

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

34709

YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLE
ENERJİ İLETİMİ

Elek.Müh. Nihat KÖSEDAĞI

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Hacı BODUR

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL, 1994

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ii
TÜRKÇE ÖZET	iii
YABANCI DİLDE ÖZET	iv
1. GİRİŞ	
1.1. Genel Giriş	1
1.2. Enerji İletiminin Tarihçesi	1
1.3. Doğru Akım ile Enerji İletimi	2
1.4. HVDC Sistemlerinin Genel Tanıtımı	4
2. ALTERNATİF AKIM VE DOĞRU AKIM SİSTEMLERİNİN GENEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI	
2.1. Doğru Akım Sisteminin Alternatif Akım Sistemine Göre Üstünlükleri	6
2.2. Doğru Akım Sisteminin Dezavantajları	11
3. YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLE ENERJİ İLETİMİNİN TEKNİK YÖNDEN İNCELENMESİ	
3.1. Yüksek Gerilim Doğru Akım İletim Modelleri	15
3.1.1. Tek Kutuplu İletim Düzeni	17
3.1.2. Çift Kutuplu İletim Düzeni	18
3.1.3. Eş Kutuplu İletim Düzeni	19
3.2. Alternatif Akım Sistemlerinin Asenkron Enterkonnekte Edilmesi	20
3.3. Uzun Mesafelere Güç İletimi	21
3.4. Yüksek Gerilim Doğru Akım Sistemlerinin Aşırı Gerilimlere Karşı Korunması	23
3.4.1. Doğru Akım Hatlarında Kullanılan Parafudrlar	24
3.4.2. Topraklama Hattı	24
3.4.3. İletim Hattı Koruma Sistemleri	25

3.5. Yüksek Gerilim Doğru Akım Enerji	
İletiminde Kullanılan Direkler	25
3.6. Yüksek Gerilim Doğru Akım ile Enerji	
İletiminde Kablolar	31
3.7. Yüksek Gerilim Doğru Akım ile Enerji	
İletiminde Kullanılan Donanımlar	33
3.7.1. Doğru Akım Düzleme Reaktörleri	34
3.7.2. Reaktif Güç İhtiyacı ve	
Şönt Kapasitörler	34
3.8. Dönüştürücü İstasyonlar	35
3.8.1. Dönüştürücü Elemanlar	36
3.8.2. Dönüştürücü Elemanların Soğutulması	41
3.9. Doğrultucular	42
3.10. İnverterler (Eviriciler)	44
3.11. Alternatif Akım Filtreleri	44
3.12. Yüksek Gerilim Doğru Akım İletim	
Hatlarında Korona Olayı	48
3.13. Yüksek Gerilim Doğru Akım Hava	
Hatlarında Görülen Radyo Parazitleri	48
3.13.1. Radyo Parazitleri İçin	
Alınan Önlemler	49
3.14. Yüksek Gerilim Doğru Akım Tesisleri	
İçin Koruma	50
3.14.1. Koruma Bölgeleri	51
3.14.2. Konverter Koruması	52
3.14.3. Konverter Transformatörü Koruması	54
3.14.4. Bara Koruması	55
3.14.5. Alternatif Akım Filtre	
Devrelerinin Koruması	56
3.15. Dönüştürücü İstasyon Tertibi	58
3.16. Güç Akış Yönünün Değiştirilmesi	61
3.17. Yüksek Gerilim Doğru Akım Disjonktörleri	62

