

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ İLETİM HATLARINDA VERİM ARTIRIMINA
YÖNELİK HVDC SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DORUK GÜRLEROĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. UĞUR SAVAŞ SELAMOĞULLARI**

İSTANBUL, 2011

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ İLETİM HATLARINDA VERİM ARTIRIMINA
YÖNELİK HVDC SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

DORUK GÜRLEROĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. UĞUR SAVAŞ SELAMOĞULLARI**

İSTANBUL, 2011

Enerji iletim sistemlerinde verimlilik önemli bir şarttır. Bu sistemlerin mümkün olduğunca yüksek verimde olması istenir. Dolayısıyla, enerji iletim sistemlerinde verim artırımına yönelik çalışmalar aralıksız devam eder. Bu çalışmalardan birinin ürünü olan HVDC ile enerji iletim sistemi, belli anma gücü ve hat uzunluğunun üstünde güvenilir ve verimli olduğunu, geçtiğimiz 50 yıl içerisinde kurulan sistemlerle kanıtlamıştır.

Bu çalışmada, HVDC ile enerji iletimi sisteminin teorisi anlatılmış ve farklı uygulamalarından bahsedilmiştir. Ancak çalışmanın esas konusu sistem kayıpları ve kayıp maliyeti olduğu için, sistemin kontrolünden detaylı olarak bahsedilmemiştir. HVDC sisteminin kayıpları, AC alternatifi ile karşılaştırmalı olarak anlatılmıştır. Bu iki sistem arasında, kayıplar nedeniyle oluşan maliyet farklılıkları irdelenmiştir. Kurulum maliyetleri ile ilgili günümüz koşullarındaki sistem unsurlarının fiyatları belirlenememiştir. Ancak geçtiğimiz yıllarda, özellikle Amerika’ da yapılan çalışmalar burada paylaşılarak, kurulum maliyetleri arasındaki farklar anlatılmaya çalışılmıştır.

Kayıp maliyetlerini hesaplamak için 2011 yılı Türkiye’ deki enerji tarifesi kullanılmıştır. Bunun sebebi ise eğer sistem kayıpları oluşmasaydı, hesaplanan değerler kadar gelir elde edilecekti. Bu önermeye göre hem AC sistemin hem de DC sistemin kayıp maliyetleri karşılaştırılmış ve sonuçları son bölüme yansıtılmıştır.

Bu çalışma esnasında desteklerini esirgemeyen anneme ve babama teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez danışmanım olan Yrd. Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI’ na yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Yine arkadaşım Yunus Emre AKKAYA’ ya verdiği destek ve fikirlerden dolayı teşekkür ederim.

Nisan, 2011

Doruk GÜRLEROĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	
HVDC ile ENERJİ İLETİMİNİN TEMELLERİ.....	5
2.1 Giriş	5
2.2 AC Enerji İletimi ile DC Enerji İletiminin Karşılaştırılması	7
2.2.1 Enerji İletimi Maliyetlerinin Değerlendirilmesi	7
2.2.2 Teknik İmkanların Değerlendirilmesi	8
2.2.3 Güvenilirlik ve kullanılabilirlik Maliyetlerinin Değerlendirilmesi	11
2.2.4 DC ile Enerji İletiminin Uygulamaları	11
2.3 HVDC Sistemlerinin Çeşitleri	13
2.3.1 Monopolar Bağlantı	13
2.3.2 Bipolar Bağlantı	13
2.3.3 Homopolar Bağlantı	14
2.3.4 Sırt-Sırtta Bağlantı	14
2.3.5 Çok Terminalli Bağlantı	14

2.4	Özet	15
BÖLÜM 3		
HVDC SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇEŞİTLERİ		16
3.1	Giriş	16
3.2	Gerilim Kaynaklı Dönüştürücüleri (VSC) Kullanan Enerji İletimi Sistemi.....	18
3.2.1	VSC-HVDC Bileşenleri	18
3.2.2	VSC-HVDC' nin Avantajları ve Uygulamaları	20
3.3	Akım Kaynaklı Dönüştürücüleri (CSC) Kullanan Enerji İletimi Sistemi	21
3.3.1	Dönüştürücü Merkezin Temel Elemanları	22
3.3.1.1	Dönüştürücü Merkezin AC Tarafı	22
3.3.1.2	AC Harmonik Filtreleri	22
3.3.1.3	Yüksek Frekanslı Filtreler	23
3.3.1.4	Dönüştürücü Transformatörü	23
3.3.1.5	Tristörlü Anahtarlar	23
3.3.1.6	DC Düzeltme Reaktörü	25
3.3.1.7	DC Filtre	26
3.3.1.8	Aktif Filtreler	26
3.3.1.9	Dönüştürücü Merkezin DC Tarafı	27
3.3.1.10	Derin Çukurlu Topraklama Elektrodu	27
3.3.1.11	AC-DC Ölçümler	28
3.3.2	Sıkıştırılmış Dönüştürücü Merkez Tasarımı	29
3.3.3	Çift Kutuplu HVDC Sisteminin Kontrolü	30
3.4	Kapasitör Komütasyonlu Dönüştürücüler	32
3.5	Özet	32
BÖLÜM 4		
HVDC SİSTEMİNDE KAYIPLAR.....		34
4.1	Giriş	34
4.2	Dönüştürücü Merkez Kayıpları	34
4.2.1	HVDC Dönüştürücü Merkezinin Toplam Kayıplarının Belirlenmesi	35
4.3	Hat Kayıpları	37
4.4	Enerji İletim Sistemlerinde Kullanılan Çelik Özlü Alüminyum İletkenler	39
4.5	Özet	40
BÖLÜM 5		
HVAC ve HVDC SİSTEMLERİNİN KURULUM MALİYETLERİ		41
5.1	Giriş	41
5.2	Hat Kurulum Maliyetleri.....	42
5.3	AC Şalt Tesisi Maliyeti	43
5.4	HVDC Dönüştürücü Merkez Maliyetleri.....	44
5.5	Toplam Maliyetlerin Karşılaştırılması.....	46
5.6	Özet	49

BÖLÜM 6

HVDC ALTERNATİFİ İÇİN YAPILAN ANALİZLER	50
6.1 Giriş	50
6.2 Kurulum Maliyetleri	53
6.3 Kayıplardan Kaynaklanan Maliyetler	54
6.3.1 DC Sistemin Kayıp Maliyeti	54
6.3.2 AC Sistemin Kayıp Maliyeti	56
6.4 Teorik Analizler	58
6.4.1 AC ve DC Sistemin Kayıp Maliyetlerinin Karşılaştırılması	58
6.4.2 AC ve DC Sistemin Toplam Maliyetlerinin Hattın Uzunluğuna göre Değişimi	61
6.4.3 DC Sistemin Kurulum Maliyetinin Geri Kazanım Süresi	65
6.5 Ölçüm Verileri ile Yapılan Analizler	68
6.5.1 AC ve DC Sistemin Kayıp Maliyetlerinin Karşılaştırılması	68
6.5.2 AC ve DC Sistemin Toplam Maliyetlerinin Hattın Uzunluğuna göre Değişimi	69
6.5.3 DC Sistemin Kurulum Maliyetinin Geri Kazanım Süresi	71
6.6 Özet	73

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	82

SİMGE LİSTESİ

α	Direncin sıcaklık katsayısı
$\cos \varphi$	Dönüştürücünün güç faktörü
δ	Faz açısı
I_{DC}	DC hattın akan akım
i	Meskenlerin, toplam yüklere (mesken, sanayi alçak ve orta gerilime) oranı
ℓ	Hattın uzunluğu
P_{DC}	Dönüştürücü merkezin aktif gücü
P	HVDC enerji iletim hattının anma gücü
R	DC hattın direnci
$R_{AC,DC}$	Hattın 75°C' deki kilometre başına toplam AC veya DC direnci
R_0	İletkenin 20°C'deki DC direnci
T, T_0	İletkenin işletme sıcaklığı (75°C), normal koşullardaki sıcaklığı (20°C)
U	Fazlar arası AC gerilim
u_{DC}	Hattın DC gerilimi

KISALTMA LİSTESİ

ABB	Asea Brown Boveri
AC	Alternating Current
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced
AWG	American Wire Gauge
CCC	Capacitor Commutated Converters
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
CSC	Current Source Converters
CSCC	Controlled Series Capacitor Converters
DC	Direct Current
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
GTO	Gate Turn-off Thyristor
HF	High Frequency
HVAC	High Voltage Alternating Current
HVDC	High Voltage Direct Current
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
LTT	Light Triggered Thyristors
MTDC	Multi Terminal Direct Current
PWM	Pulse Width Modulation
RoW	Right of Way
SIL	Surge Impedance Loading
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static VAr Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Compensator
VSC	Voltage Source Converters
VSC-HVDC	Voltage Source Converters-High Voltage Direct Current

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	AC-DC enerji iletimi sistemleri için RoW karşılaştırması	7
Şekil 2.2	AC ve DC hatların mesafeye bağlı maliyet karşılaştırması	8
Şekil 2.3	HVDC bağlantı çeşitleri; (a) monopolar bağlantı, (b) çift kutuplu bağlantı ve (c) homopolar bağlantı	14
Şekil 2.4	Sırt-sırta (a), paralel çok-terminalli (b) ve seri çok-terminalli (c) bağlantı şekilleri	15
Şekil 3.1	CSC ve VSC tipindeki dönüştürücüler	16
Şekil 3.2	VSC-HVDC dönüştürücü merkezinin tek hat şeması	18
Şekil 3.3	VSC-HVDC sistemi	19
Şekil 3.4	Çift kutuplu HVDC sisteminde bir dönüştürücü merkezin tek hat şeması	22
Şekil 3.5	HVDC tristörlerinin tıkama gerilimindeki ve gücü kullanma yeteneğindeki gelişim	24
Şekil 3.6	Silikon devre levhası ve LTT' nin iç yapısı	24
Şekil 3.7	Açık hava anahtarının temel elemanları	25
Şekil 3.8	Konti-Skan I merkezindeki açık hava anahtarının işletimi	25
Şekil 3.9	Derin topraklama elektrodu	28
Şekil 3.10	Optik Akım Transdüseri (OCT)	28
Şekil 3.11	1980' li yıllarda kurulan 2000 MW' lık HVDC dönüştürücü merkezi	29
Şekil 3.12	Modern 2000 MW' lık HVDC dönüştürücü merkezi	29
Şekil 3.13	Modern HVDC dönüştürücü merkezinin planı	30
Şekil 4.1	Korona kayıplarının AC ve DC hatlardaki yüksekliğe ve hava koşullarına göre değişimi	38
Şekil 4.2	Farklı gerilim seviyelerindeki AC ve DC hatlardaki yüzde güç kaybı	38
Şekil 4.3	1200 MW' lık AC ve DC sistemin toplam kayıplarının iletim mesafesine göre değişimi	39
Şekil 5.1	Nelson River Bipole 1 için 2007 yılı maliyetlerine göre HVDC ile HVAC iletim sistemi maliyetleri	46
Şekil 5.2	Sırasıyla 3500 MW ve 10000 MW' lık iletim sistemlerin dönüştürücü merkez ve hat maliyetlerinin toplamı	47
Şekil 5.3	Farklı gerilim seviyesi ve tipleri için hat kayıplarına bağlı maliyet fonksiyonları	47
Şekil 6.1	1000 MW' lık HVDC sistemi için farklı gerilim seviyelerindeki kayıplar ..	59

Şekil 6.2	321,7488032 MW' lık ortalama yüklenmeye göre AC ve DC kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması	61
Şekil 6.3	Alt birim maliyetler dikkate alınarak AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 6.4	Üst birim maliyetler dikkate alınarak AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması	65
Şekil 6.5	Alt birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum maliyeti ile DC sistemin kullanımı sayesinde elde edilen kazancın karşılaştırılması	66
Şekil 6.6	Alt birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum maliyeti ile DC sistemin kullanımı sayesinde elde edilen kazancın karşılaştırılması	67
Şekil 6.7	Ölçüm verilerine dayalı AC hat ile DC alternatifinin kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması	69
Şekil 6.8	Alt birim maliyetlere ve AC ölçüm verilerine göre, AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması	70
Şekil 6.9	Üst birim maliyetlere ve AC ölçüm verilerine göre, AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması	71
Şekil 6.10	Ölçüm verilerine ve alt birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum ve 50 yıllık kayıp maliyeti dikkate alınarak DC sistemin kendini geri ödeme süresi	72
Şekil 6.11	Ölçüm verilerine ve üst birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum ve 50 yıllık kayıp maliyeti dikkate alınarak DC sistemin kendini geri ödeme süresi	72

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Dünyadaki bazı HVDC projelerinin listesi 6
Çizelge 3.1	Dönüştürücü çeşitlerinin karşılaştırması 17
Çizelge 3.2	İki terminalli DC hat için kontrol stratejisi seçenekleri 31
Çizelge 4.1	HVDC dönüştürü merkezindeki kayıp dağılımı 37
Çizelge 4.2	Çelik özlü alüminyum iletkenler (ACSR) 40
Çizelge 5.1	AC iletim hatları için ekonomik veriler; 110 kV – 380 kV çift devre, 500 kV – 750 kV tek devre 42
Çizelge 5.2	1997 yılı Amerika koşulları için bir enerji iletim hattının tahmini maliyeti (\$/km) 43
Çizelge 5.3	Nelson River Bipole 1 için 500 kV' luk bir AC Şalt tesisi maliyetleri 44
Çizelge 5.4	1997 yılı için farklı HVDC dönüştürücü merkezlerinin anahtar teslim maliyetleri ve ayrıntılı dökümü 45
Çizelge 5.5	HVDC ve HVAC iletim sistemi alternatiflerinin maliyet karşılaştırması .. 48
Çizelge 6.1	Mevcut 380 kV' luk AC hatta ait değerler 50
Çizelge 6.2	Mevcut AC iletim hattının ısı güç limitine göre DC alternatif için seçilen farklı düzenlerdeki iletken tipleri 52
Çizelge 6.3	Çift kutuplu HVDC sisteminin kurulum maliyetleri 54
Çizelge 6.4	Hesaplamalarda kullanılan enerji tarifeleri 55
Çizelge 6.5	AC ve DC sistemin kurulum maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan alt birim maliyetler 64
Çizelge 6.6	AC ve DC sistemin kurulum maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan üst birim maliyetler 65

**ENERJİ İLETİM HATLARINDA VERİM ARTIRIMINA YÖNELİK HVDC
SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

Doruk GÜRLEROĞLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

Mevcut elektrik iletim şebekesinde enerjinin verimli ve ekonomik bir şekilde iletilmesi temel mühendislik problemlerinden biridir. Bu problemi aşmak için geçmiş yıllarda çeşitli çözümler geliştirilmiş ve çalışmalar devam etmektedir. İletim şebekesinde enerji verimliliğini sağlamak üzere kullanılabilecek çözümlerden biri de yüksek gerilimde doğru akım (HVDC) ile enerji iletimi olabilir.

Bu tez çalışmasında HVDC sistemleri teorik olarak incelenecektir. Mevcut AC enerji iletim hattının DC iletim hattına dönüştürülmesinin enerji verimliliği açısından nasıl bir sonuç doğuracağı irdelenecektir. Kullanılmakta olan AC iletim hattının HVDC iletim hattı ile değiştirilmesinin şebeke kayıplarına etkisi göz önünde bulundurularak maliyet analizi yapılacaktır. Elde edilen sonuçlara göre HVDC kullanımının ekonomik olarak uygunluğu incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: HVDC, enerji iletimi, enerji verimliliği, iletim sistemi kayıpları, iletim sistemi maliyetleri

ABSTRACT

HVDC SYSTEMS ANALYSIS FOR ENERGY EFFICIENCY INCREASE OF POWER TRANSMISSION LINES

Doruk GÜRLEROĞLU

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

In the existing electricity transmission network, an efficient and economical transmission of energy is one of the basic engineering problems. In the past, various solutions have been developed to overcome this problem and the studies are continuing. One of the solutions can be used to provide the energy efficiency of the transmission network, is the high voltage direct current (HVDC) power transmission.

In this thesis, HVDC systems will be examined in theory. The effects of replacing the existing AC power transmission line to DC transmission line will be discussed in terms of energy efficiency. Replacement cost analysis will be made taking into account the effect of network losses of HVDC transmission line with the existing AC transmission line. The compatibility of HVDC transmission system will be examined, according to the results of the feasibility study.

Key words: HVDC, power transmission, energy efficiency, losses of transmission system, costs of transmission system

1.1 Literatür Özeti

Günümüzün önemli bir alanı olarak ortaya çıkan enerji kavramı ve enerjinin daha verimli kullanımı, enerji üretimi ve iletimi açısından oldukça önemlidir. Geleneksel yollardan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin, iletim ve dağıtımındaki kayıplarının mümkün olduğunca düşük olması istenir. Bunun yanı sıra, müşteriye verilen enerjinin kaliteside oldukça önemlidir. Bozucu etkilerin ve yüksek kayıp oranlarının oluşmasını önlemek için Esnek AC İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission Systems (FACTS)) olarak adlandırılan; Statik VAR Kompanzatörleri (SVC), Tristör ve GTO Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC), Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM), Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC),... gibi cihazlar geliştirilmiştir [1-3].

FACTS cihazları, AC sistem içerisinde sistemin gerilim kararlılığını artırmak ve sistem kayıplarını azaltmak için kullanılan çözümlerdir. Dolayısıyla, FACTS cihazları, sistem kararlılığını artırıp kayıpları azaltırken enerji verimliliğini de sağlamaktadır. Enerji verimliliği ise iletim sistemi maliyetlerini düşürmek için gerçekleştirilmesi gereken bir zorunluluktur. Çünkü büyük güçlü bir AC iletim sistemi üzerinde, sistemin ömrü boyunca oluşan enerji kaybı, küçük güçlü bir santralin aynı sürede üreteceği enerjiye denk gelebilir. Bu bağlamda FACTS cihazları enerji verimliliği ve sistem kararlılığı açısından AC sistemler için bir çözüm oluşturmaktadırlar [2, 4].

Güç sistemlerinde, enerji verimliliğini sağlamak ve sistem kararlılığını artırmak adına, FACTS cihazlarına alternatif bir çözüm olan HVDC (High Voltage Direct Current (Yüksek

Gerilimde Doğru Akım)) ile enerji iletimi seçeneğinde vardır. HVDC sisteminde kullanılan yarı iletken teknolojisi sayesinde, enerji iletim sistemi seri bir şekilde kontrol edilebilir hale gelmektedir [1-5]. Bu çalışmada, mevcut bir AC iletim hattının yerine HVDC iletim hattının kullanılmasının getireceği enerji kazanımı, gerçek verilere dayanarak ortaya konacaktır.

HVDC ile enerji iletimi sisteminin temel özellikleri, avantajları, dezavantajları ve sistemde kullanılan cihazlar [2-9] arasındaki referanslarda detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Dönüştürücü merkezlerde kullanılan IGBT, GTO ve tristör gibi yarı iletken devre elemanlarının nitelikleri [10-12] arasındaki referanslarda incelenmiştir.

[13-15] arasındaki referanslarda VSC-HVDC (Voltage Source Converters-High Voltage Direct Current (Gerilim Kaynaklı Dönüştürücüler-Yüksek Gerilimde Doğru Akım)) sisteminin yapısı, avantaj ve dezavantajları, klasik HVDC sistemi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sistemin kontrol özelliklerinden bahsedilmiştir. VSC-HVDC sistemiyle rüzgar çiftliklerinin şebekeye bağlanması [16-19] arasındaki referanslarda incelenmektedir. Sistem kablolarında ve terminallerde oluşabilecek kayıplar referans [14] te farklı güç ve gerilim seviyeleri için incelenmiştir. Referans [20] de ise HVAC (High Voltage Alternating Current (Yüksek Gerilimde Alternatif Akım)), HVDC ve VSC-HVDC alternatif sistemlerinin oluşturacağı kayıplar karşılaştırılmıştır. Deniz açıklarına kurulan rüzgar çiftliklerinin HVAC ve HVDC ile şebekeye bağlanması, ekonomik açıdan [21, 22] referanslarında belli varsayımlara ve önceki projelerden alınan mali verilere dayanarak karşılaştırılmıştır.

Büyük güçlerin uzun mesafelerde HVDC ile iletiminde sistem kayıpları; hat ve terminal kayıpları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Terminal kayıpları, IEEE standardı olan referans [23] te detaylı bir şekilde incelemiştir. Hat kayıpları ise I^2R ve korona kayıpları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Korona kayıpları referans [24] te anlatılmaktadır. Toplam sistem kayıplarına ve maliyetlerine ilişkin detaylı bilgiler, HVAC alternatifi ile karşılaştırmalı olarak [6, 7, 25-32] referanslarında verilmiştir. Enerji iletimi sistemlerinde kullanılan çelik özlü alüminyum iletkenler ile ilgili detaylı bilgi referans [33] te verilmiştir. Çelik özlü alüminyum iletkenlerin tiplerine göre özellikleri bir tablo halinde verilmiştir [34, 35]. Oda sıcaklığındaki bir iletkenin, işletme sıcaklığındaki DC direncinin nasıl bulunacağı referans [36] da açıklanmaktadır.

Günümüzde şebekedeki DC hat sayısı, AC hatların sayısına kıyasla oldukça azdır. Bu durum göstermektedir ki HVDC ile enerji iletimi sadece özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Öte yandan teknolojiye gelişmeler ve çok-terminalli DC (MTDC) sistemlerin tanıtımıyla, DC ile enerji iletiminin uygulama alanları genişleyecektir. Ancak gelecekte AC şebekesinin yerini DC şebekesinin alacağı beklenmemektedir. Bu durumun iki büyük nedeni vardır:

- İlk olarak, MTDC sistemlerinin kontrolü ve korunması karmaşık ve ekonomik fedakarlıklar yapılmadıkça DC şebekelerdeki gerilim dönüşümünün (DC/DC dönüştürücüler) yapılamamasıdır.
- İkinci olarak, güç elektroniğindeki teknolojik gelişmeler, AC ile enerji iletiminde FACTS cihazlarının kullanılmasıyla performans artımına sebep olmuştur [4].

Literatürde yapılan çalışmalar, genel olarak HVDC sistemleri ile HVAC sistemlerinin karşılaştırılmasına yöneliktir [2-8, 20-22, 25-29]. Ancak HVDC iletim sisteminin Türkiye açısından uygulanabilirliği ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, HVDC iletim seçeneğinin Türkiye açısından uygulanabilirliği incelenecektir.

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı, Türkiye’de HVDC sisteminin ekonomik uygulanabilirliğinin araştırılması ve maliyet analizinin yapılmasıdır. Bu amaçla, Türkiye enerji iletim sisteminde kullanılan 380 kV’luk çift devre Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli AC iletim hattının DC alternatifi incelenecektir. Belirtilen hatta ölçülmüş güç verileri kullanılarak, hatta meydana gelen kayıp ve bunun getirdiği maliyet ortaya konulacaktır. Hattın yeni bir HVDC iletim hattı ile değiştirilmesi durumu için HVDC hattının kurulum ve işletim maliyeti çıkarılacaktır. Yeni kurulan bir HVDC enerji iletim hattının, ekonomik açıdan geri dönüşüm zamanı incelenecektir. Beklenen; DC sistemin hat kayıpları, AC sistemin hat kayıplarına göre daha düşük olduğundan, DC alternatifin kurulum maliyetinin kısa zaman sonunda geri kazanılmasıdır.

1.3 Hipotez

HVDC enerji iletim hattında, AC iletim hattına göre daha az iletken kullanımı gerektiğinden, aynı güç seviyesi için HVDC enerji iletim hattındaki kayıplar AC alternatifine göre daha az olacaktır. Elbetteki DC alternatifin ilk kurulum maliyeti, AC alternatife göre daha yüksektir. Ancak DC alternatif daha verimli olduğu için, yıllık kayıp enerji maliyeti daha düşüktür ve belli bir işletim süresinden sonra, AC alternatife göre daha ekonomik olacaktır. Mevcut AC iletim hattının, DC iletim hattı ile değiştirilmesi sonucunda elde edilecek enerji kazanımına bağlı tasarruf miktarı, yeni kurulacak DC iletim hattının kurulum maliyetini karşılayacaktır ve Türkiye için HVDC iletim hattı seçeneği daha ekonomik olacaktır. Dolayısıyla, Türkiye'ye kurulacak yeni enerji iletim hatları için HVDC sisteminin tercih edilmesi önerilir.

HVDC İLE ENERJİ İLETİMİNİN TEMELLERİ

2.1 Giriş

HVDC teknolojisi ilk olarak Gotland (1954) ve Sardinya' da (1967) deniz altı kablo bağlantılarında kullanılmıştır. Daha sonra uzun mesafeli enerji iletiminde civa-buharlı anahtarlar kullanılarak Pasifik Bağlantı Hattı (1970) ve Nelson Nehri (1973) sistemleri gerçekleştirilmiştir. 1972 yılında, Eel Nehri' nde Quebec ile New Brunswick arasındaki ilk sırt sırta asenkron bağlantısı ile HVDC teknolojisinde önemli bir adım atılmıştır. Bu sistemde ayrıca tristörlü anahtar (yarı iletken anahtarlama) teknolojisi kullanılmıştır [4].

HVDC enerji iletiminin ilk 25 yılı, yani 1970' li yılların ortalarına kadar civa-buharlı dönüştürücüler ile sürdürülmüştür. 2000 yılına kadar gelen sonraki 25 yıl ise tristörlü anahtar kullanan hat-komütasyonlu dönüştürücülerle sürdürülmüştür. Sonraki 25 yıla zorlamalı-komütasyonlu dönüştürücüler yaygın olarak kullanılacaktır. Zorlamalı-komütasyonlu dönem Kapasitör Komütasyonlu Dönüştürücüler (CCC) ile başlamıştır. Bu elemanlar, üstün karakteristikli yüksek güçlü anahtarlama elemanlarının ekonomikleşmesiyle yerlerini kendinden komütasyonlu dönüştürücülere bırakacaklardır [4]. Dünyada tamamlanmış bazı HVDC projeleri Çizelge 2.1' de verilmiştir [31].

Çizelge 2.1 Dünyadaki bazı HVDC projelerinin listesi [31]

Adı	Konumu	Kablo (km)	Havai Hat (km)	Gerilim ($\pm$ kV)	Güç (MW)	Yıl	Tipi	Notlar
Gotland 1	İsveç	98	-	200	20	1954	Civa	1986' da kapatıldı
Cross Channel	Fransa İngiltere	64	-	100	160	1961	Civa	1984' te kapatıldı
Konti Skan 1	Danimarka İsveç	87	89	250	250	1964	Civa	2006' da tristöre geçildi
Nelson River Bipole 1	Kanada	-	895	450	1620	1971	Civa	1993/ 2004' te tristöre
Kings north	İngiltere	85	-	266	640	1975	Civa	1987' de kapatıldı
Itaipu 1	Brezilya	-	785	600	3150	1984	Tristör	Üretici: ABB
Itaipu 2	Brezilya	-	805	600	3150	1984	Tristör	Üretici: ABB
Guizhou Guang- dong II	Çin	-	1225	500	3000	2007	Tristör	Üretici: Siemens
Sapei	İtalya	440	-	500	500	2009	Tristör	Üretici: ABB
NordE.ON 1	Almanya	203	-	150	400	2009	IGBT	Üretici: ABB
Xianjiaba Shanghai	Çin	-	2071	800	6400	2010	Tristör	Üretici: ABB
Yunnan Guangdong	Çin	-	1418	800	5000	2010	Tristör	Üretici: Siemens
Caprivi Link	Namibia	970	-	500	300	2010	IGBT	-

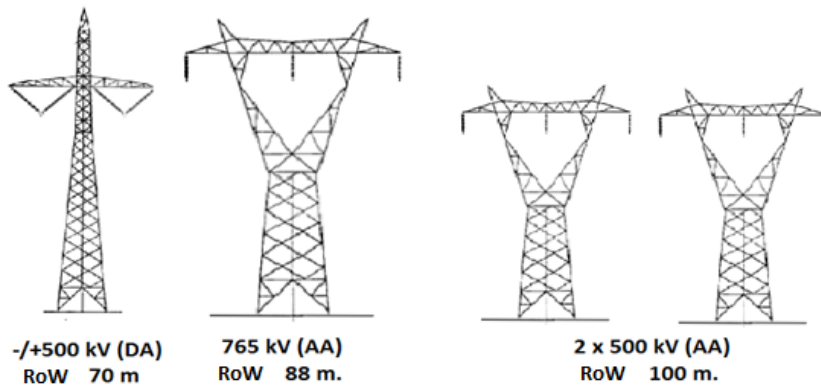
Son 50 yılda HVDC ile enerji iletimindeki etkileyici büyümeyi anlamak için, HVDC teknolojisini geleneksel AC enerji iletimi ile karşılaştırmak gerekmektedir.

