : Eskon Elektrik İnşaat Sanayi Ticaret Ltd.Şti 2017- ... (Halen)