3.18.2. İletişim Kabiliyetli Yüksek	
Kapasiteli Donanım	63
3.18.3. Yeni Yazılım Modülleri.....	64
3.18.4. Hızlı Müdahale İçin Programlama	
Üniteleri	65
3.19. HVDC Sistemleri İçin Hata Tolernslı	
Dijital Kapalı Çevrim Kontrolu	65
3.19.1. Hata Toleranslı Sistem Düşüncesi	65
3.19.2. Hata Toleranslı Dijital Kapalı	
Çevrim Kontrolunun Avantajları ...	66
4. YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLE ENERJİ	
İLETİMİNİN EKONOMİK YÖNDEN İNCELENMESİ	
4.1. Harcanan İletken, Demir ve Hırdavat	
Malzemesi	69
4.2. Ekonomik Hat Gerilimi	70
4.3. Dönüştürücü İstasyon Maliyetleri	71
4.4. Kablo Maliyetleri	73
4.5. Hat Kayıpları	73
4.6. İşletmede Güvenilirlik ve Esneklik	74
4.6.1. Servis Dışı Olma Yüzdesi	74
4.6.2. Sistem Kararlılığını Artırma	
Yolları	75
4.7. HVDC Sistemlerinin Tasarım ve	
İnceleme Yöntemleri	76
4.8. HVDC Sistemlerinin Bakımı	78
5. YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLE ENERJİ	
İLETİMİNDEKİ SON GELİŞMELER	
5.1. Tristör Performansının Gelişimi	80
5.2. Tristör Soğutulmasının Gelişimi	80
5.3. Tristör Ateşlemesinin Gelişimi	81
5.4. Elverişlilik ve Yedekleme	81
5.5. Modüler Sistem	82
5.6. Kule Tipi Dizayn ve Avantajları	83

5.7. Modüler Sistemin Avantajları	83
5.8. Kompakt İnşaat Dizaynı	84
6. YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN TÜRKİYE AÇISINDAN İNCELENMESİ	
6.1. Tarihsel Gelişim	87
6.2. İletim Sistemi	87
6.3. 420 kV Yüksek Gerilim AC ve ± 500 kV HVDC Sistemlerinin Ekonomik Mukayesesi	91
SONUÇ	93
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	97



ÖNSÖZ

İnsanoğlunun enerji ihtiyacı sürekli olarak arttıkça daha verimli çözüm yolları bulma konusundaki çabalar da devam etmektedir. Enerji kaynaklarının en önemlilerinden olan elektrik enerjisi de bu gelişmelerin odak noktasını oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmamda, elektrik enerjisinin iletimi ile ilgili iki önemli teknikten biri olan doğru akım ile enerji iletimini teknik ve ekonomik yönden inceledim. Ayrıca, bu alanda dünyadaki son gelişmeler ve Türkiye açısından doğru akımla enerji iletimi de gözden geçirilmiştir.

Çalışmalarımda sürekli destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Yrd.Doç.Dr. Hacı BODUR'a teşekkürü borç bilirim.

Nihat KÖSEDAĞI

ÖZET

Ticari güç işletmelerinin başlangıcında elektrik enerjisi doğru akımla iletilmiştir. Zamanla elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla, bazı teknik avantajlar nedeniyle 3 fazlı alternatif akım sistemi yüzyıl boyunca kullanıldı. Ancak çok yüksek enerji talebi, alternatif akım sistemlerindeki yüksek oranlı kayıplar ve 500 km'den daha uzak mesafelere ve enerji iletimi durumundaki yüksek yatırım maliyetleri gibi problemleri de beraberinde getirdi. Tüm bu değerlendirmeler, pek çok ülkede yüksek gerilim doğru akım iletim sistemlerinin uygulanmasında etkili oldu.

Günümüzde, özellikle son on yılda, yeni teknolojik gelişmelerle birlikte dünya çapında pek çok yüksek gerilim doğru akım iletim hatları kuruldu. Aynı zamanda, güç elektroniğindeki gelişmelere bağlı olarak yüksek gerilim doğru akım güç sistemleri AC güç sistemlerine önemli bir alternatif olmaktadır. Su altı kablolu iletim ve frekansları farklı iki AC sistemi birbirine bağlamak gibi bazı özel durumlarda yüksek gerilim doğru akım iletimi en iyi çözümdür.

Bu çalışmada, her iki sistem karşılaştırılmış, konuyu daha açık hale getirmek için tablo ve diyagramlar gösterilmiştir. Yüksek gerilim doğru akım sisteminin temel karakteristikleri verilmiştir. Son olarak da, HVDC sistemlerinin Türkiye'de uygulanma şartları tartışılmıştır.