2.2 AC Enerji İletimi ile DC Enerji İletiminin Karşılaştırılması

AC veya DC ile enerji iletiminin seçilmesinde; enerji iletimi maliyetleri, teknik imkanlar ve güvenilirlik/kullanılabilirlik değerlendirilmesine göre planlama yapmak gerekmektedir. Planlama sonucunda, genellikle iki alternatiften ekonomik olanı tercih edilir [4].

2.2.1 Enerji İletimi Maliyetlerinin Değerlendirilmesi

Bir enerji iletim hattının maliyeti, esas altyapı (iletim hattı koridoru (RoW), direkler, iletkenler, izolatörler ve istasyon ekipmanı) için gerekli olan anapara yatırımı ve işletim sırasında oluşan maliyetleri (kayıplar) içerir. Hem AC sistemde hem de DC sistemdeki iletim hattı için, gerilimin tepe değeri aynı olan benzer yalıtım seviyesi ihtiyacını varsayarsak; iki iletkenli DC hat (toprağa göre pozitif ve negatif polariteli) ile aynı büyüklükteki üç iletkenli bir AC hat aynı gücü taşıyabilir. Böylece belli bir güç seviyesinde, bir DC hat daha küçük hat koriduna, basit ve ucuz direklere, düşük maliyetli iletkenlere ve izolatörlere sahip olacaktır. Bir örnek oluşturması için Şekil 2.1’ de; 2000 MW’ lık bir güç için AC ve DC sistemlerin karşılaştırılması verilmiştir [4].



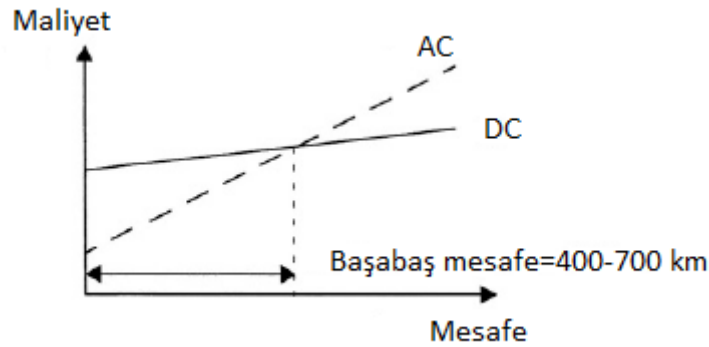
Şekil 2.1 AC-DC enerji iletimi sistemleri için RoW karşılaştırması [4]

DC seçenekte iki iletken (üç iletkenli AC sistem ile aynı akım taşıma kapasiteli) kullanıldığından, enerji iletim kayıpları da AC sisteme göre yaklaşık üçte iki oranında azaltılmış olur. HVDC ile enerji iletiminde deri etkisinin olmayışı, iletim kayıplarını bir parça düşürmede faydalıdır. Güç kablolarındaki dielektrik kayıplar da DC ile enerji iletiminde oldukça azdır [4].

Korona etkisi, DC’ de AC iletkenlerdekinden daha az etkindir. Hat maliyetlerini etkileyen diğer faktörler; kompanzasyon ve şalt tesisi ekipmanlarının maliyetleridir. DC hatlar reaktif güç

kompanzasyonu gerektirmez ama dönüştürücü merkezlerin maliyeti, dönüştürücülerden ve harmonik filtrelerden dolayı artmıştır [4].

Şekil 2.2' de; AC ve DC ile enerji iletimi için mesafeye göre maliyetin değişimi gösterilmiştir. AC sistem, DC sisteme göre başabaş mesafeden daha düşük uzaklıklarda daha ekonomik olmaktadır. Ancak iletim mesafesi arttıkça, DC sistem daha ekonomik hale gelmektedir. Havai iletim hatlarında, hattın per-unit maliyetlerine göre başabaş mesafe 400 ile 700 km arasında değişebilir. Kablolı hatlarda ise başabaş mesafe 25 ile 50 km arasında değişir [4].



Şekil 2.2 AC ve DC hatların mesafeye bağlı maliyet karşılaştırması [4]

2.2.2 Teknik İmkanların Değerlendirilmesi

Hızlı kontrol edilebilir olduğundan DC ile enerji iletiminin, iletilen güç üzerinde tam kontrolü vardır. Bu kontrol imkanı, DC hattın bağlandığı AC sistemlerin transiyent ve dinamik kararlılığını artırmasını ve DC hattaki hata akımlarını sınırlamasını sağlar. Dahası, DC ile enerji iletimi, AC ile enerji iletiminde oluşan ve aşağıda sıralanan bazı problemleri giderir [4]:

- **Kararlılık Limitleri**

Bir AC hattaki güç transferi, hat sonu ve hat başındaki gerilim fazörleri arasındaki açı farkına bağlıdır. Belli bir güç transfer seviyesi için, bu açı farkı mesafe arttıkça artar. Maksimum güç iletimi, sürekli ve transiyent hallerin kararlılığı göz önünde bulundurularak sınırlanır. Bir AC iletim hattının güç taşıma kapasitesi hattın uzunluğuyla ters orantılıdır. DC hatların güç taşıma kapasiteleri hattın uzunluğundan etkilenmez [4].

- **Gerilim Kontrolü**

AC hatlarda gerilim kontrolü, hattaki şarjlılık ve gerilim düşümü nedeniyle karmaşıktır. Bir AC hattaki gerilim profili, hattın Darbe Empedans Yüklenmesine (SIL) karşılık gelen sabit bir güç transfer seviyesi için düzdür. Gerilim profili hattın yüklenmesi ile değişir. Hat sonundaki sabit gerilim için, hattın orta noktasındaki gerilim SIL değerinden yüksek olan yüklenmeler için düşürülür ve SIL değerinden düşük olan yüklenmeler için ise yükseltilir [4].

Hat başındaki ve sonundaki sabit gerilimin sağlanması, hattın yüklenmesi artıkça reaktif güç kontrolü gerektirir. Aynı zamanda hattın uzunluğu artıkça reaktif güç ihtiyacıda artar. İletilen güce göre DC dönüştürücü istasyonları reaktif güce ihtiyaç duysa da DC hattın kendisi herhangi bir reaktif güce ihtiyaç duymaz [4].

- **Hat Kompanzasyonu**

Uzun AC iletim hatlarında, hattaki şarjlılık ve kararlılık sorunlarını gidermek için hat kompanzasyonu gereklidir. Güç transferinde ve gerilim kontrolündeki artış; şönt reaktörün, seri kapasitörün, Statik VAr Kompanzatörün (SVC) ve Statik Kompanzatörün (STATCOM) kullanımıyla mümkündür. DC hatlarda ise, bu tip kompanzasyonlara ihtiyaç yoktur [4].

- **AC Bağlantıların Problemleri**

İki güç sisteminin bir AC hat üzerinden bağlantısı, iki sistemde de otomatik üretim kontrolörlerine ihtiyaç duyar. Bu sayede bağlantı hattının güç ve frekans sinyallerine göre iki sistemde koordineli bir şekilde kontrol edilir. Enterkonnekte sistemlerin koordineli kontrolünde bile, aşağıdaki sebeplerden dolayı AC bağlantı hatlarının işletilmesi problemli olabilir [4]:

1. Düzenli olarak kesici açmalarına sebep olabilen büyük güç dalgalanmalarının varlığı,
2. Hata seviyesindeki artış,
3. Bir sistemden diğerine doğru enerji iletimindeki bozulmalar.

DC hatlarda yük akışının hızlı kontrol edilebilmesi yukarıdaki problemleri giderir. Dahası, iki güç sisteminin asenkron bağlantısı sadece DC hatlar kullanılarak gerçekleştirilebilir [4].

- **Toprak Empedansı**

AC ile enerji iletiminde toprak akımının (sıfır bileşen) varlığına, toprak empedansının yüksek değerinden dolayı kararlı halde izin verilmez. Yüksek toprak empedansı sadece güç transferinin verimini etkilemekle kalmayıp, aynı zamanda radyo parazitlerine sebep olur [4].

Toprak empedansı DC akımlar için ihmal edilebilir. Bir DC hat, toprak dönüşü ile bir iletken kullanarak (monopolar işletme) işletilebilir. Toprak dönüşü sadece toprak altında metalik yapılar (borular gibi) varken ve bu borular DC akım akışı ile korozyona uğrayabilecekken kullanılamaz. Bilinmelidir ki monopolar düzende işletilirken bile, DC dönüştürücü istasyonunu besleyen AC şebeke dengeli akım ve gerilimler ile çalışır. Böylece DC ile enerji iletim sisteminin tek kutuplu olarak uzun süreli çalışması mümkündür. AC ile enerji iletiminde, tek fazlı işletim (veya herhangi bir dengesiz işletim) bir saniyeden fazla sürelerde uygulanabilir değildir [4].

- **DC ile Enerji İletimindeki Problemler**

DC ile enerji iletimi uygulamaları aşağıdaki sebeplerden dolayı sınırlıdır:

1. Dönüştürme ekipmanının yüksek maliyetleri,
2. Gerilim seviyesini değiştirmek için transformatörlerin kullanılamaması,
3. Harmoniklerin üretimi,
4. Reaktif güç ihtiyacı,
5. Karmaşık kontrol yapısı.

Yıllar boyunca, DC teknolojisinde belirgin gelişmeler olmuştur. Bu gelişmelerle yukarıdaki dezavantajlar büyük ölçüde azaltılmıştır. DC teknolojisindeki bu gelişmeler şöyle sıralanabilir:

1. Yarı iletken anahtarı (anahtarı) oluşturan, bir tristör hücresinin anma değerlerinin artması,
2. Tristörlü anahtarların modüler olarak üretimi,
3. 12-darbeli (ve daha yüksek) tristörlü anahtarların kullanımı,

4. Zorlamalı-komütasyonun ve dönüştürücülerin kontrolünde dijital, elektronik ve fiber optik elemanlarının kullanılması.

Yukarıdaki bazı gelişmeler, DC sistemlerde güvenilirliğin artmasına ve dönüştürme işlemi maliyetlerinin azalmasına sebep olmuştur [4].

2.2.3 Güvenilirlik ve Kullanılabilirlik Maliyetlerinin Değerlendirilmesi

HVDC bağlantıların güvenilirlik üzerine istatistikleri CIGRE ve IEEE Çalışma Grubu tarafından sağlanır. DC bağlantıların güvenliliği oldukça iyidir ve AC sistemlerle karşılaştırılabilir. DC bağlantıların kullanılabilirliği ise %90' ın üzerindedir [4].

2.2.4 DC ile Enerji İletiminin Uygulamaları

Özel yapılarından ve maliyetlerinden dolayı, DC ile enerji iletiminin çoğu uygulaması genel olarak aşağıdaki dört kategoridedir:

- **Yer altı veya deniz altı kabloları**

Yaklaşık 40-50 km' lik başabaş mesafeyi geçen uzun kablo bağlantılarının kullanılması durumunda, DC kablo ile enerji iletim sistemi AC kablo bağlantılı sisteme göre avantajlıdır. Bu çeşit uygulamanın örnekleri; Gotland (1954) ve Sardinya (1967) hatlarıdır.

Gerilim Kaynaklı Dönüştürücülerdeki (VSC) son gelişmeler ve dayanıklı polimer DC kabloların kullanımı (HVDC-Light (ABB)) giderek yaygınlaşmaktadır. Bu tip bir uygulamanın örneği, Avustralya' daki 180 MW' lık Directlink (2000) bağlantısıdır [4].

- **Büyük güçlerin uzun mesafede iletimi**

Büyük güçlerin uzun mesafede iletimi ideal olarak DC ile enerji iletimine uygun bir alandır. Bu iletim tipi, başabaş mesafe nerede geçiliyorsa, o mesafeden uzun olan uygulamalar için AC ile enerji iletimine göre daha ekonomiktir. Bu tip enerji iletimine örnek olarak, Pasifik Bağlantı Hattı' ndan başlayıp son zamanlarda Çin' de ve Hindistan' da yapılmakta olan projeler verilebilir.

Güç elektroniği anahtarlama elemanlarındaki son gelişmeler sayesinde ve yeni sıkıştırılmış dönüştürücü istasyonların kullanılmasıyla azalan maliyetler başabaş mesafeyi etkin bir şekilde düşürmüştür [4].

- **AC sistemlerin asenkron bağlanması**

İki AC sistemin asenkron bağlanmasında, DC seçenек ön plana çıkmaktadır. Sırt-sırtı bağlantı şekli için birçok örnek mevcuttur. Sırt-sırtı bağlantılardaki büyüme en iyi Kuzey Amerika örneğinde görülür. Burada dört tane birbirinden bağımsız ana güç sistemi, 12 tane sırt-sırtı bağlantı ile birbirlerine bağlanmıştır.

Kontrol tekniklerindeki son gelişmelerle, bu bağlantılar giderek zayıf şebekelerde yapılmaktadır. Gelecekte, sırt-sırtı bağlantılar dört bölgeyi işletme imkanı veren VSC'ler ile yapılacağı tahmin edilmektedir. Böylece aktif/reaktif gücün tam kontrolü küçük çaplı harmoniklerin üretimi ile gerçekleşecektir [4].

- **Entegre edilmiş güç sistemlerinde yük akışlarının kararlı hale getirilmesi**

Büyük enterkonnekte sistemlerde, AC bağlantı hatlarındaki yük akışı (özellikle bozucu etken koşullarında) kontrol edilemeyebilir ve aşırı yüklenmelere yol açabilir. Böylece kararlılık problemleri sistem güvenliğini tehlikeye sokabilir. Stratejik olarak yerleştirilen DC hatlar; DC gücü hızla kontrol edebilmeleri, çok ihtiyaç duyulan sönümlenmeyi sağlamaları ve zamana bağlı aşırı yüklenme kapasiteleri sayesinde bu problemi aşabilir. DC ile enerji iletiminin bu tür uygulamalardaki planlaması, faydaları değerlendirmek için detaylı çalışma gerektirir. Bu sistemlerin örnekleri ise Amerika'daki IPP bağlantı hattı ve Hindistan'daki Chandrapur-Padghe bağlantı hattıdır [4].

Günümüzde şebekedeki DC hat sayısı, AC hatların sayısına kıyasla oldukça azdır. Bu durum göstermektedir ki HVDC ile enerji iletimi sadece özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Öte yandan teknolojiadaki gelişmeler ve çok-terminalli DC (MTDC) sistemlerin tanıtımıyla, DC ile enerji iletiminin uygulama alanları genişleyecektir. Ancak gelecekte AC şebekinin yerini DC şebekenin alacağı beklenmemektedir. Bu durumun iki büyük nedeni vardır:

- İlk olarak, MTDC sistemlerinin kontrolü ve korunması karmaşık ve ekonomik fedakarlıklar yapılmadıkça DC şebekelerdeki gerilim dönüşümünün (DC/DC dönüştürücüler) yapılamamasıdır.
- İkinci olarak, güç elektroniğindeki teknolojik gelişmeler, AC ile enerji iletiminde FACTS cihazlarının (statik VAR sistemleri, statik faz kaydırıcıları, gibi) kullanılmasıyla performans artımına sebep olmuştur [4].

2.3 HVDC Sistemlerinin Çeşitleri

HVDC uygulamalarında beş çeşit DC bağlantı göz önüne alınmaktadır.

2.3.1 Monopolar Bağlantı

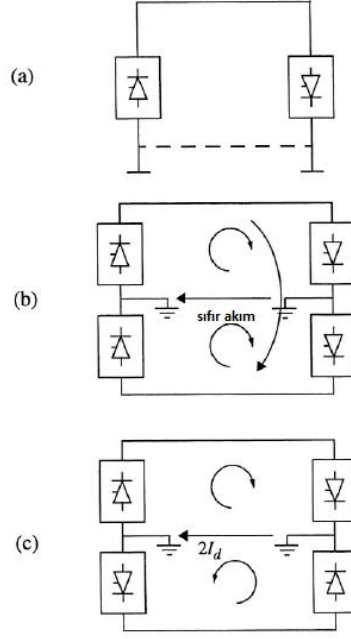
Bir monopolar bağlantının (Şekil 2.3 (a)), toprak ya da deniz dönüşünü kullanan bir iletkeni vardır. Ayrıca harmonik girişimin veya korozyon etkisinin varlığına dair bir endişe olduğunda, metalik dönüşte kullanılabilir. DC kablo uygulamalarında (HVDC Light, ABB), bir kablo dönüşü kullanılır. Bir DC hattaki korona etkisi, negatif polariteli iletkende pozitif polariteli iletkenle kıyasla oldukça az olduğundan, monopolar bağlantı genellikle negatif polaritede işletilir [4].

2.3.2 Bipolar Bağlantı

Bir bipolar (çift kutuplu) bağlantının (Şekil 2.3 (b)), biri pozitif ve diğeri negatif olmak üzere iki iletkeni vardır. Her bir terminalde (dönüştürücü merkezde) eşit anma gücünde ve DC tarafta birbirine seri bağlı iki tane dönüştürücü seti vardır. İki dönüştürücü seti arasındaki jonksiyon bir ya da her iki uçta da kısa bir elektrod hattı kullanılarak topraklanır. Normal işletme koşullarında her iki kutupta eşit akımlarla işletildiğinden, bu koşullarda topraktan sıfır akım akar. Bir çift kutuplu bağlantının ilk kurulumu sırasında monopolar işletme de kullanılabilir. Ayrıca dönüştürücülerdeki hata esnasında, uygun anahtarlama teknikleriyle bir tane DC hat geçici olarak metalik dönüş olarak kullanırken diğeri de tüm gücü iletir [4].

2.3.3 Homopolar Bağlantı

Bu çeşit bağlantının (Şekil 2.3 (c)), aynı polariteli (genellikle negatif) iki tane iletkeni vardır. Toprak veya metalik dönüş ile işletilebilir. DC bağlantının toprak dönüşü ile işletilmesi istenmediğinde genellikle homopolar bağlantılar kullanılır. Bir homopolar bağlantı izolatör maliyetlerini düşürmede avantaj sağlarken, toprak dönüşünün kullanılmaması bu avantajını gölgede bırakır [4].



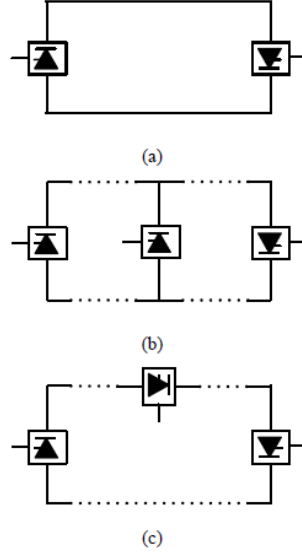
Şekil 2.3 HVDC bağlantı çeşitleri; (a) monopolar bağlantı, (b) çift kutuplu bağlantı ve (c) homopolar bağlantı [4]

2.3.4 Sırt-Sırta Bağlantı

Bu bağlantı şekli, iki komşu asenkron AC sistemin birbirine bağlanmasında yaygın olarak kullanılır. İki dönüştürücü istasyonunda aynı alana kurulur ve iletim hattına veya kabloya gerek yoktur. Sırt-sırta bağlı sistemin blok diyagramı Şekil 2.4 (a)' da gösterilmiştir. Enterkonnekte edilen iki AC sistemin, aynı veya farklı nominal frekans değerleri olabilir (50 Hz ve 60 Hz gibi). Bu tür sistemlerin örnekleri Japonya' da ve Güney Amerika' da görülebilir [13].

2.3.5 Çok Terminalli Bağlantı

Çok terminalli bağlantıda, coğrafi olarak birbirinden ayrı üç veya daha fazla HVDC dönüştürücü istasyonu birbirlerine iletim hatlarıyla veya kablolarla enterkonnekte edilir. Sistem paralel veya seri bağlı olabilir. Paralel bağlantıda bütün dönüştürücü istasyonları Şekil 2.4 (b)' de gösterildiği gibi aynı gerilim seviyesine bağlanır. Seri bağlantıda ise bir veya daha çok dönüştürücü istasyonu, tek veya her iki kutup üzerinden Şekil 2.4 (c)' de gösterildiği gibi birbirlerine seri bağlanır. Bu sistemin uygulamaları ise Sardinya-Korsika-İtalya (SACOI) bağlantısı, Amerika' daki Pasifik Bağlantı Hattı bağlantısı ve Kanada' yı Amerika' ya bağlayan Hydro Quebec-New England bağlantısıdır [13].



Şekil 2.4 Sırt-sırta (a), paralel çok-terminalli (b) ve seri çok-terminalli (c) bağlantı şekilleri [13]

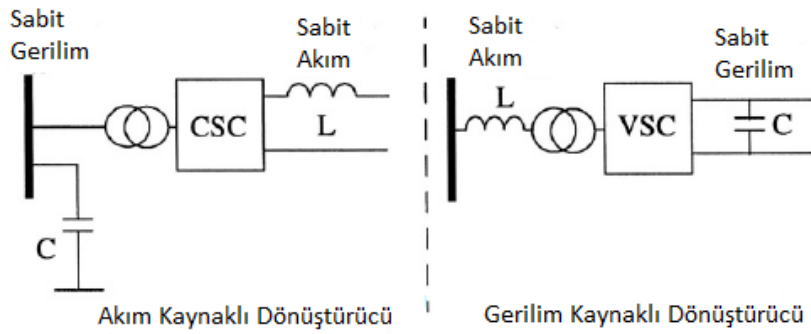
2.4 Özet

Bu bölümde, HVDC sistemi genel olarak tanıtılmış ve farklı HVDC bağlantı çeşitleri açıklanmıştır. HVDC ile enerji iletiminin, HVAC ile enerji iletimine olan üstünlüklerinden bahsedilip, sistemin ilk çıktığı yıllardan günümüze kadar kurulan bazı uygulamaları listelenmiştir. HVAC ve HVDC sistemleri arasındaki teknik farklılıklar kısaca ortaya konmuş ve temel maliyet faktörleri üzerinde durulmuştur.

HVDC SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇEŞİTLERİ**3.1 Giriş**

Bir HVDC sistemi, elektrik enerjisini AC' den DC' ye (veya tam tersi) dönüştürebilme kabiliyeti nedeniyle elektronik bir dönüştürücüye ihtiyaç duyar. Bu dönüştürme işlemi için üç fazlı dönüştürücülerde temel olarak iki düzen vardır (Şekil 3.1):

- Akım Kaynaklı Dönüştürücü (CSC),
- Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (VSC).



Şekil 3.1 CSC ve VSC tipindeki dönüştürücüler [4]

1950-1990 arasındaki süreçte, HVDC sistemleri CSC düzenini kullanmıştır. Geleneksel CSC, 1950' lerin başından 1970' lerin ortasına kadar civa-buharlı anahtarları barındırmıştır. Sonraki yıllarda tristörlü anahtarlar kullanılmıştır [4].

1990' dan itibaren, CSC teknolojisine bir alternatif olan VSC teknolojisi ekonomik olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Çünkü kendinden komütasyonlu yüksek güçlü anahtarların (GTO,

IGBT gibi) ve uygun tetikleme düzenlerini üretebilen DSP (Dijital Sinyal İşleyici)' lerin ortaya çıkışı bu tarihe denk gelmektedir [4].

Modern HVDC ile enerji iletimi sistemlerinde ya geleneksel Akım Kaynaklı Dönüştürücüler (CSC) ya da Gerilim Kaynaklı Dönüştürücüler (VSC) kullanılır. Belli bir proje için hangi seçeneğin tercih edileceği ekonomik ve diğer bir takım faktörlere bağlıdır. Bu iki dönüştürücü tipinin karakteristiklerinin karşılaştırılması Çizelge 3.1' de verilmiştir [4].

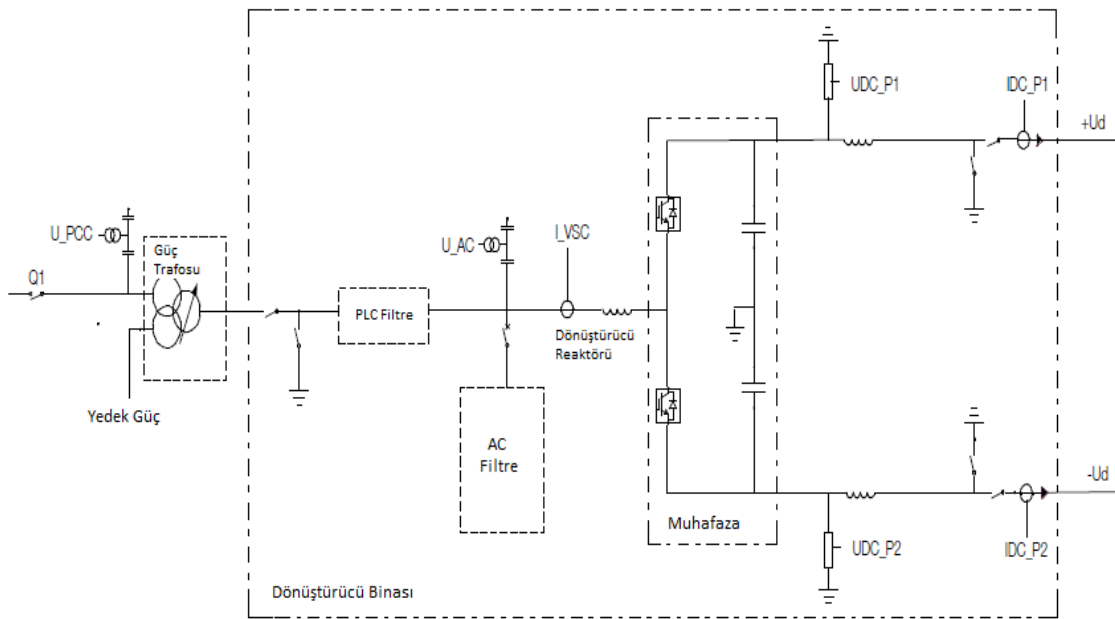
Çizelge 3.1 Dönüştürücü çeşitlerinin karşılaştırması [4]

	Dönüştürücü çeşiti	
	CSC	VSC
AC tarafta	Sabit gerilim kaynağı olarak davranır Enerji depolama cihazı olarak kapasitöre ihtiyaç duyar Harmonikleri gidermek için büyük AC filtreler ihtiyacı duyar Güç faktörünün düzeltilmesi için reaktif güç kaynağına ihtiyaç duyar	Sabit akım kaynağı olarak davranır Enerji depolama cihazı olarak endüktansa ihtiyaç duyar Yüksek harmonik mertebelerini gidermek için sadece küçük bir AC filtreye ihtiyaç duyar Dört bölgeli çalışma nedeniyle reaktif güç kaynağına ihtiyaç duymaz
DC tarafta	Sabit bir akım kaynağı gibi davranır Enerji depolama cihazı olarak endüktansa ihtiyaç duyar DC filtreler ihtiyacı duyar Kendine özgü hata akımını sınırlama özelliği vardır	Sabit gerilim kaynağı olarak davranır Enerji depolama cihazı olarak kapasitöre ihtiyaç duyar Ek maliyete sebep olmaksızın enerji depolama kapasitörü DC filtreleme yapılabilir Şarj olmuş kapasitörün akımında hata akımına katılacağı için DC hat tarafındaki arızalar problem oluşturur
Anahtarlar	Seri bir kapasitörle hat (doğal) veya zorlamalı komütasyonlu Hat frekansında anahtarlama gerçekleşir Düşük anahtarlama kayıpları vardır	Zorlamalı komütasyonlu Yüksek frekanslarda anahtarlama gerçekleşir Daha yüksek anahtarlama kayıpları vardır
Anma değer aralığı	Çift kutuplu bağlantıda 7200 MW' a kadar güç iletimi 800 kV' a kadar gerilim seviyesi	1200 MW' a kadar güç iletimi 500 kV' a kadar gerilim seviyesi

3.2 Gerilim Kaynaklı Dönüştürücüleri (VSC) Kullanan Enerji İletimi Sistemi

Elektriksel yüklerin sürekli artmasıyla ve yeni iletim hatları için hat koridoru elde etmekteki zorluklardan, mevcut iletim sistemi sınırlarına doğru zorlanmaktadır. Bu durum güç kalitesini azaltacak ve şebeke kararlılığını olumsuz etkileyecektir. Dolayısıyla, iletim sistemini mevcut hat koridorundaki güç yoğunluğunu artıracak şekilde uyarlamak gerekmektedir. VSC-HVDC ile enerji iletimi bu istenmeyen problemleri çözmede yardımcı olacaktır [13].

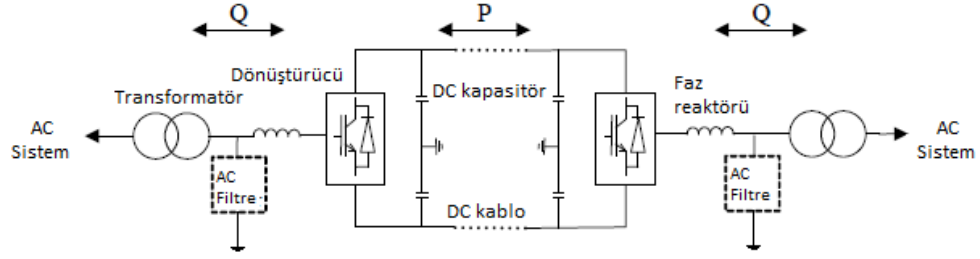
VSC-HVDC yeni bir DC ile enerji iletimi teknolojisidir. Yarı iletken anahtar olarak, IGBT' ler kullanılır ve PWM (Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)) kontrol tekniği ihtiyaç duyulan gerilimin dalga şeklini üretir. PWM ile herhangi bir dalga şeklini, faz açısını ve temel frekanslı bileşenin büyüklüğünü üretmek mümkündür. Bu yüksek kontrol edebilme yeteneği, geniş uygulama alanlarında kullanılmasına izin verir. Bir VSC-HVDC dönüştürücü merkezinin tek hat şeması Şekil 3.2' de verilmiştir [13].



Şekil 3.2 VSC-HVDC dönüştürücü merkezinin tek hat şeması [23]

3.2.1 VSC-HVDC Bileşenleri

Bir VSC-HVDC sistemi Şekil 3.3' te gösterilmiştir ve yapısında AC filtreler, transformatörler, dönüştürücüler, faz reaktörleri, DC kapasitörler ve DC kablolar vardır [13].



Şekil 3.3 VSC-HVDC Sistemi [13]

- **Dönüştürücüler**

VSC dönüştürücüleri yapısında, IGBT yarı iletkenlerini barındırır. Bir dönüştürücü doğrultucu olarak çalışırken diğeri inverter olarak çalışır. İki dönüştürücü uygulamaya göre birbirlerine ya sırt-sırta ya da bir DC kablo (DC havai hat) üzerinden bağlıdır [13].

- **Transformatörler**

Dönüştürücüler AC sisteme transformatörler aracılığıyla bağlanırlar. Transformatörlerin en önemli fonksiyonu AC sistem gerilimini, dönüştürücü için uygun olan gerilim seviyesine getirmektir [13]. Transformatör sekonder gerilimi (filtre bara gerilimi), üretim ve tüketim esnasında dönüştürücünden maksimum aktif ve reaktif gücü almak adına kademe değıştirici ile kontrol edilir [14].

- **Faz Reaktörleri**

Faz reaktörleri, üzerlerinden akan akımı düzenleyerek aktif ve reaktif güç akışını kontrol etmek için kullanılırlar [13].

- **AC Filtreler**

AC çıkış gerilimi, IGBT' lerin anahtarlanması sırasında oluşan harmonikli bileşenler içerir. AC sisteme akan harmoniklerin sınırlandırılması gerekir. Çünkü harmoniklerin, AC sistem ekipmanının hatalı çalışmasına, radyo ve telekomünikasyon bozulmalarına sebep olması önlenmelidir. AC filtreler, bu yüksek frekanslı harmonikleri azaltır [13].

- **DC Kapasitörler**

DC tarafta, aynı boyutta iki tane kapasitör yığını vardır. Bu kapasitörlerin boyutu, ihtiyaç duyulan DC gerilime göre değışir. DC kapasitörlerin görevi, bir enerji tamponu oluşturmaktır. Böylece transiyent olaylar sırasındaki güç dengesi korunacak ve DC taraftaki gerilim dalgalanmaları azalacaktır [13].

- **DC Filtreler**

VSC-HVDC dönüştürücülerinde DC taraftaki filtreleme, dönüştürücü DC kapasitörü ve DC taraftaki hat düzeltme reaktörü kullanılarak yapılır. Bu sayede harmonikler filtrelenir [14].

- **Yüksek Frekanslı Filtreler**

Gerilim kaynaklı dönüştürücülerde, yarı iletken anahtarların tetiklenmesinde ihtiyaç duyulan hızlı gerilim artış oranı yüksek frekanslı (HF) gürültü oluşturur. Bu gürültü klasik HVDC dönüştürücülerinde oluşandan daha yüksektir. Yüksek frekanslı gürültünün, dönüştürücüden şebekeye yayılmasını engellemek için anahtar tasarımına, muhafazanın ekranlamasına ve uygun yüksek frekanslı topraklama bağlantılarının yapılmasına özel hassasiyet gösterilir [14].

- **DC Kablolar**

VSC-HVDC uygulamalarında kullanılan DC kablolar yeni geliştirilmiştir. Bu kablolarda yalıtkanlar, özellikle DC gerilime dirençli haddeden çekilmiş polimerden yapılmıştır [13].

VSC-HVDC' nin çalışmasını, her bir terminali seri reaktörler üzerinden AC iletim şebekesine bağlı bir gerilim kaynağı gibi düşünerek açıklayabiliriz. Bu sistemde, kararlı halde AC taraftaki aktif güç DC tarafa iletilen aktif güce eşittir (kayıplar ihmal edilmiştir). Bu durum, eğer iki dönüştürücüden biri iletilen aktif gücü kontrol ederken, diğer dönüştürücü de DC gerilimi kontrol ederse gerçekleşir. Reaktif güç üretimi ve tüketimi, şebeke AC gerilimini kontrol etmek için kullanılabilir [13].

3.2.2 VSC-HVDC' nin Avantajları ve Uygulamaları

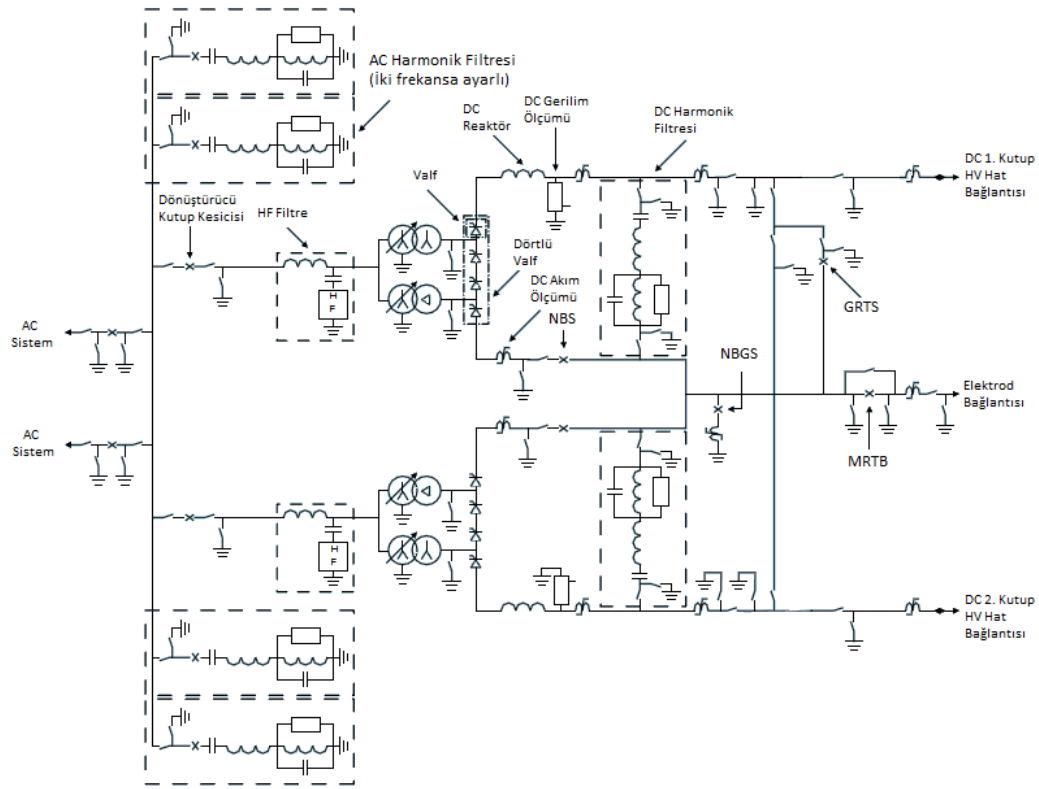
Klasik HVDC ile VSC-HVDC arasındaki ana işletim farkı, kontrol edilebilmelerinde yatar. Bu durum, bazı avantajlara ve uygulama alanlarına yol açar. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

- PWM kontrol yönteminin kullanılması sayesinde ek kompanzasyon ekipmanına ihtiyaç duymadan, aktif ve reaktif güç birbirinden bağımsız kontrol edilebilir.

- Güç kalitesi bozulmalarını azaltır. VSC-HVDC' nin reaktif gücü kontrol etme yeteneği, AC şebeke geriliminin regülasyonunda kullanılabilir. Böylece güç kalitesi artırılır.
- Komütasyon hatalarının oluşma riski daha azdır. VSC-HVDC kendinden komütasyonlu yarı iletken cihazlar kullandığı için, yeterli derecede yüksek bir AC gerilimin sağlanmasına gerek yoktur.
- İletişime ihtiyaç yoktur. Doğrultucu ve inverter tarafındaki kontrol sistemleri birbirinden bağımsız işletildiği için, telekomünikasyon bağlantısına ihtiyaç duymazlar. Böylece kontrolörün hızı ve güvenilirliği artar.
- Pasif AC şebekelerin ve adaların beslenmesinde kullanılabilir.
- VSC-HVDC sistemiyle çok-terminalli DC şebeke oluşturulabilir. Çünkü VSC-HVDC dönüştürücüleri arasında çok az bir koordinasyonu sağlamak yeterlidir. Çok-terminalli DC şebekelerin bir potansiyel uygulaması, şehir merkezlerinin enerji ihtiyacını karşılamaktır [13].

3.3 Akım Kaynaklı Dönüştürücüleri (CSC) Kullanan Enerji İletimi Sistemi

Geleneksel HVDC ile enerji iletimi sistemleri hat komütasyonlu tristör teknolojisini kullanır. Tristörün anodu ve katodu arasında bir pozitif ileri gerilim varken, tristörün kapısına bir sinyal uygulanırsa tristör akımı iletecektir. Akım ileri yönde aktığı sürece, daha fazla kapı sinyaline ihtiyaç olmadan iletim devam edecektir. Tristörün kapanması sadece akım akış yönü tersine dönerse gerçekleşir. Dolayısıyla bir tristör dönüştürücüsü, inverter modunda çalışmak için değişken bir AC gerilime ihtiyaç duyar. Bu yüzden HVDC' de kullanılan tristör tabanlı dönüştürücü topolojisine hat komütasyonlu dönüştürücü denir [9].



Şekil 3.4 Çift kutuplu HVDC sisteminde bir dönüştürücü merkezin tek hat şeması [9]

3.3.1 Dönüştürücü Merkezin Temel Elemanları

Şekil 3.4' te, çift kutuplu havai iletim hattı ile çalışan HVDC dönüştürücü merkezinin tek hat şeması gösterilmiştir. Dönüştürücü merkez elemanları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

3.3.1.1 Dönüştürücü Merkezin AC Tarafı

AC sistem, HVDC dönüştürücü merkezine “dönüştürücü barası” üzerinden bağlanır. AC bağlantılar, AC harmonik filtreleri ve diğer muhtemel yüklerle (yedek güç transformatörü, ek reaktif güç ekipmanı gibi) birlikte HVDC bağlantıları birkaç farklı yöntemle düzenlenebilir. Tabi bu düzenleme; güvenilirlik ihtiyacı, koruma ve ölçme ihtiyaçları, ayrı ayrı anahtarlanabilen dönüştürücü sayısı ve AC indirici merkez tasarımı hakkındaki bölgesel deneyim kıstaslarına göre gerçekleştirilir [9].

3.3.1.2 AC Harmonik Filtreleri

Dönüştürücünün işletilmesi sırasında, hem AC akım harmonikleri üretilir hem de reaktif güç tüketilir. AC akım harmoniklerinin ve reaktif güç tüketiminin etkilerini sınırlamak için,

dönüştürücü merkezlere şönt bağlı, anahtarlanabilir AC harmonik filtreleri eklenir. Filtrelerin yapısında yüksek gerilim seviyesinde kapasitör bankları, bunlara seri bağlı orta gerilim seviyesindeki bir başka devre olan hava-çekirdekli hava-yalıtımlı reaktörler, dirençler ve kapasitör bankları bulunur [9].

3.3.1.3 Yüksek Frekanslı Filtreler

Dönüştürücü merkezlerin işletimi, dönüştürücü barasından AC sisteme doğru yayılan, yüksek frekanslı girişimlere sebep olur. Genellikle bu girişimlerin büyüklüğü ve frekansı, AC sistemin güvenli işletimi bakımından bir önem arz etmez. Ancak bu yüksek frekanslı girişimlerin istenmediği bazı durumlar vardır. Dolayısıyla dönüştürücü ile dönüştürücü barası arasına Yüksek Frekanslı (HF) filtrenin konulması gerekir. AC harmonik filtrelerinde olduğu gibi HF filtreside yüksek gerilim seviyesine bağlı kapasitör bankası, bir hava-çekirdekli hava-yalıtımlı reaktör ve bu devreye ek olarak alçak gerilim seviyesinde kapasitör, reaktör ve dirençten oluşan bir devreyi içerir [9].

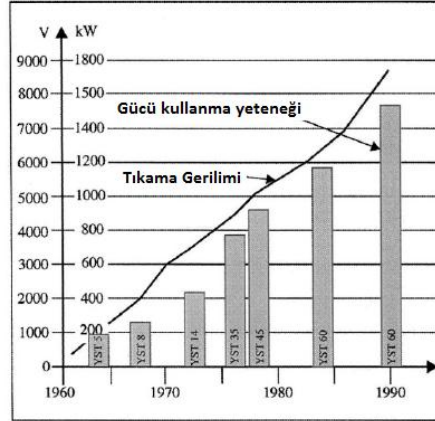
3.3.1.4 Dönüştürücü Transformatörü

Dönüştürücü transformatörü, AC sistem ile tristörlü anahtarların arasında kalan bir ara elemandır. Tipik bir HVDC dönüştürücü transformatörü, DC gerilim yalıtımı zorlanmasına ve aynı zamanda normal bir AC güç transformatöründeki gibi AC gerilim zorlanmasına maruz kalır. Transformatör tasarımında, bu zorlanmaların etkileri dikkate alınmalıdır. Dönüştürücü transformatörünün, dönüştürücüden transformatöre ve filtrelere doğru akan hem temel frekanstaki yük akımını hem de AC harmonik akımlarını dikkate alarak, termal olarak tasarlanmasında son derece önemlidir. Genellikle dönüştürücü transformatörlerinin primerinde yıldız bağlı ve sekonderinde yıldız ve üçgen bağlı iki ayrı sargı bulunur [9].

3.3.1.5 Tristörlü Anahtarlar

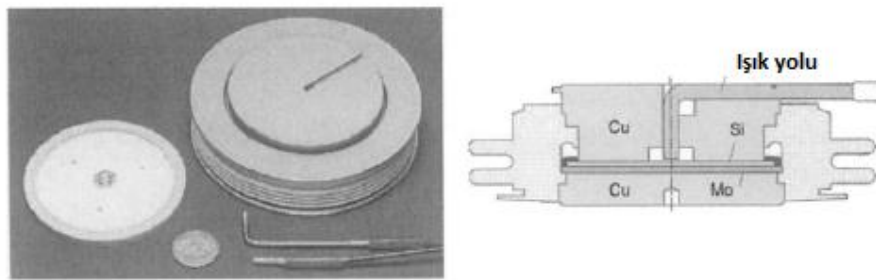
Tristörlü anahtarlar AC/DC veya DC/AC dönüşümünü sağlar. Dönüştürücünün temel bloğu 6-darbeleri köprüdür. Ancak çoğu HVDC dönüştürücüsü 12-darbeleri köprü olarak bağlanır. 12-darbeleri köprü, 12 anahtardan oluşur. Her bir anahtar birbirine seri bağlı birçok tristörden meydana gelir. Bunun nedeni ise DC anma gerilim seviyesine ulaşabilmektir [9].

Tristörlerin anma değerleri, 1970' li yıllarda ilk tristörlü anahtarın ortaya çıkmasından beri neredeyse lineer bir şekilde artmıştır. Günümüzde, tristörlerin anma değerleri gerilimde 8-9 kV' a ve güçte 1500 kW' a kadar ulaşmıştır. Tristörler, silikon devre levhası üzerinde 150 mm çapa kadar ticari olarak üretilebilirler (Şekil 3.5). Bu gelişmeler doğal olarak bir anahtar içerisindeki seri bağlı tristör sayısını ciddi bir biçimde azaltmıştır. Böylece HVDC anahtarlarının tasarımı basitleşmiş ve kayıpları azalmıştır [4].



Şekil 3.5 HVDC tristörlerinin tıkama gerilimindeki ve gücü kullanma yeteneğindeki gelişim [4]

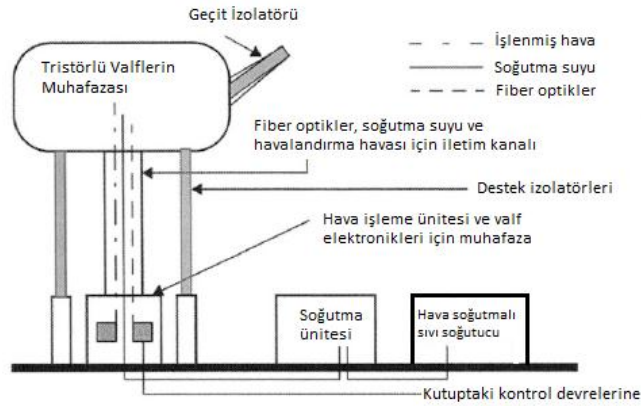
Tristörler ya ışıkla ya da elektriksel olarak tetiklenebilir. Gelecekte Işık-Tetiklemeli Tristörlerin (LTT) daha yüksek verimli olacağı ve maliyet bakımından da daha elverişli olacağı iddia edilmektedir (Şekil 3.6). Bunun nedeni ise tristörleri tetiklemek için kullanılan elektronik tetikleme devrelerinde çok sayıdaki elemanın elenmesidir. Ayrıca bu cihazlara ölçme ve koruma özellikleride eklenmiştir [4].



Şekil 3.6 Silikon devre levhası ve LTT' nin iç yapısı [4]

Anahtarlar artık hava-yalıtımlıdır ve açık havada veya her anahtar bir modül oluşturacak şekilde modüler olarak kurulabilirler. Bu sayede güvenilirlik artar ve geniş anahtar aralıklarının olmamasıyla maliyet düşer. Açık havada kullanılan anahtarlardaki önemli bir başka gelişmede kompozit izolatörlerdir. Bu izolatörler, fiber optik kabolalar için iletişim

kanalı olarak, soğutma suyu ve anahtarlar toprak arasını havalandırmak için kullanılır (Şekil 3.7). Şekil 3.8’ de Konti-Skan I merkezindeki 275 kV DC geriliminde işletilen açık hava anahtarı gösterilmiştir [4].



Şekil 3.7 Açık hava anahtarının temel elemanları [4]



Şekil 3.8 Konti-Skan I merkezindeki açık hava anahtarının işletimi [4]

3.3.1.6 DC Düzeltme Reaktörü

DC düzeltme reaktörleri, sadece enerji iletimi sistemlerinde ihtiyaç duyulur, sırt-sırt bağlantılarda kullanılmalarına gerek yoktur. Bir HVDC ile enerji iletimi sisteminde, DC düzeltme reaktörü birkaç fonksiyonu birden sağlar. Ancak prensip olarak şunlar için kullanılır:

- havai hattın veya kablodan akan DC akımdaki dalgalanmaları azaltmak,
- DC iletim devresinde oluşup dönüştürücünde arızalanmasına sebep olabilecek maksimum potansiyel hata akımını azaltmak,

- temel AC frekansın katları olmayan frekanslardaki DC taraf rezonanslarını düzeltmek,
- tristörlü anahtarları, DC iletim hattında oluşan ani transiyetlere (yıldırım düşmesi) karşı korumak.

DC düzeltme reaktörü, büyük bir hava-çekirdekli hava-yalıtımlı reaktördür. Bu reaktör 500 kV DC anma geriliminde ve altındaki gerilimlerde, HVDC dönüştürücü merkezlerinde yüksek gerilim tarafında (DC iletim hattında) konumlanır. 500 kV' un üstündeki gerilimlerde reaktör, yüksek gerilim ve nötr hatlarına ayrıştırılır [9].

3.3.1.7 DC Filtre

Dönüştürücünün işletilmesi, DC terminallerde gerilim harmoniklerinin oluşmasına sebep olur. Bu durumda DC terminal geriliminde, sinüsoidal AC harmonik bileşenleri oluşur. Gerilimin bu AC harmonik bileşeni, DC tarafta AC harmonik akımlarının akmasına yol açar. Akan AC harmonik akımlarının iletim hattı üzerinde oluşturduğu manyetik alan, yakındaki iletkenler (açık devre telekomünikasyon sistemleri gibi) üzerinde harmonik akımları endükler. Dolayısıyla, bu harmonik akımlarını engellemek için DC harmoniklerinde filtrelenmesi gerekir. DC filtreler, fiziksel olarak AC filtrelerle benzerler. Yüksek gerilim potansiyeline bir kapasitör bankı aracılığıyla bağlanırlar. Reaktörler ve dirençlerin yanında diğer kapasitörlerde bu kapasitör bankına bağlanırlar. Böylece ihtiyaç duyulan frekanslarda filtreleme yapılır [9].

3.3.1.8 Aktif Filtreler

Yukarıda anlatılan pasif filtrelerin yanında aktif filtrelerde kullanılmaktadır. Bir aktif filtre, harmoniklerin etkisini gidermek için hatta aynı büyüklükte fakat zıt fazda harmonik akımı enjekte eden bir cihazdır. Bu cihazlar aşağıdaki sebeplerden dolayı HVDC sistemlerinde öne çıkmıştır:

- Harmonikleri filtreleme konusundaki standartlar,
- Hızlı ve ekonomik güç anahtarlarının mevcut olmasıyla, PWM kontrollü VSC dönüştürücülerinin yüksek güçte ve düşük kayıplarla üretilebilmesi,
- DSP kabiliyetlerinin artmasıyla, karmaşık kontrol algoritmalarının ucuzca uygulanabilmesi.

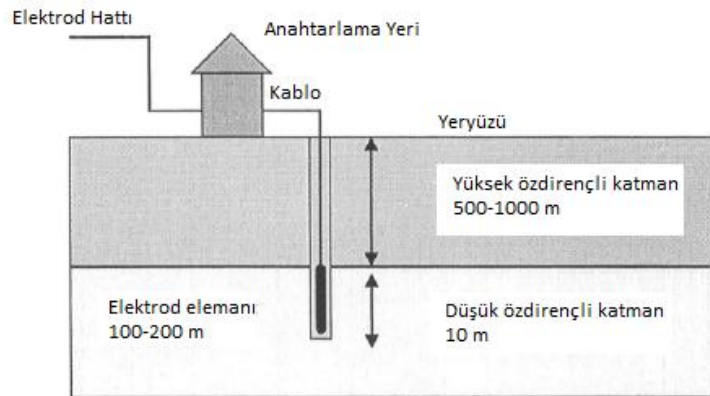
Aktif filtreler, HVDC dönüştürücüsünün AC ya da DC tarafında kullanılabilir. Ancak, dönüştürücünün AC tarafındaki hem harmoniklerin filtrelenmesi hem de reaktif güç ihtiyacının karşılanması gerektiğinden AC tarafta aktif filtre kullanımı tercih edilmez. DC tarafta ise reaktif güç ihtiyacı söz konusu olmadığı için aktif filtreler kullanılmaktadır [4].

3.3.1.9 Dönüştürücü Merkezin DC Tarafı

Dönüştürücünün DC tarafı, güvenli işletme ve yeniden düzenleme koşullarını sağlamak için, ayırıcılar ve toprak anahtarları ile donatılmıştır. Birden fazla HVDC kutbunun ortak bir iletkeni paylaştığı (genellikle nötr hattı) durumda, DC güç akışını kesmeden DC akımı iletim yolları arasında aktarabilmek avantajlıdır [9].

3.3.1.10 Derin Çukurlu Topraklama Elektrodu

Topraklama elektrodu, HVDC sisteminin önemli bir parçasıdır ve dönüştürücü merkezin toplam maliyetinde payı vardır. Genellikle dönüştürücü merkezler iyi bir topraklama noktasının bulunmadığı bölgelere kurulmaktadır. Bu durumda, kara elektrodu geniş bir bölgeye ihtiyaç duyar ve toprak öz direncinin düşük olduğu bir yere kurulması gerekir. Bu şartlar altında, derin çukur topraklama elektrodu (Şekil 3.9), düşük öz dirençli toprak katmanına yerleştirilir. Böylece yüzeyde düşük elektriksel potansiyelli gerilim düşümlerine sebep olur [4].



Şekil 3.9 Derin topraklama elektrodu [4]

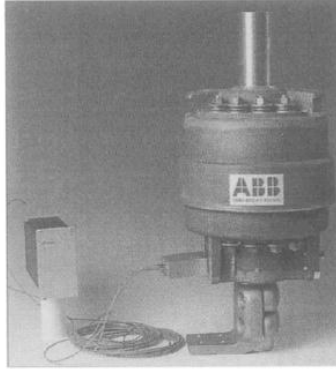
Böyle bir elektrodun avantajları:

- Elektrodun dönüştürücü merkeze yakın olmasını sağlar,
- Daha kısa bir hattın kullanımıyla güç kaybı azalır,

- Girişimin ve yıldırım düşme riskinin azalması,
- Uygun bir elektrod alanının bulunması kolaylaşır,
- DC hattı monopolar modda işletebilme imkanı artar.

3.3.1.11 AC-DC Ölçümler

Optik akım transdüseri, eski karmaşık ölçme ekipmanlarının yerine kullanılmaya başlanmıştır. Bu transdüser, yüksek hassasiyette sahiptir (Şekil 3.10).

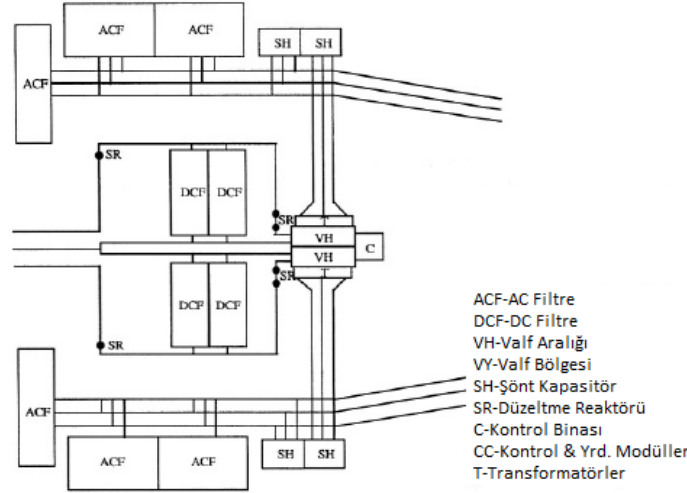


Şekil 3.10 Optik Akım Transdüseri (OCT) [4]

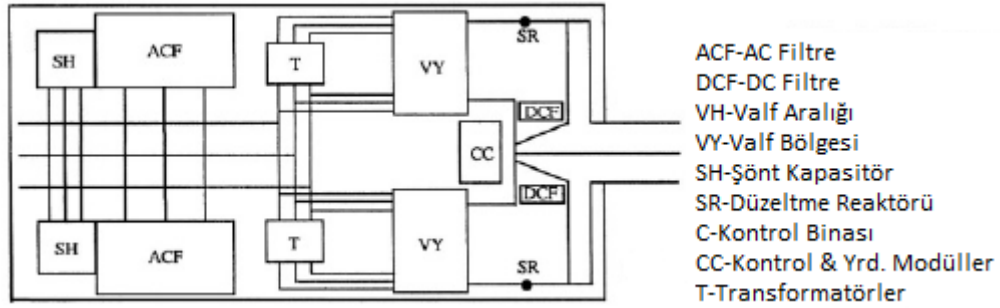
Transdüserin hata payı %0,5' ten daha iyidir ve ölçüm frekansıda DC ile 7 kHz arasındadır. Optik ölçüm yapılması daha güvenilir bir yapı, sıkıştırılmış tasarım ve daha az maliyet sağlar [4].

3.3.2 Sıkıştırılmış Dönüştürücü Merkez Tasarımı

1980' li yıllarda ve günümüzde kurulan tipik bir 2000 MW' lık HVDC dönüştürücü merkezin tasarımı ve inşası sırasıyla, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12' de gösterilmiştir. Geleneksel merkezin 300 m x 300 m' lik bir alanı vardır. Modern merkezin ise %25' lik azalmayla, 100 m x 200 m' lik bir alanı vardır.

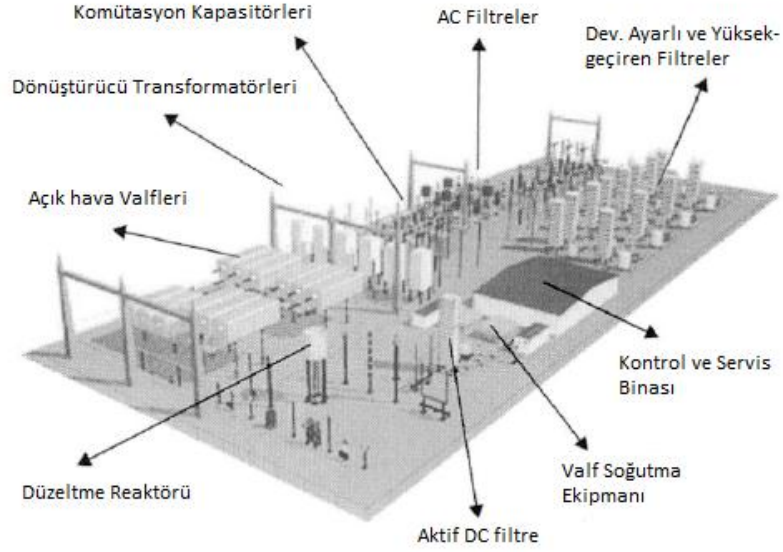


Şekil 3.11 1980' li yıllarda kurulan 2000 MW' lık HVDC dönüştürücü merkezi [4]



Şekil 3.12 Modern 2000 MW' lık HVDC dönüştürücü merkezi [4]

Modern dönüştürücü merkezin elemanları Şekil 3.13' te gösterilmiştir. Gelecekte HVDC merkezi boyutlarının azaltılmasında en önemli faktörler; aktif AC-DC filtreler, açık hava anahtarları, kontrol ve yedek sistemlerin prefabrik modüllerde muhafaza edilmesidir. Hiçbir binaya ihtiyaç olmayacaktır ve bütün kontroller fabrikada test edilecektir. Böylece, inşa ve hizmete alma maliyetleriyle birlikte, inşaat alanındaki işler oldukça azalacaktır [4].



Şekil 3.13 Modern HVDC dönüştürücü merkezinin planı [4]

3.3.3 Çift Kutuplu HVDC Sisteminin Kontrolü

Bir HVDC iletim sistemi etkin bir biçimde kontrol edilebilir. Güç sisteminden istenen performansı alabilmek adına sistemin etkin kullanımı, sistemin ne kadar kontrol edilebildiğine bağlıdır. Etkin ve sabit bir işletim sağlamak ve güvenlik ekipmanını tehlikeye sokmadan esnek güç kontrolünü maksimuma çıkarmak amacıyla, hiyerarşik düzende birçok kontrol seviyesi kullanılır [2].

İki AC sistemi birbirine bağlayan iki terminalli DC hatta DC kontrollerin ana fonksiyonu: terminaller arasındaki güç akışını kontrol etmek; ekipmanı, hata anındaki akım/gerilim zorlanmalarına karşı korumak; bağlanan AC sistemleri, DC hattın herhangi bir işletme modu için kararlı hale getirmektir [4].

Dönüştürücü anahtarlarından itibaren ana kontrolöre doğru, kontrolörler şöyle sıralanmıştır;

- Anahtar tetikleme devreleri; bazı koruma ve ölçme fonksiyonlarını gerçekleştirirler. Fakat normal koşullarda, kutup kontrolü ile anahtarlar arasında bir ara yüz olarak davranırlar.
- Kutup kontrolü; farklı kontrol döngülerine göre, dönüştürücülerin tetikleme açılarını hızlı bir şekilde (5 ms ile 50 ms' lik cevap süreleri vardır) değiştirmekten sorumludurlar.

- Kademe değiştirici kontrol; diğer kontrolörlere göre yavaş çalışırlar (kademe başına 5 s) ve dönüştürücülerin çalışma koşullarını optimize ederler. Hedefleri, minimumu reaktif güç, kayıp ve harmonik oluşturmaadır.
- Ana kontrol; bir istanyonda bulunur ve tüm çift kutuplu sistemi kontrol eder. Kutup kontrolüne göre cevap verme süresi daha uzundur.
- Telekomünikasyon; uzaktaki istasyona kumanda sinyallerini iletir.
- AC sistem sönüm kontrolü; farklı AC sistem büyüklüklerinin ölçümünü ve geri beslemesini yapar [3].

Tipik iki terminalli bir DC hat için kontrol stratejisi tercihi, izelge 3.2’ deki koşullara göre yapılır [4].

Çizelge 3.2 İki terminalli DC hat için kontrol stratejisi seçenekleri [4]

Koşul	İstenilen Özellikler	Gerekçe	Kontrol Uygulaması
1	I_d , maksimum DC akımın sınırlandırılması	Anahtarların korunması için	Doğrultucuda sabit akım kontrolü kullanılır
2	V_d , maksimum DC gerilimin uygulanması	İletim kayıplarını azaltmak için	İnverterde sabit gerilim kontrolü kullanılır
3	Komütasyon hatası olaylarının azaltılması	Kararlılık için	İnverterde minimum sönüm açısı kontrolü kullanılır
4	Dönüştürücülerdeki reaktif güç tüketiminin azaltılması	Gerilim regölasyonu ve ekonomik sebeplerden	Minimum tetikleme açıları kullanılır

Birinci koşul, doğrultucunun sabit akım kontrolünde kullanılmasını, üçüncü koşul ise inverterin sabit sönüm açısı kontrol modunda kullanılmasını gerektirir. Diğer kontrol modları, enerji iletim verimini artırmak için kullanılabilir [4].

HVDC dönüştürücülerini, hızlı bir şekilde devreye alınıp, devreden çıkarılabilir. Ancak normal işleme koşullarında bu manevralar, AC sistemde zorlanmalara yol açmamak için yavaş yapılır. HVDC sistemlerinde tristörlerin tek yönlü akım sağlamasından dolayı, akım akış yönü tersine çevrilemez. Dolayısıyla güç akışının tersine çevrilmesi, DC gerilimin tersine çevrilmesi ile elde edilir [3].

3.4 Kapasitör Komütasyonlu Dönüştürücüler

CSC ve VSC düzenlerine alternatif olarak yeni bir düzen olan Kapasitör Komütasyonlu Dönüştürücüler (CCC) ortaya çıkmıştır. Bu HVDC dönüştürücü düzeni yaklaşık 50 yıldır tartışılmaktadır. Bu düzen ile ilgili ilk çalışmalar 1950' li yıllarda yapılmaya başlanmıştır. 1970' lerin sonuna ve 1980' lerin başına doğru paralel bağlı kapasitörlerle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Ancak yarı iletkenli anahtarların anma değerleriyle ilgili uygulamadaki sınırlamalar nedeniyle, yapılan bu çalışmalar sistemin kurulumuyla sonuçlanmamıştır [4].

1990' ların başında aşağıdaki sebeplerden dolayı CCC düzeni tekrar gündeme gelmiştir:

- Anahtarların anma gerilimlerindeki problemler mali olarak daha az kısıtlayıcı hale gelmesi (artan anma değerlerinden ve azalan anahtar maliyetlerinden dolayı),
- Devamlı ayarlanabilir AC filtreler ve aktif filtrelerdeki gelişmelerden dolayı, reaktif gücün ve yüksek verimli harmonik filtrelemenin birbirinden bağımsız olarak yönetilmesi,
- Giderek artan zayıf AC sistemlere elektrik şirketlerinin bağlanma talebini klasik HVDC sisteminin karşılayamaması.

Kondansatörlerin dönüştürücü transformatörü ile dönüştürücü anahtarlarının arasında bulunması temel CCC karakteristiğidir. CCC' nin geliştirilmiş hali olan Kontrollü Seri Kapasitörlü Dönüştürücüler (CSCC) de kullanılmaktadır [4].

HVDC ile enerji iletimi sistemlerinde enerji kesintilerini ve sistemdeki elemanların hasar görmesini önlemek üzere çeşitli koruma ve ölçme düzenekleri bulunmaktadır. Ancak bu çalışma ile ilgisi olmadığı için, bu düzenekler incelenmemiştir.

3.5 Özet

Bu bölümde, HVDC sisteminin temel çeşitleri olan, CSC ve VSC dönüştürücülerinden bahsedilmiştir. Bu iki dönüştürücü tipinin kullanıldığı enerji iletimi sistemlerinde kullanılan elemanlar anlatılmıştır. VSC-HVDC sistemi, orta seviye güç ve gerilim değerleri için kullanılmaktadır. Uygulamada belli bir uzaklıktan sonra, deniz altı veya yer altı kablolarının kullanılması gerektiğinde tercih edilen bir sistemdir. Klasik HVDC ile enerji iletimi sistemi ise, uzun mesafelere büyük güçlerin iletilmesi için kullanılan bir sistemdir. Bu iki dönüştürücüye ek olarak 50 yıldır üzerinde çalışmalar yapılan, ancak yakın zamanda kullanılmaya başlanan

CCC tipindeki dönüştürücüden de bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasının konusu, klasik HVDC (çift kutuplu HVDC) sisteminin maliyetleri ve kayıp analizi üzerine olduğu için, enerji iletimi sisteminin kontrolü, güvenilirliği ve kullanılabilirliği ile ilgili detaylı bir bilgi verilmemiştir.

HVDC SİSTEMİNDE KAYIPLAR

4.1 Giriş

HVDC ile enerji iletimi sisteminde kayıplar, iletim hattının ve dönüştürücü merkezin kayıpları olmak üzere iki kısımda incelenirler. Dönüştürücü merkez kayıpları, hattan akan akıma bağımlı ve bağımsız olarak oluşmaktadır. DC enerji iletim hattının kayıpları ise, hattın uzunluğuna ve hattan akan akıma bağlıdır.

4.2 Dönüştürücü Merkez Kayıpları

Geleneksel bir AC şalt merkezinde kayıplar sebebiyle oluşan ekonomik etkiler, boşa ve yükte çalışma kayıpları olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Bu yaklaşımın sebebi ise, AC şalt merkezinde kayıpları oluşturan ana unsurun transformatör olması ve transformatör kayıplarının iki kısımda incelenmesidir. İlk kısım; manyetizasyondan kaynaklanır ve transformatörün enerjili olduğu süre boyunca, transformatör yükünden bağımsız bir şekilde oluşan kayıplardır. Buna boşa çalışma kayıpları adı verilir. İkinci kısım ise yük akımının karesi ile doğru orantılı olan yükte çalışma kayıplarıdır [23].

HVDC dönüştürücü merkezinde kayıpların ağırlıklı olarak oluştuğu bir ekipman yoktur. HVDC dönüştürücü merkezindeki kayıplar, her birinin yüklenme durumuna göre değişken kayıp karakteristiği olan farklı ekipmanların birleşimidir. Örneğin, anahtarlarda oluşan kayıplar akımın karesi ile doğru orantılı değildir. Dönüştürücü merkez enerjili halde ancak bekleme durumundayken (akımın akmadığı durum), tristörlü anahtarlar engellenir. Normal işletme durumuna göre farklı kayıp mekanizmaları işler. Bir başka örnek ise, farklı yüklenme

durumlarına göre farklı elemanların (harmonik filtreleri, soğutma üniteleri gibi) devreye girip çıkmasıdır. Dolayısıyla, dönüştürücü merkezin gerçekçi kayıp değerleri ancak boşta ve tam yükte çalışma arasındaki farklı değerlerin hesaplanması ile elde edilebilir [23].

HVDC dönüştürücü merkezindeki kayıpları tespit ederken, iki tip kayıp göz önüne alınır: bekleme durumu kayıpları ve toplam işletim kayıpları.

- **Bekleme durumu kayıpları:** HVDC dönüştürücü merkezinin enerjili ancak anahtarların kesimde olması halinde oluşur. Bu durumda, AC filtreler ve şönt kompanzasyon ekipmanına gerek yoktur. Dolayısıyla bu ekipmanlar AC baraya bağlı değildir. Düzeltme reaktörleri ve DC filtreler de enerjilenmemiştir. Ancak merkezin servis ve soğutma ekipmanı, ani yük talebi ihtimaline karşı devreye alınmıştır. Bekleme durumu kayıplarının, AC sistemdeki karşılığı boşta çalışma kayıpları olarak düşünülebilir [23].
- **Toplam işletim kayıpları:** Merkezin enerjilendiği ve anahtarların işletildiği durumda oluşan kayıplardır. İşletim kayıpları, minimum ve maksimum akım değerleri içerisinde değerlendirilir. Dönüştürücü merkez içerisindeki bazı ekipmanların, tüm yüklenme seviyeleri için kullanılmadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla belli bir yüklenme seviyesindeki kayıpları hesaplayabilmek için, hangi ekipmanların devrede olduğu bilinmelidir. Genellikle, belli bir yüklenme seviyesi için performans kriterlerinin karşılanması adına tüm ekipmanın devrede olduğu varsayılır. Aynı AC sistemde olduğu gibi, toplam işletim kayıplarından bekleme durumu kayıplarını çıkardığımızda yükte çalışma kayıpları elde edilir [23].

4.2.1 HVDC Dönüştürücü Merkezinin Toplam Kayıplarının Belirlenmesi

HVDC dönüştürücü merkezinin toplam kayıpları, merkezdeki ekipmanlarda oluşan kayıpların toplanması ile elde edilir. Ekipmanlardaki gerçek kayıplar çevre koşullarından da etkilenecektir. Kayıplar veya elektriksel karakteristikler fabrikada standart çevre ve işletme koşullarında, bazı ekipmanlar için ölçülür [23].

HVDC dönüştürücü merkezinin kayıpları, merkezin işletme parametrelerine bağlıdır. AC sistemin gerilimi ve dönüştürücü merkezin yüklenmesine ek olarak, dönüştürücünün tetikleme açısında bir parametredir. Bunlara ek olarak, reaktif güç kompanzasyonu da göz

önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla nominal değerler için, HVDC dönüştürücü merkezinin işletme parametreleri, tasarım kriterlerine ve performans talebine göre doğru tanımlanmalıdır. Kısmi yüklenmede, kullanılan kontrol stratejisinin merkez kayıpları üzerindeki etkisi büyüktür. Bir HVDC sistemindeki kayıpların hesabında aşağıdaki üç durum dikkate alınmalıdır [23]:

- **Anma yüklenme:** Yılın büyük bir bölümünde anma gücünde çalışan bir dönüştürücü merkezinin kayıpları bu koşullara göre belirlenmelidir. Nominal tetikleme açısında, kompanzasyon ve filtreleme ekipmanının performans gereklerini yerine getirecek şekilde bağlandığı ve yardımcı ekipmanlarında (soğutma üniteleri) devrede olduğu koşullar göz önüne alınarak kayıplar hesaplanır [23].
- **Değişken yüklenme:** Dönüştürücü merkezin, reaktif güç kompanzasyonu ve AC gerilim kontrolü için farklı yüklenme koşullarında işletildiği durumdur. Toplam dönüştürücü merkez kayıpları, bu yüklenme koşulları için belirlenir [23].
- **Bekleme durumu:** Bekleme durumunda, dönüştürücü transformatörleri enerjili ve tristörler kesimdedir. Tüm filtre ve reaktif güç kompanzasyonu ekipmanı devreden çıkarılmıştır. Merkezdeki servis yükleri ve yardımcı ekipmanlar, ani yüklenme durumuna karşı hazır bekletilmektedir [23].

Bekleme durumundaki dönüştürücü merkez kayıpları, iletim anma gücünün %0.1-0.11 arasında değişmektedir. Anma gücündeki işletme koşullarında bir dönüştürücü merkezinde oluşan kayıplarsa, iletim anma gücünün %0.5 ile %1' i arasındadır. Bir HVDC dönüştürücü merkezindeki kayıp dağılımı Çizelge 4.1' de verilmiştir [23].

Çizelge 4.1 HVDC dönüştürü merkezindeki kayıp dağılımı [23]

Ekipman	Toplam Kayıp (%)
Dönüştürücü transformatörü	
-Boşta çalışma (sabit) kayıpları	12-14
-Yüklü çalışma (değişken) kayıpları	27-39
Tristörlü anahtarlar	32-35
DC düzeltme reaktörleri	4-6
AC filtreler	7-11
Diğer kayıplar	4-9

4.3 Hat Kayıpları

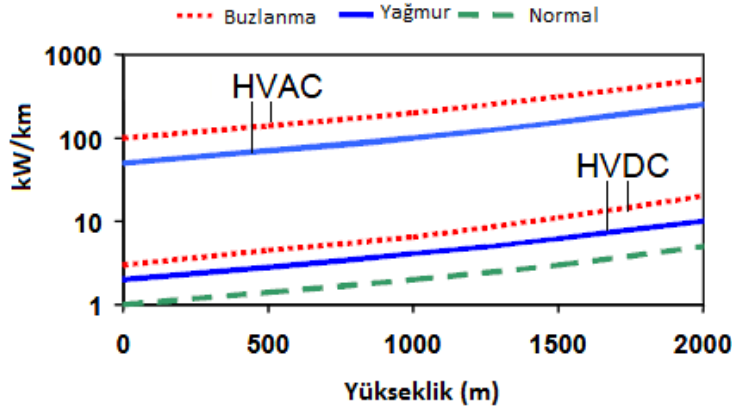
Hat kayıpları, korona ve hat direncinden dolayı oluşan kayıplar olarak ikiye ayrılabilir. Havai enerji iletim hatlarının doğru tasarımı için korona etkileri (güç kayıpları, radyo ve akustik ses) göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak, hat parametrelerine ve önceden kestirilemeyen atmosferik koşullara bağlı olduğundan tespiti oldukça zordur [24].

Bir DC hatta bir bölgedeki serbest yüklerin varlığı (bu yükler iletkenlerden yüzlerce metre uzakta bulunabilirler) korona etkisinin büyüklüğünü etkiler. Ayrıca serbest yükler, hat çevresindeki elektrik alanın değişmesine sebep olur. Dahası farklı kutuplar arasındaki iletkenlerde ve toprakla iletkenler arasında şarj akımlarına neden olur [24].

Bir DC hattın korona kayıpları, her bir demet iletkenin; maksimum yüzey gradyen değeri, çapı, sayısı, kutuplar arasındaki mesafe, kutupların yerden ortalama yüksekliğine bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilir. Bu parametrelerin yanında atmosferik koşulların da (karlı, yağmurlu, güneşli hava gibi) korona kayıpları üzerinde etkisi vardır. Ancak bu etki AC hatlardakine göre düşüktür [24].

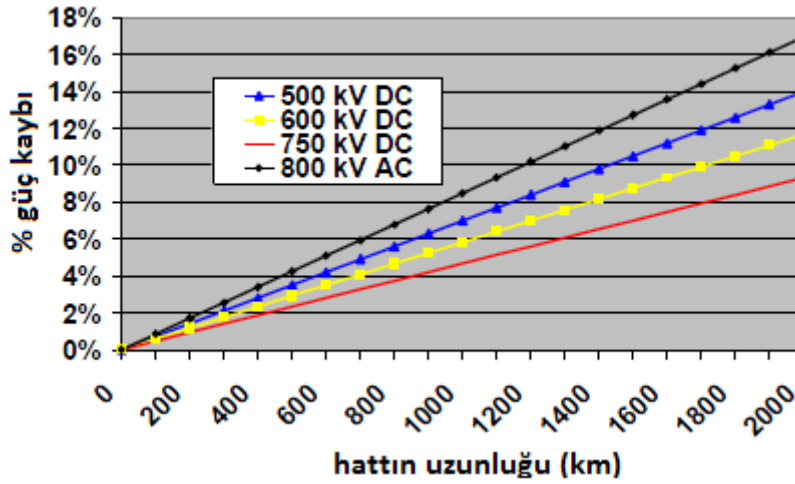
Havanın buzlu veya yağmurlu olması, DC hatların normal hava koşullarındaki korona kayıplarını 2-3 kat artırmaktadır. AC hatlarda ise bu artış 10-100 kat civarındadır. Bunun yanında bir DC hattın deniz seviyesinden 1800 metre yukarıda kurulması halinde korona kayıpları, deniz seviyesinde kurulması durumuna göre dört kat artmaktadır. Korona kayıplarının AC ve DC hatlardaki yüksekliğe ve hava koşullarına göre değişimi Şekil 4.1' de

verilmiştir. Bu şekilde normal hava koşulları her iki hat için de geçerlidir. Dolayısıyla, AC hatlar DC hatlara göre korona kayıpları açısından hava koşullarına karşı daha hassastır [25].



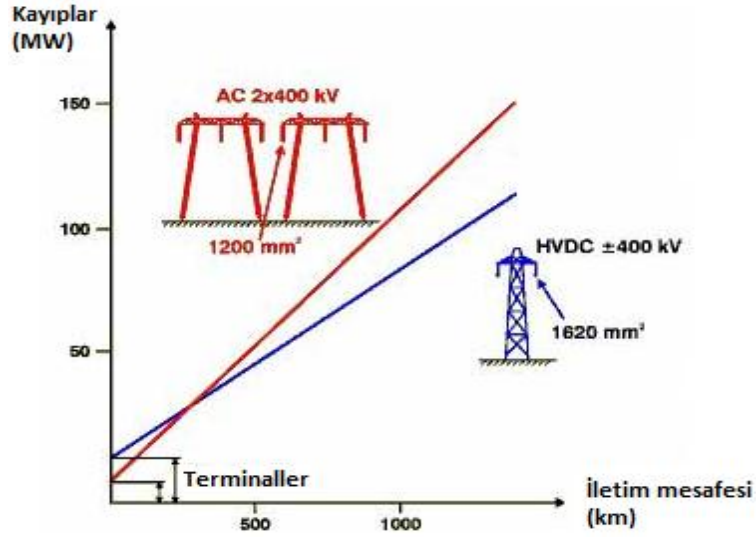
Şekil 4.1 Korona kayıplarının AC ve DC hatlardaki yüksekliğe ve hava koşullarına göre değişimi [25]

DC hatlardaki, hat direncinden oluşan kayıplar AC hatlara göre daha düşüktür. Çünkü DC hatlarda deri etkisi olmadığı için hattın kilometre başına direnci daha düşüktür. AC hatlar ile DC hatların gerilim ve mesafeye göre hat kayıplarındaki değişim Şekil 4.2' de verilmiştir. Bu şekilde, yüzde güç kaybı hattın yüküne (yüklenmesine) göre verilmiştir.



Şekil 4.2 Farklı gerilim seviyelerindeki AC ve DC hatlardaki yüzde güç kaybı [25]

1200 MW' lık AC ve DC güç sistemindeki toplam kayıpların iletim mesafesine göre değişimi Şekil 4.3' te verilmiştir. Görüldüğü gibi belli bir mesafeden sonra HVDC sistemi daha ekonomik hale gelmektedir.



Şekil 4.3 1200 MW'lık AC ve DC sistemin toplam kayıplarının iletim mesafesine göre değişimi [32]

4.4 Enerji İletim Sistemlerinde Kullanılan Çelik Özlü Alüminyum İletkenler

Enerji iletim sistemlerinde genellikle ucuz olmaları ve mekanik dayanımlarının yüksek olmasından dolayı çelik özlü alüminyum iletkenler kullanılır. Bu iletkenlerin özellikleri Çizelge 4.2' de verilmiştir. Her bir iletkenin akım taşıma kapasitesi şu koşullara göre hesaplanmıştır: iletkenin işletme sıcaklığı 75°C, ortam sıcaklığı 20°C, iletkene dik açı ile gelen rüzgar hızı 0.6096 m/s, yayılım katsayısı 0.5, emilim katsayısı 0.5, açık hava (güneş ısı 1033 W/m² olan) [34]. Belirtilen koşullar, iletim hattının kurulacağı bölgeye göre değişim göstereceğinden, iletkenin akım taşıma kapasiteside değişecektir. İleriki bölümlerde yapılan hesaplamalarda buradaki koşullar kabul edilmiştir.

Çizelge 4.2 Çelik özlü alüminyum iletkenler (ACSR) [34]

İsim Kodu	Kesit (AWG)	Al/St (mm ²)	İletken Çapı (mm)	Elektriksel Direnç Ω /km		75°C' deki Akım Taşıma Kapasitesi (A)
				DC 20°C	AC 75°C	
Dove	556.5	26/7	23.5458	0.097118	0.1191	735
Ortolan	1033.5	45/7	30.7848	0.053808	0.069557	1035
Diver	1272.0	48/7	34.4678	0.043637	0.056433	1180
Pheasant	1272.0	54/19	35.0774	0.043309	0.056105	1195
Parrot	1510.5	54/19	38.227	0.036419	0.047575	1325
Lapwing	1590.0	45/7	38.2016	0.035107	0.046262	1345
Seahawk	1869.0	68/7	40.7162	0.030152	0.039372	1480
Roadrunner	2057.5	76/19	43.18	0.027331	0.036091	1575
Bluebird	2156.0	84/19	44.7548	0.025854	0.034122	1635

4.5 Özet

Bu bölümde HVDC sistemindeki kayıplardan bahsedilmiştir. Dönüştürücü merkez kayıpları, IEEE Std. 1158-1991 standardına göre anlatılmıştır. Hatta oluşan kayıplar ısı ve korona kayıpları olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. HVDC sistemindeki kayıpların, HVAC sistemindeki kayıplarla karşılaştırılması yapılarak grafikler ile özetlenmiştir. Ayrıca yüksek gerilimle enerji iletiminde kullanılan çelik özlü alüminyum iletkenlerin özellikleri verilmiştir.

HVDC ve HVAC SİSTEMLERİNİN KURULUM MALİYETLERİ

5.1 Giriş

Yeni bir iletim hattının toplam maliyeti, uzun bir maliyet listesinden meydana gelir. Hem AC hem de DC hatlarda iki durumda da şalt tesisinin (dönüştürücü merkezin) ve hattın inşaa maliyetleri olacaktır. HVDC dönüştürücü merkezinin maliyetleri AC şalt tesisinin maliyetlerinden çok daha yüksektir. Ancak, uzun bir AC iletim hattında genellikle ara kompanzasyon merkezleride olacağından, AC hattın maliyeti de artacaktır. Hattın işletim süresi boyunca kayıplardan dolayı oluşan maliyetler de büyük önem arz eder [7].

Yeni kurulacak bir iletim hattının toplam maliyeti şu ana elemanlara ayrıştırılabilir; HVDC dönüştürücü merkez ekipmanlarının / AC şalt tesisi ekipmanlarının ana maliyeti, dönüştürücü merkez / şalt tesisi inşaa maliyeti, iletim hattının ekipman ve inşaa maliyeti, yedek ekipmanların ve alt sistemlerin maliyeti, yardımcı AC sistemlerin maliyetleri, AC/DC merkezlerin ve diğer ara merkezlerin istimlak bedelleri, hat koridorunun istimlak bedeli, sınırlamalar, çevresel düzenlemeler ve lisans alımları, mühendislik, planlama ve geliştirme maliyetleri, finansman, işletme ve bakım maliyetleri, projenin tahmin edilen ömrü boyunca oluşacak güç / enerji kayıp maliyeti gibi...

HVDC iletim sisteminin maliyeti birkaç değişkene dayalıdır. Bunlar; sistemin anma gücü, iletim mesafesi, iletim sistemi gerilimi ve dönüştürücü merkezlerin bağlanacağı AC sistemlerdeki iletim tipi ve gerilim seviyesidir. Bağlantı noktasındaki AC gerilim seviyesi düşük olduğunda maliyetler düşecektir [26].

5.2 Hat Kurulum Maliyetleri

Kilometre başına hat koridorunun maliyeti, bölgesel arsa maliyetlerine göre değişmektedir. İşçilik maliyetleride bölgeden bölgeye farklılık göstereceğinden, inşaa maliyetleride değişken olacaktır. Türkiye koşulları için bu maliyetlere ulaşmak mümkün olmamıştır. Ancak bir fikir vermesi açısından, çeşitli referanslardan alınan veriler anlatılacaktır.

Kiessling vd. tarafından [33] te farklı gerilim seviyelerindeki iletim hatlarının maliyetleri verilmiştir. Bu veriler tek ve çift devre hatları içermektedir (Çizelge 5.1). Çizelge 5.1’ deki 110 kV –380 kV arasındaki ısı limitler tek devre için verilmiştir.

Çizelge 5.1 AC iletim hatları için ekonomik veriler; 110 kV – 380 kV çift devre, 500 kV – 750 kV tek devre [33]

Anma Gerilimi (kV)	110	220	380	500	750
Isıl Limit (MVA)	100-350	300-1000	1400-2700	1800-3000	3000-5000
Ekonomik Güç (MVA)	20-100	120-350	500-1200	700-1500	2000-3000
Hat Koridoru (m)	40-50	55-60	60-70	60-70	80-120
Kule Ağırlığı (t/km)	15-25	25-35	45-65	16-25	28-50
Yatırım (k€/km)	125-200	150-400	650-1200	250-400	350-4500

Hauth vd. tarafından [7] de, 1997 yılı Amerika koşulları için AC/DC hatların inşaa ve hat koridoru istimlak bedellerine göre bir çizelge oluşturulmuştur. Çizelge 5.2’ de $1 m^2$ büyüklüğündeki bir arazinin istimlak bedeli \$0.9884 ($0.9884 \$/m^2$) olarak alınmıştır.

Kim vd. tarafından [30] da belirtildiğine göre 2000 MW ± 350 kV’ luk HVDC çift kutuplu iletim hattının maliyeti 249600 \$/km olarak verilmiştir. Yine aynı referansta 2000 MW ± 500 kV’ luk HVDC çift kutuplu iletim hattının maliyeti ise 284160 \$/km olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2 1997 yılı Amerika koşulları için bir enerji iletim hattının tahmini maliyeti (\$/km)
[7]

Hat Gerilimi (kV) ve AC/DC	Hat Koridoru Genişliği (metre)	m^2/km	İstimlak Bedeli (\$/km)	İnşaa Maliyeti (\$/km)	Toplam Maliyet (\$/km)
2x230 - AC	41.148	41239	40389	233010	273400
345 - AC	45.72	45766	45360	310690	356050
500 - AC	60.96	60853	60273	428750	489020
3x ± 188 - DC	41.148	41239	40389	233010	273400
± 281 - DC	38.1	37970	37904	205050	242960
± 408 - DC	42.672	42748	42253	285830	328080

Meah ve Ula tarafından [27] de, 2007 yılı için Nelson River Bipole 1 projesinin maliyeti hem AC hem de DC seçeneği için incelenmiştir. İletim hattının 500 kV AC olması durumundaki hat maliyeti 593.437 \$/kV-km olarak hesaplanmıştır. Yine aynı çalışmada hattın DC olması durumundaki maliyetler, $\pm 400 - \pm 700$ kV gerilim değerleri için 198.848 - 229.918 \$/kV-km aralığında değişmektedir. Nelson River Bipole 1 hattının uzunluğu 895 km' dir. Bu hat 2007 yılında 500 kV' luk AC sistem ile kurulsaydı 265.6 milyon dolara, ± 450 kV' luk DC sistem ile kurulsaydı 86.3 milyon dolara mal olacaktı. İki sistem arasındaki maliyet farkının bu kadar büyük olmasının iki ana sebebi vardır. Birinci sebep, AC iletim hattı koridorunun aynı güç kapasitesinde ve güvenilirlikteki bir DC iletim hattına göre daha geniş olması ve inşaa masraflarının daha yüksek olmasıdır. İkinci sebep ise AC iletim hattının üç iletken, DC iletim hattının iki iletken meydana gelmesidir.

5.3 AC Şalt Tesisi Maliyeti

AC şalt tesisi maliyeti; devre kesicileri, güç transformatörü, ayırıcılar, reaktörler, şönt kapasitörler, statik kapasitörler, senkron kompanzatörler, seri kapasitörler, baralar, koruma ve kontrol sistemleri, istimlak bedeli ve işçilik olarak ayrıştırılabilir [27].

Türkiye için AC şalt tesisinin kurulum maliyetine ulaşamamıştır. Ancak bir fikir vermesi açısından, Hauth vd. tarafından [7] de AC şalt tesisi maliyetleri 1997 Amerika koşulları için 10

\$/kW olarak belirtilmiştir. Yine günümüz koşullarındaki durumuda bilmek açısından Nelson River Bipole 1 örneği kullanılabilir. Meah ve Ula tarafından [27] de, 500 kV' luk bir AC şalt tesisinin maliyeti için Çizelge 5.3 oluşturulmuştur.

Çizelge 5.3 Nelson River Bipole 1 için 500 kV' luk bir AC Şalt tesisi maliyetleri [27]

Ekipman tipi	Maliyeti (M\$)
Devre kesici	1.5
Transformatör	1.5345
Şönt Kapasitör	1.7875
Seri Kapasitör	2.2
Statik VAr Sistemi	8.25
Şönt Reaktörler	3.575
Toplam	18.847

Nelson River Bipole 1 projesinin kurulu gücü 1854 MW' tır. Dolayısıyla bir AC şalt tesisinin maliyeti yaklaşık olarak 10.17 \$/kW' a denk gelmektedir.

5.4 HVDC Dönüştürücü Merkez Maliyetleri

AC sistem için hat maliyetleri yüksek ve şalt tesisi maliyetleri düşüktür. DC sistemde ise dönüştürücü merkezin maliyeti ön plandadır. Bir HVDC dönüştürücü merkezinin ana maliyet unsurları; tristörlü anahtarlar ve anahtarların soğutması, dönüştürücü transformatörü, DC şalt tesisi, AC şalt tesisi, kontrol ve koruma sistemi, işçilik, istasyon yardımcı gücü, proje yönetimi ve mühendislik çalışmalarıdır [7].

Hauth vd. tarafından [7] de, 1997 yılı Amerika koşulları için 4 farklı HVDC dönüştürücü merkezinin anahtar teslim maliyeti Çizelge 5.4' te verilmiştir. Buradaki yüzde değerler toplam maliyetin yüzdesi olarak alınmıştır. Ayrıca çizelgenin son satırında görüldüğü gibi toplam maliyet, dönüştürücü merkezin anma gücüne ve ikiye (sistemde iki tane dönüştürücü merkez olduğundan) bölündüğünde, dönüştürücü merkez ve kW başına \$ cinsinden maliyet elde edilir.

Çizelge 5.4 1997 yılı için farklı HVDC dönüştürücü merkezlerinin anahtar teslim maliyetleri ve ayrıntılı dökümü [7]

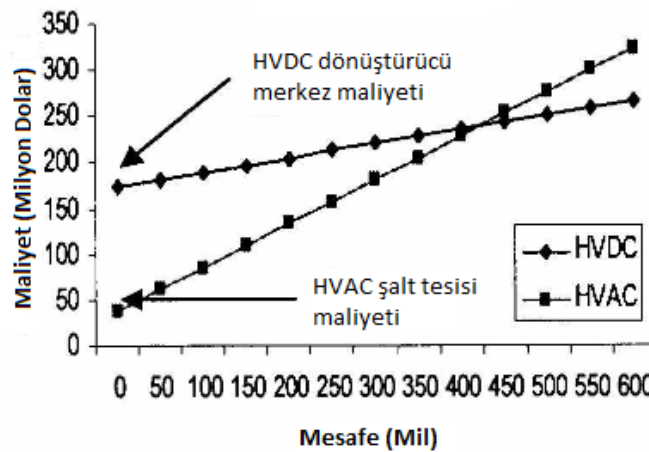
Proje Bileşeni	Sırt-Sırta 200 MW	± 250 kV 500 MW	± 350 kV 1000 MW	± 500 kV 3000 MW
Tristörlü Anahtarlar	%19.0	%21.0	%21.3	%21.7
Dönüştürücü Transformatörü	%22.7	%21.3	%21.7	%22.0
DC Şalt Tesisi	%3.0	%6.0	%6.0	%6.0
AC Şalt Tesisi	%10.7	%9.7	%9.7	%9.3
Kontrol, Koruma ve İletişim	%8.7	%8.0	%8.0	%7.7
İşçilik	%13.0	%13.7	%13.7	%13.7
Yardımcı Güç	%2.0	%2.3	%2.3	%2.3
Proje Yönetimi	%21.0	%18.0	%17.3	%17.3
Toplam Tahmini Maliyet	43.3 M\$	145 M\$	213.7 M\$	451.7 M\$
Maliyet (\$/kW/Terminal)	108	145	107	75

Meah ve Ula tarafından [27] de, 2007 yılı için Nelson River Bipole 1 enerji iletim sisteminde (± 450 kV / 1854 MW), bir HVDC dönüştürücü merkezinin maliyeti 40.25 – 53.48 \$/kW/Terminal aralığında değişmektedir. Kim vd. tarafından [30] da belirtildiğine göre 2000 MW ± 500 kV' luk HVDC çift kutuplu dönüştürücü merkez fiyatları 52.39 – 72.5 \$/kW/Terminal aralığında değişmektedir.

Weimers tarafından [25] te belirtildiğine göre, günümüzde büyük güçlü dönüştürücü merkezlerin maliyeti 50 \$/kW' a kadar düşmüştür. Görüldüğü gibi bu birim fiyat Meah ve Ula' nın [27] de elde ettiği birim fiyat ile örtüşmektedir. Dolayısıyla, 1997 yılına göre dönüştürücü merkez maliyetleri yarı yarıya düşmüştür. Bunun en büyük sebebi ise güç elektroniği elemanlarındaki gelişmelerle birlikte, bu elemanların ucuzlamasıdır.

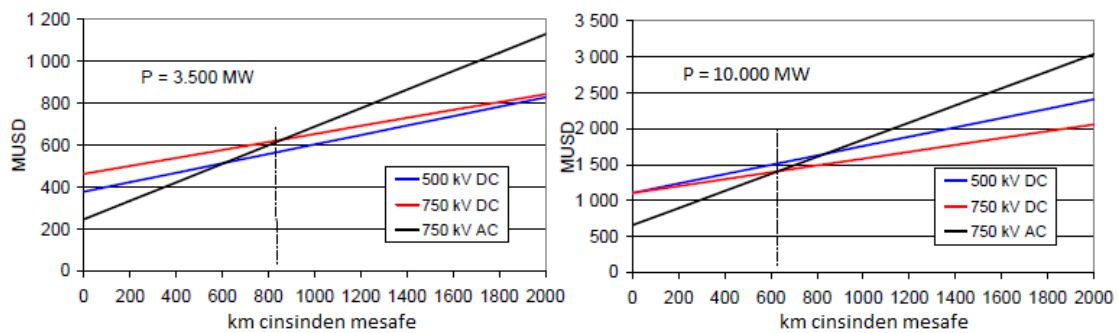
5.5 Toplam Maliyetlerin Karşılaştırılması

Meah ve Ula tarafından [27] de incelenen Nelson River Bipole 1 örneğinde, 1854 MW'lık taşıma kapasitesi ve 895 km'lik (556.2 mil) hat için, 500 kV AC iletim sisteminin toplam maliyeti 303.29 milyon dolar olarak hesaplanmıştır. Aynı güç ve mesafedeki ± 450 kV DC alternatifinin toplam maliyeti ise 259.8 milyon dolar olarak hesaplanmıştır. Bu iki sonucun grafiğe dökülmüş hali ise Şekil 5.1'de verilmiştir. Burada yaklaşık 450 millik hat uzunluğunun üzerinde, DC hattın ekonomik hale geldiği görülmektedir.



Şekil 5.1 Nelson River Bipole 1 için 2007 yılı maliyetlerine göre HVDC ile HVAC iletim sistemi maliyetleri [27]

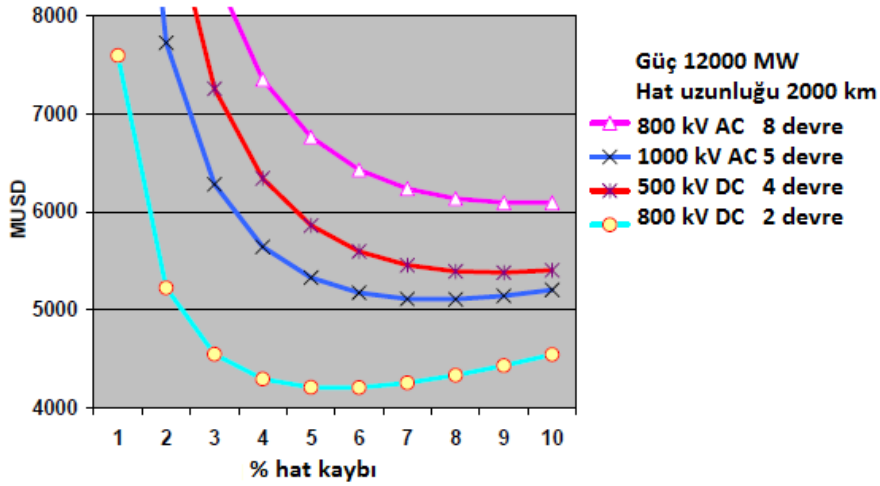
Weimers tarafından [25] te, 3500 MW ve 10000 MW'lık iletim taşıma kapasiteleri için 500 kV DC, 750 kV DC ve 750 kV AC iletim sistemlerinin maliyetleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.2). Bu karşılaştırma sonucunda 3500 MW'lık sistemde 750 kV DC – 750 kV AC alternatiflerinin başa baş mesafesi 800 km ve 500 kV DC – 750 kV AC alternatiflerinin başa baş mesafesi 600 km civarında çıkmıştır. 10000 MW'lık iletim sisteminin 750 kV DC – 750 kV AC karşılaştırmasındaki başa baş mesafe 600 km olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.2 Sırasıyla 3500 MW ve 10000 MW'lık iletim sistemlerin dönüştürücü merkez ve hat maliyetlerinin toplamı [25]

Bu grafiklerden de anlaşılacağı gibi iletim gücünün artması ile hat gerilimini artırmak ekonomik bir çözüm sunmaktadır.

Asplund tarafından [28] de, 12000 MW taşıma kapasiteli ve 2000 km' lik bir iletim sistemi için farklı gerilim seviyelerinde, kayıplara bağlı maliyet grafiği oluşturulmuştur (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Farklı gerilim seviyesi ve tipleri için hat kayıplarına bağlı maliyet fonksiyonları [28]

Şekil 5.3' de istasyon, hat ve kayıplardan kaynaklanan maliyetler hat kayıplarının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Burada görüldüğü gibi çok düşük hat kayıpları hedeflendiğinde, (demet iletken sayısını artırmak gerektiğinden) kurulum maliyetleri artacak, ancak kayıp maliyetleri düşecektir. Kurulum maliyetlerini düşürmek istediğimizde, bu sefer hat kayıplarından fedakarlık etmemiz gerekecek ve kayıp maliyetleri artacaktır. Dolayısıyla 2000 km mesafede 12 GW' lık bir güç iletmek istiyorsak, en ucuz seçenek yaklaşık %5' lik hat kaybı ile 800 kV' luk HVDC hattıdır.

Farklı AC ve DC hat gerilimlerinde ve düzenlerindeki enerji iletimi sistemlerinin, kurulum ve kayıp maliyetleri Çizelge 5.5' te gösterilmektedir. Buradaki "Tek Devre" kavramı, bir tane 3 fazlı AC enerji iletimi sistemini, "Çift Devre" kavramı aynı direği paylaşan 2 tane 3 fazlı AC enerji iletim sistemlerini, "Bipole" kavramı ise çift kutuplu DC enerji iletim sistemini tanımlamaktadır.

Çizelge 5.5 HVDC ve HVAC iletim sistemi alternatiflerinin maliyet karşılaştırması [8]

Alternatifler	DC Alternatifler				AC Alternatifler		
	± 500 kV Bipole	$2 \times \pm 500$ kV 2 x Bipole	± 600 kV Bipole	± 800 kV Bipole	500 kV 2 x Tek Devre	500 kV Çift Devre	765 kV 2 x Tek Devre
Ana Maliyet							
Anma Gücü (MW)	3000	4000	3000	3000	3000	3000	3000
Kompanzasyon sistemiyle beraber istasyon maliyeti (M\$)	420	680	465	510	542	542	630
İletim hattı maliyeti (M\$/km)	1.00	1.00	1.125	1.22	1.25	2.00	1.75
Mesafe (km)	1200	2400	1200	1200	2400	1200	2400
İletim hattı maliyeti (M\$)	1200	2400	1350	1463	3000	2400	4200
Toplam Maliyet (M\$)	1620	3080	1815	1973	3542	2942	4830
Yıllık ödeme (\$), 30 yıl boyunca %10 faizle	172	327	193	209	376	312	512
\$/kW-Yıl cinsinden maliyet	57.28	81.68	64.18	69.75	125.24	104.03	170.8
%85 kullanım faktörüyle \$/MWh cinsinden maliyet	7.69	10.97	8.62	9.37	16.82	13.97	22.93

Çizelge 5.5 HVDC ve HVAC iletim sistemi alternatiflerinin maliyet karşılaştırması (devam) [8]

Tam yüklenmede kayıplar (MW)	193	134	148	103	208	208	139
Tam yüklenmedeki % kayıp	6.44	3.35	4.93	3.43	6.93	6.93	4.62
1500 \$/kW' ta anaparalaştırılmış kayıp maliyeti	246	171	188	131	265	265	177
Parametreler: Faiz oranı : %10 Anaparalaştırılmış kayıp maliyeti : 1500 \$/kW							
Notlar: AC akımın %94 güç faktöründe olduğu varsayılmıştır. Dönüştürücü merkez kayıpları istasyon başına yüklenmenin %0.75' i dir. Toplam şalt tesisi kayıplarının yüklenmenin %0.5' i olduğu varsayılmıştır.							

Çizelge 5.5' te 1200 km ve 3000 MW' lık taşıma kapasiteli farklı AC ve DC iletim sistemleri için ilk yatırım maliyetine ve kayıplara bağlı ekonomik karşılaştırma yapılmıştır. İletim hattı uzun olduğundan sistem kararlılığını sağlamak için AC alternatifte seri kompanzasyon merkezlerinin, ara şalt tesislerinin ve şönt reaktörlerin kurulması gerekmektedir. Bu gereksinimler çizelgenin istasyon maliyetleri satırına yansıtılmıştır. Bu çizelgede HVDC dönüştürücü merkezlerinin kurulum maliyeti 70 – 85 \$/kW/Terminal aralığında değişmektedir. Havai iletim hattının maliyeti ise 0.994 – 1.211 M\$/km aralığında değişmektedir [8].

5.6 Özet

Bu bölümde HVAC ve HVDC sistemlerinin kurulum maliyetleri karşılaştırmalı olarak anlatılmıştır. Sistem maliyetleri, istasyon ve hat maliyetlerinden oluşmaktadır. Bu maliyetler AC ve DC iletim sistemi için, 1997 yılı ve günümüz koşullarına göre verilmiştir. Türkiye' de bu konuda yapılan bir maliyet analizi bulunmadığı için referans [27] de verilen değerler, maliyet analizi bölümünde baz alınmıştır.

HVDC ALTERNATİFİ İÇİN YAPILAN ANALİZLER**6.1 Giriş**

Bu bölümde literatürde bulunan maliyet verilerine göre Türkiye’ ye kurulacak çift kutuplu bir HVDC enerji iletim sisteminin kurulum ve kayıp maliyetleri tahmin edilecektir. Önceden de belirtildiği gibi kurulacak HVDC enerji iletim sistemi, Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli arasındaki AC iletim hattının alternatifi olarak düşünülmüştür. Bu hattın HVDC alternatifinin iletim gerilim seviyesi olarak ± 300 , ± 400 , ± 500 kV’ luk DC gerilimleri alınmış ve buna bağlı olarak değişen kayıplar incelenmiştir.

Yapılacak hesaplamalarda AC hat ile DC hattın ısı güç limitleri eşit kabul edilmiştir [7]. Mevcut AC iletim hattına ait özellikler Çizelge 6.1’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Mevcut 380 kV’ luk AC hatta ait değerler

Parametreler	Değerler
Hattın fazlar arası gerilimi (U)	380 kV
Hattın uzunluğu	615 km
Hattın devre tipi	Çift devre
İletken tipi	3 x PHEASANT
İletkenin akım taşıma kapasitesi	1.195 kA [34]

Hauth vd. tarafından [7] de yapılan çalışmada AC hat ile DC hat, ısı gücü limitleri açısından karşılaştırılmıştır. Mevcut AC iletim hattının ısı gücü, Kiessling vd. tarafından [33] te belirtilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

$$\text{ISIL LİMİT (MVA)} = \sqrt{3} * U \text{ (kV)} * 75^{\circ}\text{C'DEKİ ANMA AKIMI (kA)} \quad (6.1)$$

$$75^{\circ}\text{C'DEKİ ANMA AKIMI (kA)} = \text{DEVRE TİPİ} * \text{DEMET SAYISI} * \dots$$

$$\text{AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ (kA)} \quad (6.2)$$

$$\text{ISIL LİMİT (MVA)} = \text{DEVRE TİPİ} * \text{DEMET SAYISI} * \dots$$

$$\text{AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ (kA)} * \sqrt{3} * U \text{ (kV)} \quad (6.3)$$

$$\text{ISIL LİMİT (MVA)} = 2 * 3 * 1.195 * \sqrt{3} * 380 = 4719.15 \text{ MVA}$$

olarak hesaplanır. Yeni kurulacak çift kutuplu HVDC sistemi için de bu ısı limit kullanılarak, iletim hattında kullanılacak iletken tipi seçilir. Örneğin, hat gerilimi (u_{DC}) 500 kV ve kullanılacak demet iletken sayısı 4 olarak kabul edilirse;

$$\text{AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ (kA)} = \frac{\text{ISIL LİMİT(MVA)}}{2 * \text{DEMET İLETKEN SAYISI} * u_{DC} \text{ (kV)}} \quad (6.4)$$

$$\text{AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ (kA)} = \frac{4719.15}{2 * 500 * 4} = 1.179 \text{ kA}$$

olarak hesaplanır. Eşitlik (6.4)' te kullanılan 2 çarpanı, HVDC enerji iletim sistemi çift kutuplu olduğu için kullanılmıştır. 1179 A' lik akım taşıma kapasitesine sahip iletken Diver iletkenidir [34]. Bu iletkenin 20°C' deki DC direnci 0,043637 Ω/km' dir. 75°C' deki DC direnci bulmak için (6.5) eşitliği kullanılır;

$$R = R_0 [1 + \alpha * (T - T_0)] \quad [36] \quad (6.5)$$

Burada;

R_0 : iletkenin 20°C'deki DC direnci,

α : direncin sıcaklık katsayısı (0,00403 1/K) [33],

T_0 : 20°C'deki sıcaklık,

T : 75°C'deki sıcaklık ve

R : 75°C'deki DC dirençtir.

Seçilen Diver tipi iletkenin 75°C'deki direnci:

$R = 0,043637 * (1 + 0,00403 * (75 - 20)) = 0,053309 \text{ } \Omega/\text{km}$ olarak hesaplanır. Bu örnekte demet iletken sayısı 4 seçildiğine göre, DC hattın bir kutbunun km başına direnci $R/4 = 0,013327 \text{ } \Omega/\text{km}$ ' dir.

DC iletim hattında kullanılan gerilim seviyesinin, $\pm 300, \pm 400, \pm 500 \text{ kV}$ olması durumları için hesaplanan akım taşıma kapasiteleri ve bu akım taşıma kapasitelerine göre iletken tipleri Çizelge 6.2' de verilmiştir.

Çizelge 6.2' deki akım taşıma kapasiteleri; ortam sıcaklığı 20°C, iletken dik açı ile gelen rüzgar hızı 0.6096 m/s, yayılım katsayısı 0.5, emilim katsayısı 0.5, açık hava (güneş ısı 1033 W/m² olan) atmosferik koşullar kabul edilerek hesaplanmıştır [34]. Bu çalışmada, mevcut AC hat ve yerine kurulacak DC alternatifi için de bu koşulların var olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Bilinmelidir ki çelik özlü alüminyum iletkenlerin akım taşıma kapasiteleri, atmosferik koşullara göre oldukça değişkendir.

Çizelge 6.2 Mevcut AC iletim hattının ısı güç limitine göre DC alternatif için seçilen farklı düzenlerdeki iletken tipleri

İletim Gerilimi Seviyesi (kV)	Demet İletken Sayısı	Hesaplanan Akım Taşıma Kapasitesi (A)	İletken Tipi/Kesiti (AWG)	20°C' deki DC Direnç (Ω/km)	75°C' deki Kutup Başına DC Direnç (Ω/km)
300	5	1573,05	Roadrunner/2057,5	0,027331	0,006677783
300	6	1310,875	Parrot/1510,5	0,036419	0,007415212
400	4	1474,734375	Seahawk/1869	0,030152	0,009208798
400	5	1179,7875	Diver/1272	0,043637	0,010661828
500	3	1573,05	Roadrunner/2057,5	0,027331	0,011129639
500	4	1179,7875	Diver/1272	0,043637	0,013327285

Güvenlik sebebiyle, ölçüm verileri ile ilgili herhangi bir ölçüm değeri paylaşılammamaktadır. Ancak şunlar verilebilir; elimizdeki bir yıllık ölçüm verilerinden, kullanılabilir yaklaşık 138 günlük (3302,167 saatlik) ölçüm verisi çıkmıştır. Bu verilerin Atatürk Barajı-Yeşilhisar ve Yeşilhisar-Temelli arasındaki 3302,167 saatlik tüketilen enerjileri hesaplanmış ve bu iki değer

toplanarak toplam tüketilen enerji (AC hattın yüklenmesi) 1.062.468.173 kWh olarak elde edilmiştir. Verilerin toplam enerji tüketiminden yola çıkarak, 3302,167 saat boyunca AC hattın ortalama yüklenmesi 321,7488032 MW olarak hesaplanmış ve DC alternatifin yüklenmesi için bu aktif güç değeri kullanılmıştır.

6.2 Kurulum Maliyetleri

Kurulum maliyetleri hesaplanırken, literatürde bulunan farklı yıllardaki maliyet verileri kullanılmıştır. Ancak vergilendirme, gümrük giderleri, ithalat masrafları, ... gibi ek maliyetler dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla Türkiye'ye kurulacak HVDC sistemi maliyetinin, hesaplanan değerlerden daha yüksek olması beklenmektedir.

Kurulum maliyetlerinin hesaplanmasında, Hauth vd. tarafından [7] de verilen formüller kullanılmıştır. Literatürde bulunan farklı yıllara ait verilere dayalı kurulum maliyetleri (6.6) eşitliği ile hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 6.3' te özetlenmiştir.

$$\text{DC KURULUM MALİYETİ} = 2 * \text{DÖNÜŞTÜRÜCÜ MERKEZ MALİYETİ} \left(\frac{\$}{\text{kW}} \right) * P \text{ (MW)} * \dots$$

$$1000 \left(\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right) + \text{DC HAT MALİYETİ} \left(\frac{\$}{\text{km}} \right) * \text{HATTIN UZUNLUĞU (km)} \quad (6.6)$$

Burada;

P : Hattın anma gücüdür (MW).

Çizelge 6.3 Çift kutuplu HVDC sisteminin kurulum maliyetleri

Kaynak	Yılı	Dönüştürücü Merkezlerin Maliyet Aralığı \$/kW/Terminal		İletim Hattının Maliyeti M\$/km		Hattın Anma Gücü MW	Hattın Uzunluğu km	Kurulum Maliyeti M\$	
		Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır			Alt Sınır	Üst Sınır
[7]	1997	75	145	0,243	0,328	1000	615	299,4	491,8
[27]	2007	40,25	53,48	0,094	0,094	1000	615	138,4	164,9
[8]	2008	70	85	0,994	1,211	1000	615	751,3	914,8
[30]	2009	52,39	72,5	0,284	0,284	1000	615	279,5	319,8

Bu verilere dayanarak yeni kurulacak HVDC iletim hattının kurulum maliyeti için alt ve üst sınır değerler belirlenebilir. Bahsedilen Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli hattının uzunluğu 615 km' dir. Bu uzunluğa göre hesaplanan kurulum maliyetleri Çizelge 6.3' te verilmiştir.

6.3 Kayıplardan Kaynaklanan Maliyetler

6.3.1 DC Sistemin Kayıp Maliyeti

Çift kutuplu HVDC enerji iletim sisteminin kayıpları, (6.7), (6.8) ve (6.9) eşitliklerine göre hesaplanmıştır [7]. Sistemdeki dönüştürücü merkez kayıpları, sistem yükünün (yüklenmesinin) %0.75' i ile %1' i olduğu kabul edilmiştir ve kayıp analizleri bu alternatiflere göre yapılmıştır [4, 6-9, 23].

Çift kutuplu bir HVDC iletim hattında her bir kutuptan çekilen akım;

$$I_{DC} \text{ (kA)} = \frac{P_{DC} \text{ (MW)}/2}{u_{DC} \text{ (kV)}} \quad (6.7)$$

eşitliği ile hesaplanır. Buna göre;

$$\text{DC HAT KAYIPLARI} \left(\frac{\text{kW}}{\text{km}} \right) = 2 * (I_{DC} \text{ (kA)})^2 * R_{DC} \left(\frac{\text{OHM}}{\text{km}} \right) * 1000 \left(\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right) \quad (6.8)$$

$$\text{TOPLAM DC KAYIPLAR (kW)} = \text{DC HAT KAYIPLARI} \left(\frac{\text{kW}}{\text{km}} \right) * \ell \text{ (km)} + \dots$$

$$2 * P_{DC} \text{ (MW)} * 1000 \left(\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right) * \text{Dönüştürücü Merkezin Kayıp Yüzdesi} \quad (6.9)$$

ile hesaplanabilir. Burada;

P_{DC} : DC hattın yükü (MW), u_{DC} : Hattın DC gerilimi (kV),

I_{DC} : Hattan akan DC akım (kA), ℓ : Hattın uzunluğu (km),

R_{DC} : Hattın bir kutbunun işletme sıcaklığındaki km başına DC direncidir (Ω/km).

Kayıp maliyetler hesaplanırken, hem mevcut AC hat için hem de DC alternatifleri için 2011 yılı enerji tarifeleri kullanılmıştır. Çünkü iletim hattında kayıplar olmasaydı, hesaplanan kayıp maliyetleri kadar daha gelir elde edilebilecekti. Enerji bedeli hesaplanırken mesken, sanayi alçak gerilim ve sanayi orta gerilim enerji tarifeleri kullanılmıştır. Bu tarifelerin oranları değiştirilerek farklı toplam maliyetler elde edilmiştir. Meskenlerin yüzdesi i olarak verilirse,

$(1 - i)/2$ sanayi alçak gerilim veya sanayi orta gerilim yüzdesi olarak alınmıştır. Meskenlerin yüzdesi i , %0-100 arasında %10 artım ile değişmektedir.

Yani sanayi tarifeleri yarı yarıya kendi aralarında paylaştırılmıştır. Kullanılan enerji tarifeleri Çizelge 6.4’ te gösterilmiştir [37]. Bu çizelgede kullanılan çok zamanlı tarife uygulamasında gündüz 06-17, puant 17-22, gece 22-06 saatleri arasını göstermektedir.

Çizelge 6.4 Hesaplamalarda kullanılan enerji tarifeleri [37]

kr/kWh	Tek Zamanlı	Çok Zamanlı		
		Gündüz	Puant	Gece
Sanayi Orta Gerilim	18,434	18,336	29,439	10,351
Sanayi Alçak Gerilim	19,522	19,424	30,527	11,438
Mesken	21,659	20,385	32,133	11,936

Çizelge 6.4’ te verilen değerler kullanılarak, toplam enerji bedelleri (6.10) ve (6.11) eşitlikleri ile hesaplanır. Yıllık DC kayıp maliyeti ise eşitlik (6.12) ile hesaplanır. Bu eşitliklerdeki “*enerjibedelitek*” ve “*enerjibedelicok*” değerleri, sırasıyla tek zamanlı ve çok zamanlı tarifelere bağlı eşitliklerin sonuçlarıdır.

$$enerjibedelitek \left(\frac{TL}{kWh} \right) = (i * 21.659 + ((1 - i)/2) * 19.522 + \dots ((1 - i)/2) * 18.434)/100 \quad (6.10)$$

$$enerjibedelicok \left(\frac{TL}{kWh} \right) = (i * \left(20.385 * \frac{11}{24} + 32.133 * \frac{5}{24} + 11.936 * \frac{8}{24} \right) + \dots \left(\frac{1 - i}{2} \right) * (18.336 * \frac{11}{24} + 29.439 * \frac{5}{24} + 10.351 * \dots \frac{8}{24}) + \left(\frac{1 - i}{2} \right) * (19.424 * \frac{11}{24} + 30.527 * \frac{5}{24} + \dots 11.438 * \frac{8}{24}))/100 \quad (6.11)$$

$$DC KAYIP MALİYETİ \left(\frac{TL}{Yıl} \right) = 8760 \text{ (h)} * enerjibedelitek(enerjibedelicok) \dots \left(\frac{TL}{kWh} \right) * TOPLAM DC KAYIPLAR (kW) \quad (6.12)$$

6.3.2 AC Sistemin Kayıp Maliyeti

Çift devreli bir AC enerji iletim sisteminin kayıpları, (6.13), (6.14) ve (6.15) eşitliklerine göre hesaplanır [7]. Sistemdeki şalt tesisi kayıplarının, sistem yükünün (yüklenmesinin) %0.5' i olduğu kabul edilmiştir [7, 8].

Çift devre, üç fazlı bir AC iletim hattında her bir fazdan çekilen akım;

$$I_{AC} \text{ (kA)} = \frac{P_{AC} \text{ (MW)}}{2 * \sqrt{3} U \text{ (kV)} * \cos \varphi} \quad (6.13)$$

eşitliği ile hesaplanır. Buna göre;

$$\text{AC HAT KAYIPLARI} \left(\frac{\text{kW}}{\text{km}} \right) = 2 * 3 * (I_{AC} \text{ (kA)})^2 * R_{AC} \left(\frac{\text{OHM}}{\text{km}} \right) * 1000 \left(\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right) \quad (6.14)$$

$$\text{TOPLAM AC KAYIPLAR (kW)} = \text{AC HAT KAYIPLARI} \left(\frac{\text{kW}}{\text{km}} \right) * \ell \text{ (km)} + \dots$$

$$P_{AC} \text{ (MW)} * 1000 \left(\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right) * \text{Şalt Tesisin Kayıp Yüzdesi} * \text{Şalt Tesisi Sayısı} \quad (6.15)$$

ile hesaplanabilir.

Burada;

I_{AC} : Hattan akan AC akım (kA), P : Hattın aktif gücü (MW),

P_{AC} : Hattın yükü (MW), $\cos \varphi$: Hattın güç faktörü,

U : Hattın fazlar arası gerilimi (kV), ℓ : Hattın uzunluğu (km),

R_{AC} : Hattın bir fazının işletme sıcaklığındaki km başına AC direncidir (Ω/km).

Hesaplamalarda $\cos \varphi = 0.97$ olarak kabul edilmiştir. Ayrıca Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli arasındaki hat çift devre olduğu için eşitlik (6.13) ve (6.14)' te 2 çarpanı kullanılmıştır.

Doğru kayıp analizi yapmak için enerji bedelleri ve AC/DC hatların yükleri eşit ($P_{AC} = P_{DC}$) kabul edilmiştir [7]. Çizelge 6.4' e göre hazırlanan (6.10) ve (6.11) eşitlikleri burada da geçerlidir. AC kayıp maliyeti ise (6.16) eşitliği ile hesaplanır.

$$\text{AC KAYIP MALİYETİ} \left(\frac{\text{TL}}{\text{Yıl}} \right) = 8760 \text{ (h)} * \text{enerjibedelitek(enerjibedelicok)} \dots$$
$$\left(\frac{\text{TL}}{\text{kWh}} \right) * \text{TOPLAM DC KAYIPLAR (kW)} \quad (6.16)$$

6.4 Teorik Analizler

Bu bölümde AC ve DC enerji iletim sistemlerinin; 2011 yılı enerji tarifelerine göre bir yıllık kayıp maliyetleri, kurulum ve sistem ömrü boyunca oluşan kayıp maliyetlerinin hattın uzunluğuna göre değişimleri teorik hesaplamalar ile karşılaştırılacaktır. Ayrıca DC enerji iletim sistemine geçilmesiyle düşen sistem kayıplarından doğan kazancın (mevcut AC sisteme göre), kaç yılda DC sistemin kurulum maliyetini karşılayacağı ortaya konacaktır.

6.4.1 AC ve DC Sistemin Kayıp Maliyetlerinin Karşılaştırılması

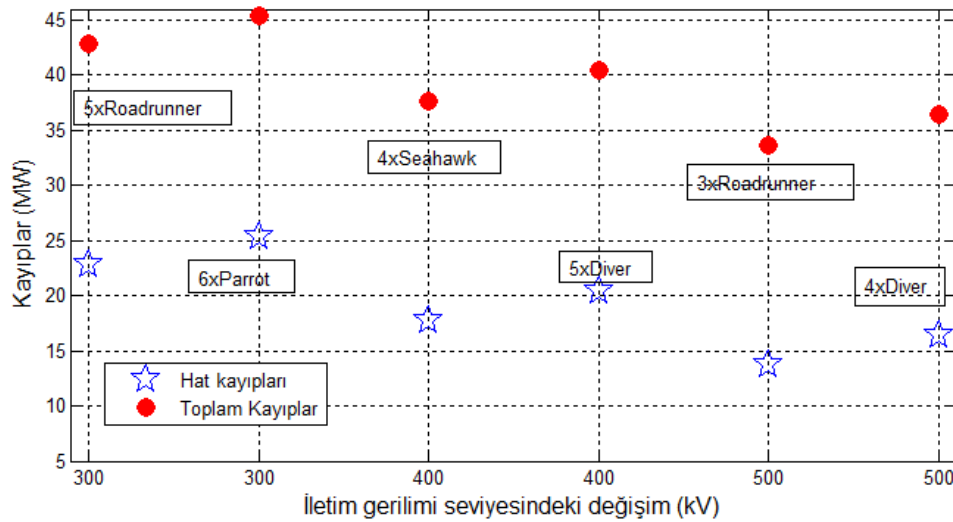
Yapılan kayıp maliyeti karşılaştırmasında daha önceden de bahsedildiği gibi 2011 yılı enerji tarifeleri kullanılmaktadır. Seçilen Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli arasındaki hattın; mesken, sanayi akçak gerilim ve sanayi orta gerilim yüklerini beslediği kabul edilmiş ve bu tarifeler dikkate alınmıştır. Sanayi kuruluşlarının kendi içinde yarı yarıya dağıldığı varsayılmıştır. Meskenlerin yüzdesi %0-100 arasında, diğer kuruluşların yüzdesi ile ters orantılı değiştirilerek farklı tüketici dağılımına göre kayıp maliyetleri elde edilmiştir.

Atatürk Barajı-Temelli arasına kurulacak DC hattın iletken tipini belirlemek için ortalama atmosfer koşulları olan parametreler (ortam sıcaklığı 20°C, iletkene dik açı ile gelen rüzgar hızı 0.6096 m/s, yayılım katsayısı 0.5, emilim katsayısı 0.5, açık hava (güneş ısı 1033 W/m² olan)) kullanılmıştır. Bu parametrelerin mevcut AC hat için de geçerli olduğu varsayılmıştır. Ayrıca her iki iletkeninde (AC/DC) işletme sıcaklığının 75°C olduğu kabul edilmiştir. Bölüm 6.1’ de bahsedildiği gibi AC hattın ve DC alternatifinin “Isıl Güç Limiti” eşit kabul edilmiştir. Bu kabullere ve Bölüm 6.1’ de anlatılan hesaplamalara göre Çizelge 6.2 oluşturulmuştur ve kolay okunma açısından burada tekrar verilmiştir.

Çizelge 6.2 Mevcut AC iletim hattının ısıl güç limitine göre DC alternatif için seçilen farklı düzenlerdeki iletken tipleri

İletim Gerilimi Seviyesi (kV)	Demet İletken Sayısı	Hesaplanan Akım Taşıma Kapasitesi (A)	İletken Tipi/Kesiti (AWG)	20°C' deki DC Direnç (Ω/km)	75°C' deki Kutup Başına DC Direnç (Ω/km)
300	5	1573,05	Roadrunner/2057,5	0,027331	0,006677783
300	6	1310,875	Parrot/1510,5	0,036419	0,007415212
400	4	1474,734375	Seahawk/1869	0,030152	0,009208798
400	5	1179,7875	Diver/1272	0,043637	0,010661828
500	3	1573,05	Roadrunner/2057,5	0,027331	0,011129639
500	4	1179,7875	Diver/1272	0,043637	0,013327285

1000 MW' lık bir çift kutuplu HVDC sistemi için Çizelge 6.2' deki iletken tipleri kullanıldığında oluşan kayıplar Şekil 6.1' de gösterilmiştir. Burada dönüştürücü merkez kayıpları hattın anma gücünün %1' i alınmıştır.



Şekil 6.1 1000 MW' lık HVDC sistemi için farklı gerilim seviyelerindeki kayıplar

Şekil 6.1' de görüldüğü gibi en düşük kayıp "ROADRUNNER" iletkeninin üçlü demet halinde ve 500 kV DC gerilimde kullanılmasıyla elde edilmektedir. Ancak bu iletkenin kesiti büyük olduğu için, kurulum maliyeti ciddi bir şekilde artacaktır. Dolayısıyla dörtlü demet halinde ve

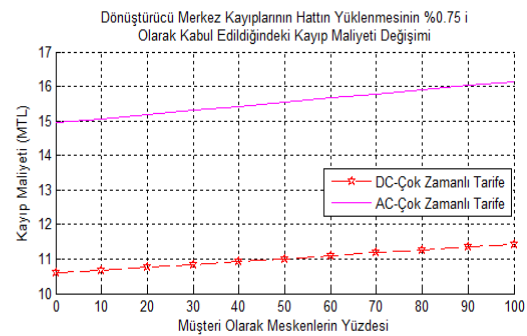
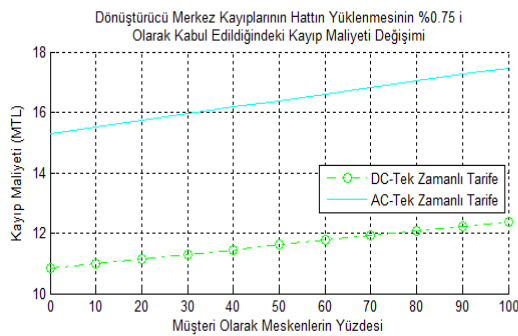
500 kV DC gerilimdeki “DIVER” iletkenin kullanılması uygun görülmüştür. Seçilen DC hattın parametrelerini tekrar vermek gerekirse:

Hat tipi:	Çift kutuplu HVDC hattı
DC gerilim seviyesi:	± 500 kV
İletken tipi:	4 x Diver
Bir kutbun 75°C’ deki direnci:	0,013327285 Ω/km dir.

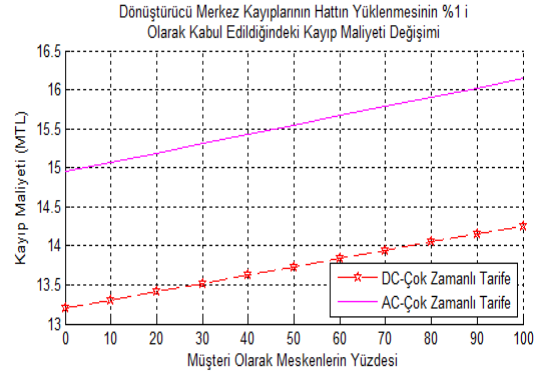
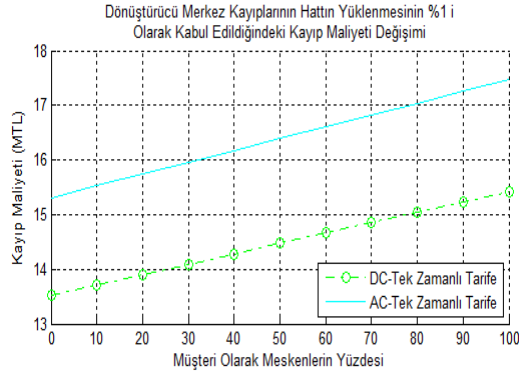
Mevcut Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli arasındaki AC hattın parametreleri ise:

Devre tipi:	Çift devre
İletim gerilimi seviyesi:	380 kV
İletken tipi:	3 x Pheasant
Bir fazın 75°C’ deki direnci:	0,018701667 Ω/km dir.

Burada yapılan hesaplamalarda, Bölüm 6.3’ teki AC ve DC sistem kayıplarını bulmak için verilen eşitlikler kullanılmıştır. Her iki hattın yıllık ortalama yüklenmesinin, ölçüm verilerinden elde edilen ortalama yüklenme değeri olan 321,7488032 MW olduğu kabul edilerek, 2011 yılı enerji tarifelerine göre bir yıllık kayıp maliyetleri Şekil 6.2’ de verilmiştir. Hesaplamalarda, AC sistemdeki seri kompanzasyon elemanlarının kayıp maliyetleri dikkate alınmamıştır. Burada dört farklı kayıp maliyeti şeklinin elde edilmesinin nedeni, her bir şeklindeki yüklenmeye göre alınan dönüştürücü merkez kayıp oranlarının ve enerji tarifelerinin (tek/çok zamanlı) değişmesidir. Bu değişim bütün şekillerde belirtilmiştir. Bu dört şekilde AC ve DC hat kayıpları değişmemektedir. Tek zamanlı ve çok zamanlı enerji tarifeleri ayrı ayrı incelenmiştir. Burada görüldüğü gibi sanayi kuruluşlarının oranı azaldığında, kayıp maliyeti artmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 6.2 321,7488032 MW'lık ortalama yüklenmeye göre AC ve DC kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.2' de dönüştürücü merkez kayıpları yüklenmenin %0.75' i ile %1' i ve şalt tesisi kayıpları yüklenmenin %0.5' i kabul edilmiştir [7, 8]. Eğer iletim hatlarında kayıplar oluşmasaydı 2011 yılında, mevcut AC hattın 14,95 - 17,47 milyon TL arasında ve DC alternatifinden 10,59 - 15,43 milyon TL arasında daha fazla gelir elde edilebileceği görülmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi teorik hesaplamalara göre DC sistemin kayıpları çok daha azdır. Dolayısıyla DC sistemin tercih edilmesi çok daha avantajlı olacaktır. Bu grafiklere kurulum maliyetlerinin etkisi yansıtılmamıştır. Ancak teorik olarak DC kayıplar çok daha düşük olduğu için, uzun vadede (10-20 yıl) HVDC sisteminin daha avantajlı olacağı açıkça görülmektedir.

6.4.2 AC ve DC Sistemin Toplam Maliyetlerinin Hattın Uzunluğuna göre Değişimi

Bu bölümde mevcut AC hattın ve DC alternatifinin, kurulum ve kayıp maliyetlerinin toplamı karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmada kullanılan eşitlikler, Hauth vd. tarafından [7] de verilmiştir. Daha önce yapılan; atmosferik koşulların, iki hattın ısı güç limitlerinin ve yüklenmelerinin (toplam tüketilen enerjilerinin) eşit olması gibi kabuller bu karşılaştırma için de geçerlidir. Dolayısıyla bu karşılaştırmada da DC alternatif için, ± 500 kV DC iletim gerilimi ve "4 x Diver" iletkeni kullanılmıştır. Ayrıca mevcut Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli arasındaki AC hattın ve DC alternatifinin kurulu gücü 1000 MW olarak kabul edilmiş ve kurulum maliyetleri bu kabule göre hesaplanmıştır. Kayıp maliyetlerinin şimdiki değerinin hesaplanmasında, Eşit Ödemeli Seri-Bugünkü Değer Faktörü (BDF) kullanılmaktadır. Sistemin ömrü 30 yıl alınmış ve %8' lik geri dönüş oranı kabul edilmiştir [7]. Burada geri dönüş oranı, yapılan yatırımdan beklenen kazanç oranı ile enflasyon oranı arasındaki farktır.

$$BDF = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \quad (6.17)$$

Burada; i, geri dönüş oranı ve N, ise sistemin ömrüdür. Geri dönüş oranı %8 ve sistem ömrü 30 yıl alındığında, BDF 11.26 TL/(TL/yıl) çıkmaktadır [7].

Kayıp maliyetin hesaplanmasında kullanılan enerji bedeli Çizelge 6.4' ten tek zamanlı, sanayi orta ve alçak gerilim tarifelerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Yani,

ENERJİ BEDELİ = (18,434+19,522)/2*10 = 189,78 TL/MWH' dir.

$$\begin{aligned} KAYIPLARIN \text{ MALİYETİ } (TL/W) = & BDF \left(\frac{TL}{TL/YIL} \right) * 8760 (H/YIL) * ... \\ & ENERJİ BEDELİ (TL/MWH) * ... \\ & KAYIP FAKTÖRÜ * 10^{-6} (MW/W) \end{aligned} \quad (6.18)$$

Burada kayıp faktörü, bir yıllık ortalama kayıpların puant yüklenmedeki kayıplara oranı olarak tanımlanmıştır [7]. Elimizdeki AC sistemin ölçüm verileri incelendiğinde kayıp faktörü 0,256752238 çıkmaktadır. Buna göre,

$$KAYIPLARIN \text{ MALİYETİ } = 4,807 \text{ TL/W}$$

olarak elde edilir.

DC ve AC sistemin hat kayıplarının ve dönüştürücü merkez (veya şalt tesisi) kayıplarının hesaplanmasında kullanılan (6.7)-(6.9) ve (6.13)-(6.15) eşitlikleri, bu bölüm için de geçerlidir. Hesaplamalarda, dönüştürücü merkez kayıplarının yüklenmenin %1' i ve şalt tesisi kayıplarının ise yüklenmenin %0.5' i olduğu kabul edilmiştir [7, 8]. Ayrıca, yapılan hesaplamalarda AC sistemdeki seri kompanzasyon elemanlarının kurulum ve kayıp maliyetleri ihmal edilmiştir.

DC ve AC sistemin kurulum maliyetleri ile 30 yıllık sistem kayıplarının bugünkü değeri (6.19) ve (6.20) eşitlikleri ile hesaplanır. Bu eşitliklerde yük, hattan akan aktif güç anlamındadır.

$$DC \text{ MALİYET } (TL) = 2 * DÖNÜŞTÜRÜCÜ \text{ MERKEZ MALİYETİ } \left(\frac{TL}{kW} \right) * ...$$

$$ANMA \text{ GÜCÜ } (MW) * 1000 \left(\frac{kW}{MW} \right) + DC \text{ HAT MALİYETİ } \left(\frac{TL}{km} \right) * ...$$

$$\begin{aligned}
& \text{HATTIN UZUNLUĞU (km)} + \text{KAYIPLARIN MALİYETİ} \left(\frac{\text{TL}}{\text{W}} \right) * [\dots \\
& 2 * \% \text{ DÖNÜŞTÜRÜCÜ MERKEZ KAYIPLARI} * \text{YÜK (MW)} + \dots \\
& \text{DC HAT KAYIPLARI} \left(\frac{\text{MW}}{\text{km}} \right) * \text{HATTIN UZUNLUĞU (km)}] * \dots \\
& 10^6 \left(\frac{W}{MW} \right) \tag{6.19}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{AC MALİYET (TL)} = 3 * \text{ŞALT TESİSİ MALİYETİ} \left(\frac{\text{TL}}{\text{kW}} \right) * \text{ANMA GÜCÜ (MW)} * \dots \\
& 1000 \left(\frac{\text{kW}}{\text{MW}} \right) + \text{AC HAT MALİYETİ} \left(\frac{\text{TL}}{\text{km}} \right) * \dots \\
& \text{HATTIN UZUNLUĞU (km)} + \text{KAYIPLARIN MALİYETİ} \left(\frac{\text{TL}}{\text{W}} \right) * [\dots \\
& 3 * \% \text{ ŞALT TESİSİ KAYIPLARI} * \text{YÜK (MW)} + \dots \\
& \text{AC HAT KAYIPLARI} \left(\frac{\text{MW}}{\text{km}} \right) * \text{HATTIN UZUNLUĞU (km)}] * \dots \\
& 10^6 \left(\frac{W}{MW} \right) \tag{6.20}
\end{aligned}$$

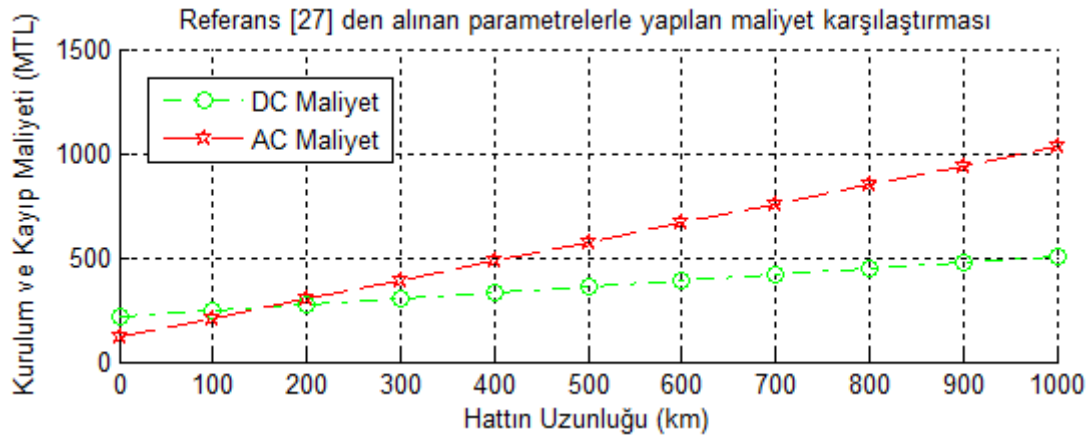
Kurulu gücü 1000 MW olan AC sistemin ve DC sistemin, kurulum ve kayıp maliyetleri, 1000 MW' lık yüklenme durumu için karşılaştırılmıştır (Şekil 6.3). Bu karşılaştırmada, Meah ve Ula tarafından [27] de verilen AC/DC birim fiyatlar kullanılmıştır. Ancak, bu referansta 380 kV' luk çift devre AC hat için kilometre başına bir fiyat verilmemiştir. Bu referanstaki fiyatlar tek devre hatlar için verilmiştir. Referans [27] de, AC hattın birim fiyatı 955 \$/kV-mil olarak verilmiştir. Çift devre hattın maliyetinin, tek devre hattın maliyetine göre 1,7 kat artacağı kabul edilmiştir. Buradan çift devre 380 kV' luk AC hattın TL/km maliyeti hesaplanmıştır.

Karşılaştırma hat uzunluğunun değişimine göre yapılmaktadır. Maliyet değerleri dolar bazında verildiğinden TL karşılıklarının hesaplanmasında dolar kuru olarak 1 \$ = 1,5195 TL alınmıştır. Referans [27] den alınan alt birim maliyetler, Çizelge 6.5' te verilmiştir.

Çizelge 6.5 AC ve DC sistemin kurulum maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan alt birim maliyetler

Kaynak	Yayım yılı	Dönüştürücü merkezin maliyetleri (TL/kW/Terminal)	İletim Hattının Maliyeti (TL/km)	Şalt tesisinin maliyetleri (TL/kW/Şalt)	İletim Hattının Maliyeti (TL/km)
		DC maliyetler		AC maliyetler	
[27]	2007	61,16	162904,75	15,45	582613,51

Çizelge 6.4’ teki alt birim maliyetler, eşitlik (6.19) ve (6.20)’ de yerine konularak hat uzunluğuna bağlı olarak elde edilen AC ve DC maliyetler Şekil 6.3’ te karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.3 Alt birim maliyetler dikkate alınarak AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması

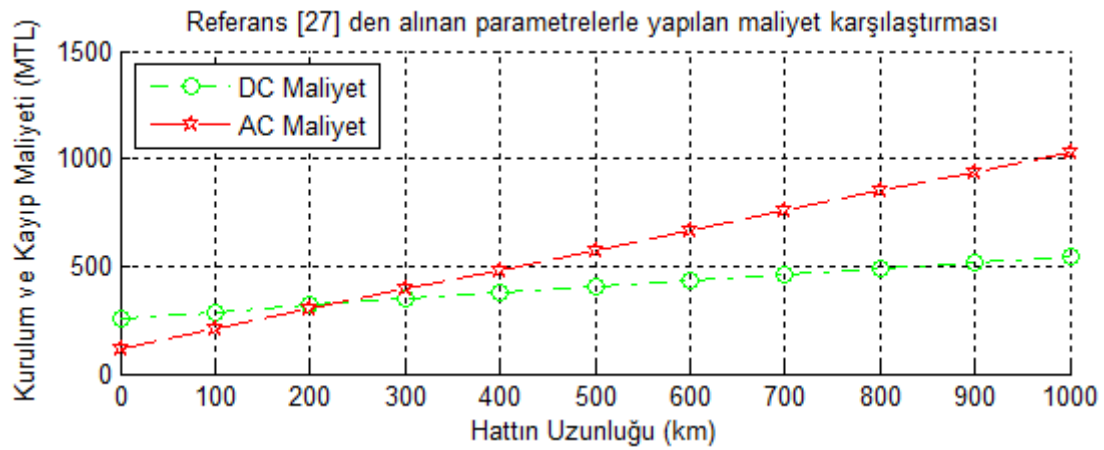
Şekil 6.3’ te yaklaşık 150 km’ den uzun hatlarda DC enerji iletim sisteminin AC alternatifine göre daha ekonomik olduğu görülmektedir. Şekilden Atatürk Barajı-Temelli arasına kurulacak bir DC hattın (615 km) kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetinin bugünkü değerinin 400 MTL olduğu görülmektedir.

Benzer şekilde, Referans [27] den alınan üst birim maliyetler dikkate alınarak, Çizelge 6.6 oluşturulmuştur.

Çizelge 6.6 AC ve DC sistemin kurulum maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan üst birim maliyetler

Kaynak	Yayın yılı	Dönüştürücü merkezin maliyetleri (TL/kW/Terminal)	İletim Hattının Maliyeti (TL/km)	Şalt tesisinin maliyetleri (TL/kW/Şalt)	İletim Hattının Maliyeti (TL/km)
		DC maliyetler		AC maliyetler	
[27]	2007	81,26	162904,75	15,45	582613,51

Çizelge 6.6’ daki üst birim maliyetler, eşitlik (6.19) ve (6.20)’ de yerine konularak hat uzunluğuna bağlı olarak elde edilen AC ve DC maliyetler Şekil 6.4’ te verilmiştir.



Şekil 6.4 Üst birim maliyetler dikkate alınarak AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.4’ te yaklaşık 220 km’ den uzun hatlarda DC enerji iletim sisteminin AC alternatifine göre daha ekonomik olduğu görülmektedir. Şekilden Atatürk Barajı-Temelli arasında kurulacak bir DC hattın (615 km) kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetinin bugünkü değerinin 450 MTL olduğu görülmektedir. Şekil 6.4’ teki başabaş mesafesinin, Şekil 6.3’ e göre daha büyük çıkmasının nedeni, Şekil 6.4’ te kullanılan dönüştürücü merkez birim maliyetlerinin daha büyük olmasıdır.

6.4.3 DC Sistemin Kurulum Maliyetinin Geri Kazanım Süresi

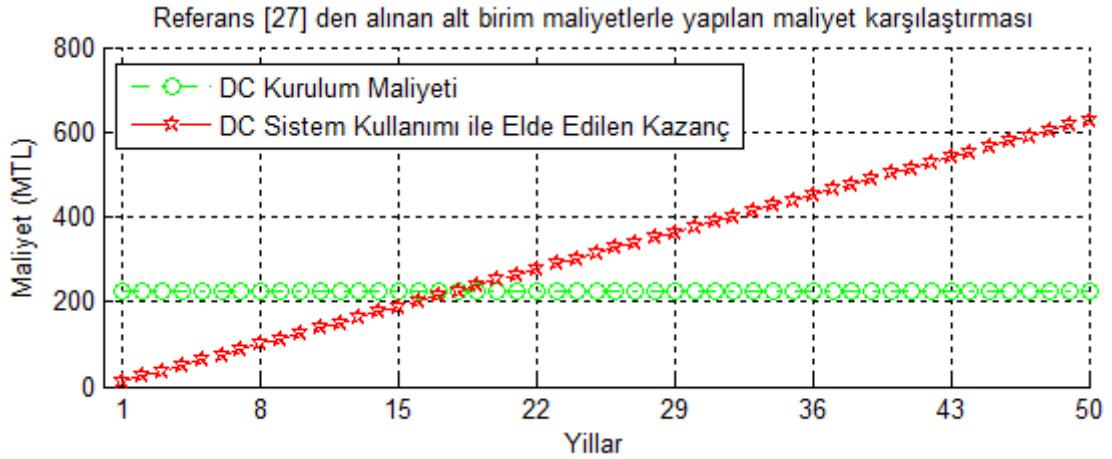
Yapılan analizler göstermiştir ki HVDC sisteminin kayıpları, mevcut AC sisteme göre daha düşük olmaktadır. DC sisteme geçilmesi halinde, kayıplar arasındaki bu fark “ENERJİ BEDELİ” üzerinden yıllık kazanç sağlayacaktır. Bu kazancı eşitlik (6.21) ile bulabiliriz.

$$\text{KAZANÇ} \left(\frac{\text{TL}}{\text{YIL}} \right) = (\text{TOPLAM AC KAYIPLAR (MW)} - \text{TOPLAM DC KAYIPLAR (MW)}) * \dots$$

$$\text{ENERJİ BEDELİ (TL/MWH)} * 8760 \text{ (H/YIL)} \quad (6.21)$$

Eşitlik (6.21)' deki, "TOPLAM AC KAYIPLAR" eşitlik (6.15) ve "TOPLAM DC KAYIPLAR" eşitlik (6.9) ile hesaplanır. Eşitlik (6.21) ile hesaplanan "KAZANÇ" değerinin her yıl sabit kaldığı kabul edilmiştir.

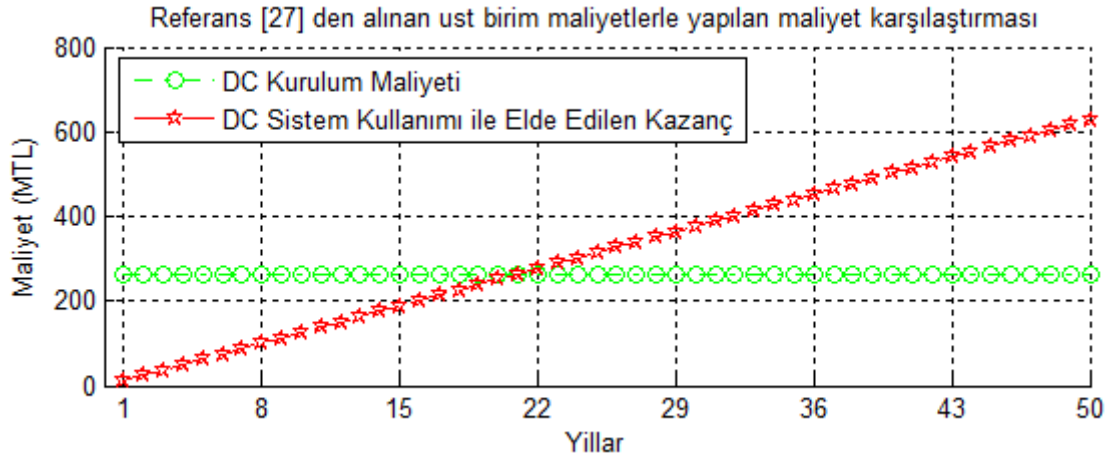
HVDC sisteminin kurulum maliyeti; Çizelge 6.5' teki alt kurulum, Çizelge 6.6' daki üst kurulum maliyetlerine ve eşitlik (6.6)' ya göre hesaplanmıştır. Eşitlik (6.6)' da dolar olarak verilen değerler, dolar kuru olarak 1 \$ = 1,5195 TL kullanılıp TL' ye dönüştürülerek grafiklere yansıtılmıştır. Burada sistemin anma gücü 1000 MW alınmıştır. Yüklenme ise ölçüm verilerinden elde edilen en yüksek değer olan 644,8 MW olarak alınmıştır. Burada mevcut AC hat yerine çift kutuplu HVDC alternatifi kullanılması halinde, azalan sistem kayıplarıyla ortaya çıkan mali kazancın HVDC sisteminin kurulum maliyetini kaç yılda geri ödeyeceği incelenecektir. Bu incelemede sistem ömrü 50 yıl olarak kabul edilmiştir. Alt birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum maliyeti ile DC sistemin kullanımı sayesinde elde edilen kazancın karşılaştırılması Şekil 6.5' te verilmiştir.



Şekil 6.5 Alt birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum maliyeti ile DC sistemin kullanımı sayesinde elde edilen kazancın karşılaştırılması

Hesaplamalardan, DC hat kullanımı durumunda yıllık kazanç 12,6 MTL çıkmaktadır. Sistem ömrü boyunca her yıl kazancın sabit kaldığı kabul edilmiştir. DC sistemin kurulum maliyeti ise 222,5 MTL' dir. Dolayısıyla hesaplanan yıllık kazançla, Türkiye' ye kurulacak bir HVDC ile enerji iletimi sistemi, kurulum maliyetini 17,7 yılda çıkarmaktadır.

Üst birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum maliyeti ile DC sistemin kullanımı sayesinde elde edilen kazancın karşılaştırılması Şekil 6.6' da verilmiştir.



Şekil 6.6 Üst birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum maliyeti ile DC sistemin kullanımı sayesinde elde edilen kazancın karşılaştırılması

Hesaplamalardan, DC hat kullanımı durumunda yıllık kazanç 12,6 MTL çıkmaktadır. Sistem ömrü boyunca her yıl kazancın sabit kaldığı kabul edilmiştir. DC sistemin kurulum maliyeti ise 262,7 MTL' dir. Dolayısıyla hesaplanan yıllık kazançla, Türkiye' ye kurulacak bir HVDC ile enerji iletimi sistemi, kurulum maliyetini yaklaşık 21 yılda çıkarmaktadır.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6' daki karşılaştırmalarda sistemin ömrü hayli iyimser seçilmiştir. Genellikle sistem ömrü 30 yıl alınmaktadır. Ancak, sistem ömrü 30 yıl kabul edilse bile, her iki şekilde de görüldüğü gibi HVDC ile enerji iletimi sistemindeki kayıpların mevcut AC hatta göre daha düşük olması nedeniyle 30 yıldan daha kısa sürede DC iletim hattının kurulum maliyeti karşılanmaktadır. Sistemin ömrü 30 yıl olarak düşünüldüğünde geriye, sırasıyla 12,3 ve 9 yıllık bir karlılık süresi kalmaktadır.

Mevcut Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli arasındaki AC sistemin ölçüm verileri incelendiğinde, hattın ortalama yüklenmesinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Böyle düşük yüklü bir durumda hattın kurulum maliyetinin Türkiye koşulları için karşılanıp karşılanamayacağı Bölüm 6.5.3' te açıklanmıştır.

6.5 Ölçüm Verileri ile Yapılan Analizler

Bu bölümde AC ve DC enerji iletim sistemlerinin; 2011 yılı enerji tarifelerine göre bir yıllık kayıp maliyetleri, kurulum ve sistem ömrü boyunca oluşan kayıp maliyetlerinin hattın

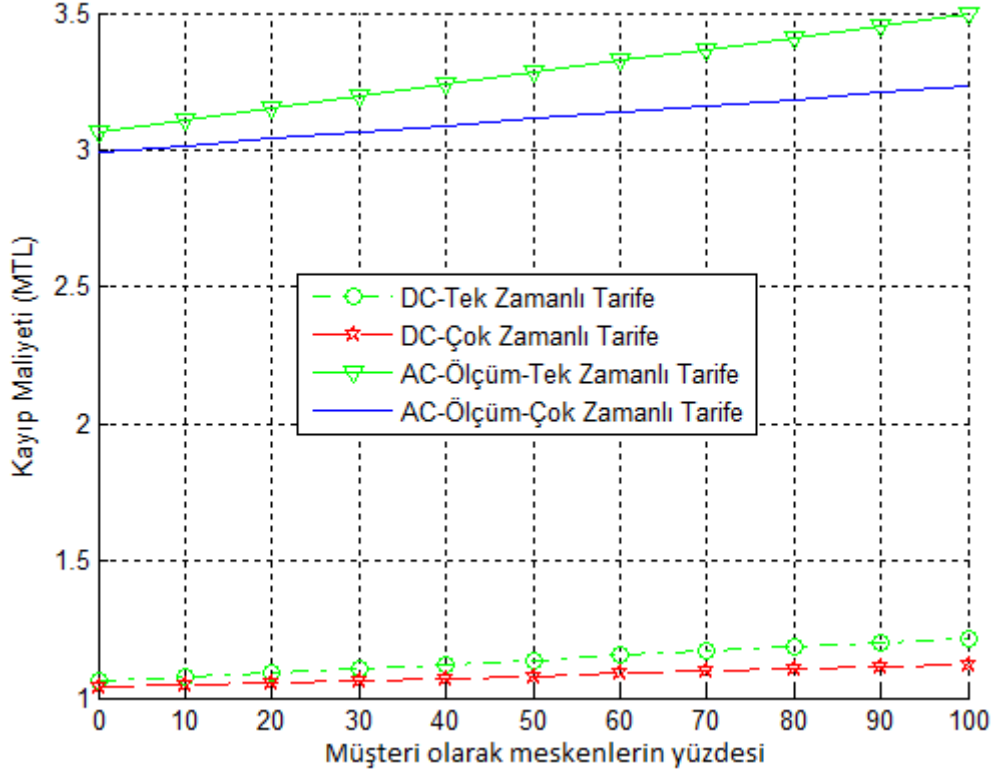
uzunluğuna göre değişimleri, mevcut AC enerji iletim sisteminden alınan ölçüm verilerine göre karşılaştırılacaktır. Ayrıca DC enerji iletim sistemine geçilmesiyle düşen sistem kayıplarından doğan kazancın (mevcut AC sisteme göre), kaç yılda DC sistemin kurulum maliyetini karşılayacağı ortaya konacaktır.

6.5.1 AC ve DC Sistemin Kayıp Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Teorik olarak yapılan hesaplamalarda DC alternatifin sistem kayıpları, mevcut AC hatta göre daha düşük çıkmaktadır. Dolayısıyla AC hattaki gerçek zamanlı ölçüm verilerine dayalı kayıp analizi yapıp, DC alternatifi ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 6.4.1' de anlatılan kabuller ve hat parametreleri burada da geçerli kabul edilmiştir.

Güvenlik sebebiyle, ölçüm verileri ile ilgili herhangi bir ölçüm değeri paylaşılamamaktadır. Ancak şunlar verilebilir; elimizdeki bir yıllık ölçüm verilerinden, kullanılabilir yaklaşık 138 günlük (3302,167 saatlik) lm verisi çıkmıştır. Bu verilerin Atatürk Barağı-Yeşilhisar ve Yeşilhisar-Temelli arasındaki 3302,167 saatlik tüketilen enerjileri hesaplanmış ve bu iki değer toplanarak toplam tüketilen enerji (AC hattın yüklenmesi) 1.062.468.173 kWh olarak elde edilmiştir. Verilerin toplam enerji tüketiminden yola çıkarak, 3302,167 saat boyunca AC hattın ortalama yüklenmesi 321,7488032 MW olarak hesaplanmış ve DC alternatifin yüklenmesi için bu aktif güç değer kullanılmıştır. HVDC enerji iletimi hattının da 3302,167 saat boyunca işletildiği kabul edilmiştir. Böylece iki sistemin toplam tüketilen enerjisi, yani yükü eşit olacaktır.

Burada yapılan hesaplamalarda, Bölüm 6.3' teki AC ve DC sistem kayıplarını bulmak için verilen eşitlikler kullanılmıştır. Ancak, lm verilerinden elde edilen kayıplar sadece AC hattın kayıplarını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla şalt tesisi kayıpları dikkate alınmamıştır. Buna bağlı olarak DC alternatifteki dönüştürücü merkez kayıplarıda dikkate alınmayarak, AC ve DC sistemlerin ölçüm süresi boyunca sadece hat kayıplarından oluşan kayıp maliyetleri şekil 6.7' de karşılaştırılmıştır. Burada; tek zamanlı ve çok zamanlı enerji tarifeleri ayrı ayrı incelenmiştir. Görüldüğü gibi sanayi kuruluşlarının oranı azaldığında, kayıp maliyeti artmaktadır.



Şekil 6.7 Ölçüm verilerine dayalı AC hat ile DC alternatifinin kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.7’ de görüldüğü gibi mevcut AC sistemin hat kayıplarının maliyeti, DC sistemin hat kayıplarına göre yaklaşık 3 kat daha büyük çıkmaktadır. Çünkü DC alternatifte dörtlü demet iletken ve ± 500 kV’ luk DC hat gerilimi kullanılmaktadır. Dolayısıyla ülkemizde yeni kurulacak uzun, yüksek gerilimli iletim hatları için HVDC seçeneği de düşünülmelidir. Böylece iletim sisteminin verimliliği artar.

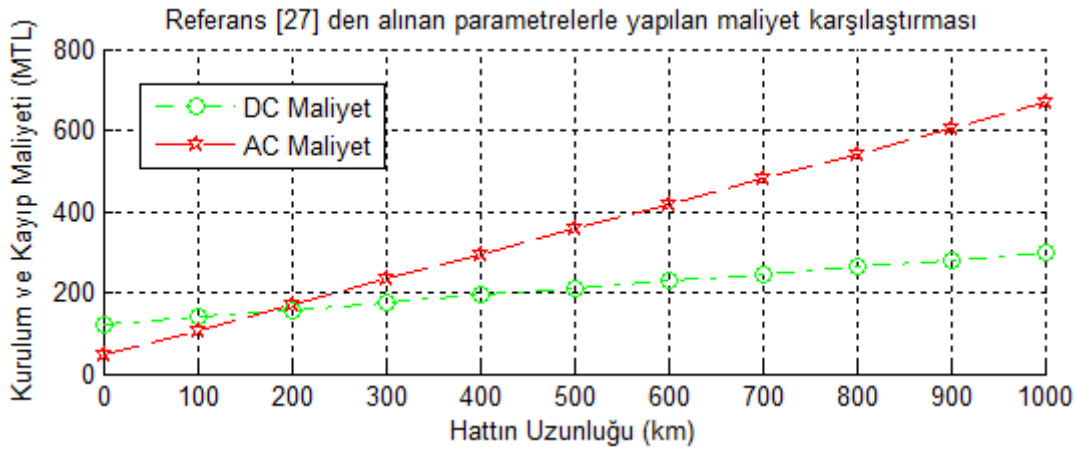
6.5.2 AC ve DC Sistemin Toplam Maliyetlerinin Hattın Uzunluğuna göre Değişimi

Bölüm 6.4.2 ve Bölüm 6.4.3’ te teorik olarak yapılan hesaplamalarda DC alternatifin makul bir süre içerisinde karlılık durumuna geçebileceği gösterilmiştir. Ancak gerçekçi bir analiz, gerçek zamanda ölçülmüş güç verilerine dayanmalıdır. Belirtilen hattan senkronize olarak ölçülen güç değerlerine göre yıllık ortalama aktif güç (yük) değeri hesaplanıp, hattın bir yıl boyunca (8760 saat) ortalama olarak bu güç (321,7488032 MW) ile yüklendiği varsayılmıştır. Eşitlik (6.19) ve (6.20)’ de yük yerine kullanılan değer bu şekilde elde edilmiştir. Yani hem AC hattın hem de DC alternatiflerinin yüklenmesi birbirine eşittir. Ölçüm verilerinden, şalt tesisi kayıpları elde edilemediği için, AC/DC maliyet karşılaştırması sadece hat kayıplarına göre yapılmıştır. Dolayısıyla eşitlik (6.19) ve (6.20)’ deki, dönüştürücü merkez ve şalt tesisi

kayıplarının hesaplandığı kısımlar dikkate alınmamıştır. Bu maliyet karşılaştırmasında AC sistemdeki seri kompanzasyon merkezlerinin kurulum maliyetleri dikkate alınmamıştır.

Mevcut AC sistemin ölçüm verilerinden 3302,167 saatlik kayıp enerji elde edilmektedir. Kayıp enerji, verilen zamana bölündüğünde ortaya çıkan değer MW cinsinden yıllık ortalama kayıp güç olarak alınmıştır. Bu değer hattın uzunluğu olan 615 km' ye bölündüğünde ise MW/km cinsinden yıllık ortalama kayıp güç elde edilir. Bu sayede, AC hattın kilometre başına yıllık ortalama kayıp gücü bilindiğinden, hattın değişen uzunluğuna göre toplam hat kayıpları hesaplanabilir.

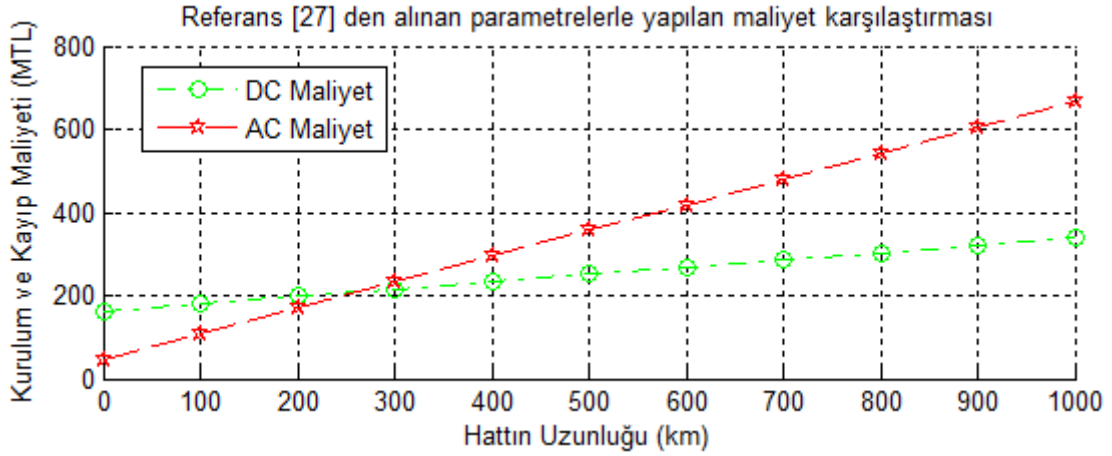
Çizelge 6.5' teki alt birim maliyetler dikkate alınarak yapılan maliyet karşılaştırmasının sonuçları Şekil 6.8' de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Alt birim maliyetlere ve AC ölçüm verilerine göre, AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.8' de yaklaşık 160 km' den uzun hatlarda DC enerji iletim sistemi AC alternatifine göre ekonomik hale geçmektedir. Bu şekilden de anlaşıldığı gibi Atatürk Barajı-Temelli arasına kurulacak bir DC hattın (615 km) kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetinin bugünkü değeri 235 MTL' dir.

Yukarıda belirtilen koşullara göre, Çizelge 6.6' daki birim maliyetler dikkate alınarak yapılan maliyet karşılaştırmasının sonuçları ise Şekil 6.9' da gösterilmiştir.



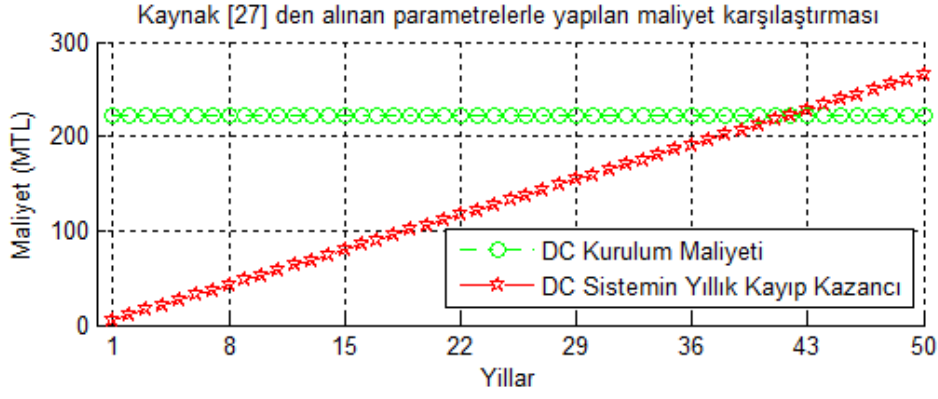
Şekil 6.9 Üst birim maliyetlere ve AC ölçüm verilerine göre, AC/DC sistemlerin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.9’ da yaklaşık 250 km’ den uzun hatlarda DC enerji iletim sistemi AC alternatifine göre ekonomik hale geçmektedir. Bu şekilden de anlaşıldığı gibi Atatürk Barajı-Temelli arasına kurulacak bir DC hattın (615 km) kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetinin bugünkü değeri 275 MTL’ dir. Şekil 6.9’ daki başabaş mesafenin, Şekil 6.8’ e göre daha büyük çıkmasının nedeni ise Şekil 6.9’ da kullanılan dönüştürücü merkez birim maliyetlerinin daha büyük olmasıdır.

6.5.3 DC Sistemin Kurulum Maliyetinin Geri Kazanım Süresi

Bu bölümde mevcut AC hat yerine, çift kutuplu HVDC enerji iletim sisteminin kullanılması halinde, azalan sistem kayıplarıyla ortaya çıkan kazancın (eşitlik (6.21)) HVDC enerji iletim sisteminin toplam maliyetini kaç yılda geri ödeyeceği ölçüm verilerine göre incelenecektir. Ancak burada eşitlik (6.21)’ de geçen toplam kayıplar yerine sadece hat kayıpları dikkate alınmaktadır. HVDC sisteminin kurulum maliyeti; Çizelge 6.5’ teki alt kurulum, Çizelge 6.6’ daki üst kurulum maliyetlerine ve eşitlik (6.6)’ ya göre hesaplanmıştır. Ancak eşitlik (6.6)’ daki dolar değeri, dolar kuru olarak $1 \$ = 1,5195 \text{ TL}$ kullanılıp TL’ ye dönüştürülerek grafiklere yansıtılmıştır. Burada sistemin anma gücünün 1000 MW ve yüklenmenin AC ölçüm verilerinden hesaplanan ortalama aktif güç olduğu durum incelenmiştir. Bu incelemede sistemin ömrü 50 yıl kabul edilmiştir.

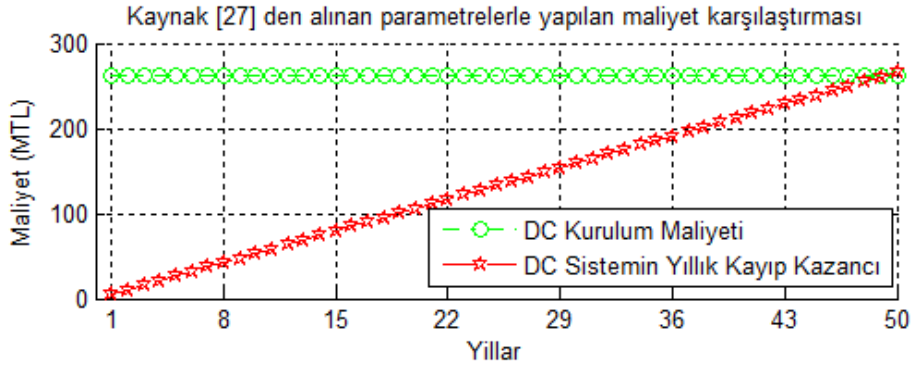
Ölçüm verilerine ve alt birim maliyetlere (Çizelge 6.5’ e) göre DC sistemin kurulum ve 50 yıllık kayıp maliyeti dikkate alınarak DC sistemin kendini geri ödeme süresi Şekil 6.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.10 Ölçüm verilerine ve alt birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum ve 50 yıllık kayıp maliyeti dikkate alınarak DC sistemin kendini geri ödeme süresi

Yapılan hesaplamalarda kayıplara karşılık gelen yıllık kazanç 5,31 MTL çıkmaktadır. Sistem ömrü boyunca her yıl kazancın sabit kaldığı kabul edilmiştir. DC sistemin kurulum maliyeti ise 222,5 MTL' dir. Dolayısıyla hesaplanan yıllık kazançla, Türkiye' ye kurulacak bir HVDC ile enerji iletimi sistemi, kurulum maliyeti yaklaşık 41,9 yılda çıkarmaktadır.

Ölçüm verilerine ve üst birim maliyetlere (Çizelge 6.6' ya) göre DC sistemin kurulum ve 50 yıllık kayıp maliyeti dikkate alınarak DC sistemin kendini geri ödeme süresi Şekil 6.11' de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Ölçüm verilerine ve üst birim maliyetlere göre DC sistemin kurulum ve 50 yıllık kayıp maliyeti dikkate alınarak DC sistemin kendini geri ödeme süresi

Yapılan hesaplamalarda kayıplara karşılık gelen yıllık kazanç 5,31 MTL çıkmaktadır. Sistem ömrü boyunca her yıl kazancın sabit kaldığı kabul edilmiştir. DC sistemin kurulum maliyeti ise 262,7 MTL' dir. Dolayısıyla hesaplanan yıllık kazançla, Türkiye' ye kurulacak bir HVDC ile enerji iletimi sistemi, kurulum maliyeti yaklaşık 49,5 yılda çıkarmaktadır.

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11' deki karşılaştırmalarda sistemin ömrü hayli iyimser seçilmiştir. Genellikle sistem ömrü 30 yıl alınmaktadır. Eğer sistem ömrü 30 yıl kabul edilirse, ölçüm

verilerinden elde edilen düşük yüklenme koşullarında HVDC ile enerji iletimi sisteminin kurulum maliyetleri karşılanmamaktadır. Sistem ömrünü 50 yıl kabul ettiğimizde ise görüldüğü gibi yıllık kazanç, sırasıyla yaklaşık 42 ve 50 yılda kurulan sistemin maliyetini karşılamaktadır.

6.6 Özet

Bu bölümde Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli arasındaki AC enerji iletim hattının, çift kutuplu bir HVDC enerji iletim hattı ile değiştirilmesi sonucunda ortaya çıkan maliyetler gerek teorik olarak, gerekse ölçüm verilerine göre incelenmiştir. Mevcut AC hat ve yerine kurulacak DC alternatifin ısı güç limitleri eşit seçilmiş ve yapılan bu kabule göre DC hattın parametreleri belirlenmiştir. Mevcut AC hat parametrelerine, seçilen DC hattın parametrelerine ve 2011 yılı enerji tarifelerine göre; bir yıllık kayıp maliyetleri, kurulum ve sistem ömrü boyunca oluşan kayıp maliyetlerinin hattın uzunluğuna göre değişimleri gerek teorik olarak, gerekse ölçüm verilerine göre incelenmiştir. Ayrıca DC enerji iletim sistemine geçilmesiyle düşen sistem kayıplarından doğan kazancın (mevcut AC sisteme göre), kaç yılda DC sistemin kurulum maliyetini karşıladığı hem teorik hem de ölçüm verilerine göre incelenmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Türkiye’ deki bir mevcut AC iletim hattı yerine kurulacak bir HVDC ile enerji iletimi sisteminin maliyet analizi AC iletim sistemi ile karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. HVDC enerji iletim hattının Atatürk Barajı-Temelli arasına kurulacağı varsayılmıştır. Bu amaçla, Atatürk Barajı-Yeşilhisar-Temelli 380 kV’ luk şalt tesisleri arasındaki çift devre AC hatların bir yıl boyunca ölçülmüş güç akış verileri incelenmiştir. Bu incelemeye göre Atatürk Barajı-Temelli 380 kV’ luk şalt tesisleri arasına kurulacak HVDC enerji iletim hattının, mevcut AC hat ile karşılaştırmalı olarak maliyet analizi hem teorik olarak hem de ölçüm verileri baz alınarak yapılmıştır. Yapılan analizlerinden elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Mevcut AC sistemin ölçüm verileri incelenip, doğru bir analiz için eş zamanlı ölçüm verileri dikkate alınmış, bu şarta uymayan veriler dikkate alınmamıştır. Böylece toplamda 3302,167 saatlik (137 gün 14 saat 10 dakikalık) ölçüm verisi kullanılmıştır.
- Farklı DC gerilim seviyelerinde ve iletken düzenlerindeki HVDC ile enerji iletimi sistemlerinin 1000 MW’ lık yüklenme durumundaki kayıpları teorik olarak incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 6.1’ de verilmiştir. Bu şekilde, en düşük kayıp “ROADRUNNER” iletkeninin üçlü demet halinde ve 500 kV DC gerilimde kullanılmasıyla elde edilmektedir. Ancak bu iletkenin kesiti büyük olduğu için, kurulum maliyeti ciddi bir şekilde artacaktır. Buna göre, en düşük kayıplı ikinci iletken düzeni olan, 500 kV DC gerilim seviyesindeki “4xDiver” iletkeninin kullanımının uygun olduğu görülmüştür.
- 2011 yılı Türkiye enerji tarifelerinin tek ve çok zamanlı değerleri baz alınıp; mesken, sanayi alçak gerilim ve sanayi orta gerilim tüketicilerinin birbirlerine göre oranları

değiştirilerek hem AC sistemin hem de DC sistemin bir yıllık kayıp maliyetleri hesaplamalarla ortaya konmuştur. Bu şekilde HVDC sisteminin dönüştürücü merkez kayıpları hattın yüklenmesinin %0.75' i ile %1' i ve AC sistemin şalt tesisi kayıpları hattın yüklenmesinin %0.5' i olarak kabul edilmiştir [7, 8]. Hattın yükü ise ölçüm verilerinin ortalama yüklenme değeri olan 321,7488032 MW kabul edilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.2' de gösterilmiştir. Şekil 6.2 (a) ve (b)' de iki farklı HVDC dönüştürücü merkez kaybı olduğu kabulüne göre hesaplanan kayıp maliyetlerini göstermektedir. Şekil 6.2 (a)' da HVDC sisteminin bir yıllık kayıp maliyeti mevcut AC sisteme göre oldukça düşük çıkmaktadır. Çünkü burada dönüştürücü merkez kayıpları düşük kabul edilmiştir. Şekil 6.2 (b)' de kabul edilen dönüştürücü merkez kayıpları daha yüksek olduğundan iki sistemin yıllık kayıp maliyetleri birbirine yaklaşmıştır. Yüksek kayıplı durumda bile (Şekil 6.2 (b)), DC sistemin kayıp maliyeti AC sistemden düşük olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu şekilde tek zamanlı ve çok zamanlı tarifler ayrı ayrı incelenip şekil üzerinde belirtilmiştir.

- AC ve DC enerji iletimi sistemlerinin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin bugünkü değeri yüklenmenin 1000 MW olduğu durumda, değişen hat uzunluğuna göre Şekil 6.3 ve Şekil 6.4' te karşılaştırılmaktadır. Kurulum maliyetleri sırasıyla, Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5' ten alınmıştır. Bu karşılaştırmalar hesaplamalarla yapılmıştır. Her iki şekilde de DC hat AC alternatifine göre düşük hat uzunluklarında ekonomik hale geçmektedir. Bu şekillerde kullanılan kayıp maliyetler 2011 enerji tarifesine göre alınmıştır. Dolayısıyla Türkiye' de kurulacak 220 km' den uzun bir HVDC sisteminin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetleri, AC alternatifine göre oldukça avantajlıdır.
- HVDC sisteminin kayıpları, kullanılan iletken sayısının daha az olmasından dolayı AC alternatifine göre düşüktür. Dolayısıyla bu iki sistem arasında, DC sistemin düşük kayıplarından doğan kazancın yıllık parasal karşılığı hesaplanmış ve her yıl sabit olduğu kabul edilmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6' da, yıllık kayıp kazancının HVDC sisteminin kurulum maliyetlerini kaç yılda karşılayacağı gösterilmiştir. Şekil 6.5' teki eğrilerde HVDC sistemi kurulum maliyeti hesabında alt birim maliyetler kullanılırken, Şekil 6.6' daki eğrilerde HVDC kurulum maliyeti hesabında üst birim maliyetler kullanılmıştır. Hesaplamalar ortaya koymaktadır ki HVDC sisteminin kurulum maliyeti, sistem ömründen çok daha kısa sürede karşılanmaktadır. Yapılan hesaplamalarda, hat yüklenmesi için AC ölçüm verilerinden elde edilen en yüksek aktif güç değeri

kullanılmıştır. Dolayısıyla, ortalamanın üstündeki yüklenme koşullarında sistem kendini geri ödeyebilmektedir.

- Seçilen hatta ait ölçüm verilerinden AC hattın yüklenmesinin ortalama güç değeri elde edilmiş ve DC alternatifinde bu güç değeri ile yüklendiği kabul edilmiştir. DC alternatifin kayıpları bu yüklenmeye göre hesaplanmıştır (Şekil 6.7). Kullanılan veriler 3302,167 saatlik olduğundan, kayıp maliyetler de bu süre için karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, ölçüm verilerinden sadece hat kayıpları elde edilebildiğinden, her iki sistemin sadece hat kayıpları bakımından kayıp maliyetleri karşılaştırılmıştır. Beklenildiği gibi DC hattın kayıp maliyeti AC hatta göre oldukça düşüktür.
- AC ve DC enerji iletimi sistemlerinin kurulum ve 30 yıllık kayıp maliyetlerinin bugünkü değeri, ölçüm verilerinden elde edilen ortalama aktif güce ve değişen hat uzunluğuna göre Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’ da karşılaştırılmaktadır. Kurulum maliyetleri sırasıyla, Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6’ dan alınmıştır. Burada sistemlerin kayıp maliyetlerinin hesaplanmasında sadece hat kayıpları dikkate alınmıştır. Bu şekillerde hatlar düşük yüklenme koşullarında işletilmektedir. Buna rağmen, HVDC ile enerji iletimi seçeneği mevcut AC hatta göre oldukça ekonomiktir. Tabi burada dönüştürücü merkez ve şalt tesisinde oluşan kayıp maliyetler yansıtılmamıştır. Bu maliyetlerde düşünüldüğünde AC ile DC sistem arasındaki başabaş mesafe biraz daha ötelenecektir.
- Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’ de, yıllık kayıp kazancının HVDC sisteminin kurulum maliyetlerini ne kadar zamanda karşılayacağı ölçüm verileri kullanılarak gösterilmiştir. Buradaki kayıp maliyetleri hesaplanırken sadece hat kayıpları dikkate alınmıştır. Tüm sistem kayıpları dikkate alındığında, bu şekillerden elde edilen sonuçlara göre biraz daha kısa sürede Türkiye’ ye kurulacak HVDC ile enerji iletimi sisteminin kurulum maliyeti karşılanacaktır. Bu şekillerdeki hatların yükü ölçüm verilerinden elde edilmiştir. Zaten ölçülen ortalama yüklenme düşük olduğu için, DC hattın maliyeti oldukça uzun sürede karşılanmaktadır. Hattın daha büyük güçlerde yüklenmesi durumu Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’ da gösterilmektedir.
- Mevcut AC sistem yerine, HVDC enerji iletim sistemi kurulmasıyla sistem kayıpları düşecektir. Dolayısıyla eski AC kayıplar, yeni DC kayıplara göre daha büyük olacak ve yeni sistemin kurulmasıyla azalan sistem kayıpları ile bir kazanç elde edilecektir. İşte bu kazancın, düşük yüklenme koşullarında bile 50 yıla yakın bir sürede HVDC enerji iletim sisteminin kurulum maliyetlerini karşıladığı, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’ de yapılan

karşılaştırmada ortaya konmuştur. Burada 50 yıl boyunca enerji tarifi sabit kabul edilmiştir. Fakat gerçekte her geçen yıl enerji tarifi artacaktır. Dolayısıyla HVDC enerji iletimi sisteminin kurulum maliyeti (düşük yüklenmede bile) 50 yıldan çok daha kısa sürede karşılanacaktır. Türkiye'ye kurulacak HVDC enerji iletim sistemi, yıl boyunca ortalamanın üstündeki yüklenme koşulları (644,8 MW) ile işletildiğinde, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6' dan görüldüğü gibi en geç 21 yılda kurulum maliyetini geri ödemektedir ki burada da enerji tarifelerinin artacağı göz önünde bulundurulmamıştır. Her geçen yıl enerji tarifelerinin artacağı göz önünde bulundurulursa, bu yüklenme koşulları için çift kutuplu HVDC ile enerji iletimi sistemi son derece avantajlı olmaktadır.

- HVDC enerji iletim sisteminin daha avantajlı çıkmasının temelinde iki sebebi vardır. Birinci sebep, AC iletim hattı koridorunun aynı güç kapasitesinde ve güvenilirlikteki bir DC iletim hattına göre daha geniş olması ve inşaa masraflarının daha yüksek olmasıdır. İkinci sebep ise AC iletim hattının üç iletken, DC iletim hattının iki iletken meydana gelmesidir.
- İleride yapılacak çalışmalarda, Atatürk Barajı-Temelli arasına kurulacak HVDC enerji iletim hattında kullanılabilecek optimum DC gerilim değeri ve bu gerilime bağlı iletken tipi incelenebilir. Ayrıca güç elektroniği sistemlerinin maliyetlerindeki düşüş sayesinde yeni kurulacak bir HVDC sisteminin kurulum maliyeti daha ucuz olacağından, geri dönüşüm zamanı da daha kısa olacaktır. Benzer şekilde enerji fiyatlarında meydana gelecek bir artışta HVDC kurulumunu destekleyecektir. Zaten HVDC ile enerji iletimi belli bir hat mesafesinden sonra avantajlı olduğunu kanıtlamıştır ki bu mesafe güç elektroniği elemanlarının ucuzlaması ile düşmektedir. Dünyada bu konu ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Örneğin ABD' de bulunan ulusal bir laboratuvar (ORNL) bu konuda 1987 ve 1995 yıllarında iki ayrı çalışma yapmıştır. Bu tür çalışmalar, Türkiye' de yapılacak benzer analizler için bir temel olacaktır.

Yapılan çalışma, Türkiye'ye kurulacak HVDC ile enerji iletimi sistemlerinin, ülkedeki toplam kayıp maliyetlerini düşüreceğini ortaya koymuştur. Bu düşen maliyetler ve grafikler ile belirtilen sürelerde, HVDC sisteminin kurulum maliyeti karşılanabilmektedir. Ayrıca HVDC hatlarının, mevcut AC hatlardan yoğun kullanımda olanlara alternatif olarak kurulması ile (örneğin 7/24 çalışan sanayi bölgelerini besleyecek şekilde) enerji verimliliği açısından olumlu

sonuçlar elde etmemizi sağlayacaktır. Ancak HVDC ile enerji iletiminin Türkiye’ de kurulmasındaki en büyük engel anahtarlama elemanlarının yerli üretiminin olmamasıdır. Bu sorun ise teğviklerle ağılabilir. HVDC ile enerji iletimi üzerine üniversitelerde yapılacak çalışmalarla, bu konu hakkında uzmanlar yetiştirilerek ve dönüştürücü merkezlerin yerli üretimi gerçekleştirilerek, bu teknolojinin ülkemize kazandırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Padiyar, K.R., (2007). FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution, New Age International Publishers, New Delhi.
- [2] Kundur, P., (1993). Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc., California.
- [3] Laughton, M.A. ve Warne D.J., (2003). Electrical Engineer' s Reference Book, Newnes, London.
- [4] Sood, V.K., (2004). HVDC and FACTS Controllers Applications of Static Converters in Power Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [5] Agelidis, V.G., Demetriades, G.D. ve Flourentzou, N., (2006). "Recent Advances in High Voltage Direct Current Power Transmission Systems", School of Electrical, Energy and Process Engineering, Murdoch University, Perth.
- [6] Willis, F.L., Editor, (1987). Comparison of costs and benefits for DC and AC transmission, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-6204.
- [7] Hauth, R.L., Tatro, P.J., Railing, B.D., Johnson, B.K., Stewart, J.R. ve Fink, J.L., (1997). HVDC Power Transmission Technology Assessment, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/Sub/95-SR893/1.
- [8] Bahrman, M.P., (2008). "HVDC Transmission Overview", ABB, USA.
- [9] AREVA, (2009). HVDC for beginners and beyond, Systems-L4-HVDC Basics, Paris.
- [10] Williams, B.W., (2006). Principles and Elements of Power Electronics, University of Strathclyde, Glasgow.
- [11] Sampei, M., Magoroku, H. ve Hatano, M., (1997). "Operating Experience of Hokkaido-Honshu High Voltage Direct Current Link", IEEE Transactions on Power Delivery, 12 (3).
- [12] Holweg, J., Lips, H.P., Tu, B.Q., Uder, M., Baoshu, P. ve Yeguang, Z., (2002). "Modern HVDC Thyristor Valves for China' s Electric Power System", IEEE, 0- 7803-7459-2/02.
- [13] Du, C., (2007). VSC-HVDC for Industrial Power Systems, Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg.

- [14] ABB, (2008). It's time to connect: Technical description of HVDC Light technology, Grid Systems-HVDC, Ludvika.
- [15] Flourentzou, N., Agelidis, V.G. ve Demetriades, G.D., (2009). "VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview", IEEE Transactions on Power Electronics, 24 (3).
- [16] Jovcic, D. ve Strachan, N., (2009). "Offshore wind farm with centralized power conversion and DC interconnection", IET General Transmission Distribution, 3 (6): 586–595.
- [17] Xu, L., Yao, L. ve Bazargan, M., (2008). "DC Grid Management of a Multi-Terminal HVDC Transmission System for Large Offshore Wind Farms", Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century: 1-7.
- [18] Mueen, S.M., Takahashi, R. ve Tamura, J., (2010). "Operation and Control of HVDC-Connected Offshore Wind Farm", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 1 (1).
- [19] Zhou, K., Fu, X., Cheng, M., Zhu, X., Wang, W. ve Wang, T., (2008). "Topologies and Control of VSC-HVDC Systems for Grid Connection of Large-Scale Off-Shore Wind Farms", Electrical Machines and Systems: 2357-2361.
- [20] Negra, N.B., Todorovic, J. ve Ackermann, T., (2006). "Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms", Electric Power Systems Research 76 (11): 916-927.
- [21] Lazaridis, L.P., (2005). Economic Comparison of HVAC and HVDC Solutions for Large Offshore Wind Farms under Special Consideration of Reliability, Master's Thesis, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering, Stockholm.
- [22] Eeckhout B.V., (2008). The economic value of VSC-HVDC compared to HVAC for offshore wind farms, Katholieke Universiteit Leuven Faculteit Ingenieursw Etenschappen, Leuven.
- [23] IEEE Std. 1158-1991, (1991). IEEE Recommended Practice for Determination of Power Losses in High Voltage Direct-Current (HVDC) Converter Stations, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York.
- [24] Corbellini, U. ve Pelacchi, P., (1996). "Corona Losses in HVDC Bipolar Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, 11 (3) : 1475 - 1481.
- [25] Weimers, L. "Bulk power transmission at extra high voltages, a comparison between transmission lines for HVDC at voltages above 600 kV DC and 800 kV AC", ABB Power Technologies AB, Ludvika.
- [26] Larruskain, D.M., Zamora, I., Mazon, A.J., Abarrategui, O. ve Monasterio, J., (2005). "Transmission and Distribution Networks: AC versus DC", University of Basque Country, Bilbao.
- [27] Meah, K. ve Ula, S., (2007). "Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems", IEEE Power Engineering Society General Meeting: 1-7.

- [28] Asplund, G., (2008). "800 kV HVDC – Alternative scenarios for long distance bulk power transmission", CEPSI 2008, Macau.
- [29] Siemens. Ultra HVDC Transmission System, Issue 0910, HVDC/FACTS- Highlights.
- [30] Kim, C., Shim, E. ve Lee, S., (2009). "Feasibility Study of HVDC Interconnection between South Korea and North Korea", IEEE Transmission & Distribution Conference & Exposition Asia: 1-8.
- [31] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/High-voltage_direct_current, 12 Şubat 2011.
- [32] The ABB Group, <http://www.abb.com/hvdc/>, 10 Ocak 2011.
- [33] Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco J.F. ve Kaintzyk, U., (2002). Overhead Power Lines Planning, Design, Construction, Springer Engineering Online Libraray, Berlin.
- [34] General Cable, TransPowr ACSR/AW Bare Overhead Conductor, Aluminum Conductor Aluminum-Clad Steel-Reinforced Concentric-Lay-Stranded, <http://www.generalcable.com>, 24 Şubat 2011.
- [35] PHOENIX, Bare Overhead Conductors Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR), <http://www.phoenixwc.com>, 18 Aralık 2010.
- [36] Hyperphysics, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/restmp.html#c3>, 15 Mart 2011.
- [37] EPDK, <http://www.epdk.gov.tr/web/elektrik-piyasasi-dairesi/ulusal-tarifeler>, 2011 Yılı Fonsuz Tarifeler, 28 Mart 2011.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Doruk GÜRLEROĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 26 Haziran 1986 / Balıkesir
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : dgurleroglu@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen-Matematik	Fatma-Emin Kutvar Anadolu Lisesi	2004