SUMMARY

In the very beginning of commercial power plants, the power was transmitted by direct current. In the course of time, with demand for electrical energy continuously increased, because of some technical advantages, three-phase Ac system has been used almost during a century. However, this very high energy demand created new problems; such as high rate of energy losses in AC systems, higher investment cost for long distances longer than 500 km and so on. All of these considerations have been effective in implementation of HVDC (High Voltage Direct Current) transmission systems in many countries.

Nowadays, particularly in the last decade, by the contribution of new technological developments, many high voltage direct current transmission lines have been installed around the world. Also, depending on the developments in power electronics, high voltage direct current systems are significant alternative to AC power systems. In some particular cases, such as underwater cable transmission and coupling two AC power systems with different frequencies, HVDC is the best solution.

In this study, both systems have been compared, some important technical schemes and diagrams have been added to make the subject more clear. Basic characteristics of HVDC have been introduced. As a result, implementation conditions of HVDC power systems in Turkey was discussed.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Giriş

Günümüzde enerji ihtiyacı insanlığın vazgeçilmez temel ihtiyaçlarından biridir ve bu ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Öyle ki, enerji tüketimi bir ülkenin gelişmişlik göstergelerinden biri olmuştur. İnsanlık bu enerji ihtiyacını pek çok eğişik kaynaktan karşılama yoluna gitmiştir. Bugün de bu konudaki arayışlar teknolojiideki gelişmeye paralel olarak devam etmektedir. Özellikle çevresel ve insan sağlığı gibi faktörler açısından yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır. Bunların başında güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi gelmektedir.

Tüm bu arayışlara rağmen elektrik enerjisi, enerji sektörünün zirvesindeki yerini korumuştur. Yukarıda bahsedilen yeni enerji biçimleri de elektrik enerjisinin gelişmesine ve kalitesine katkıda bulunmuştur.

Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımına ilişkin, verimli çözüm yolları bulma arayışları da devam etmekte ve bunları uygulama imkanları yaratılmaktadır.

1.2. Enerji İletiminin Tarihçesi

Ekim 1879'da ilk elektrik lambasının Edison tarafından bulunuşu aydınlatma amacıyla ilk elektrik şebekelerinin kuruluşuna neden olmuştur. 1882'de New York'da Pearl Street denilen istasyon bölgesinde aydınlatma amacıyla kurulan şebeke 3 iletkenli, 220/110 V doğru akımlı ve 30 kW gücündeydi. Bu santral 2 km çaplı bir alan içerisindeki lambalar için enerji sağladı. Görüldüğü gibi elektrik

enerjisi iletiminde kullanılan ilk şekil, doğru akımdı. Elektrik enerjisinin önemi, bu ilk santralin kurulmasıyla fark edilince daha yüksek düzeyde enerji temini istenir hale geldi. Bu ilk güç sisteminden kaynaklanan kayıplar oldukça yüksekti. Bu nedenle doğru akım makinalarındaki komütatör arkı oluşumundan kaçınmak için işletme geriliminin orta seviyelerde tutulması gerekiyordu.

1890'da Edison'un bağlı olduğu General Electric'e rakip kuruluş Westinghouse transformatörleri ve dolayısıyla alternatif akımı geliştirince doğru akımın kullanım olanakları kısıtlanmıştır. Ucuz ve güçlü transformatörlerin ortaya çıkışıyla, önceleri elektrik enerjisinin temininin ekonomik olmadığı düşünülen alanlara, yüksek gerilimli düşük kayıplı iletim için faaliyet alanı açılmış oldu. Sonuç olarak, alternatif akım iletim sistemleri çok çabuk kabullenildi ve doğru akım projeleri geri çekildi [6].

Ancak, alternatif akım sistemleri ile uzun mesafeli enerji iletiminde kararlılık ve kontrol edilebilirlik sorunlarının çınmasıyla doğru akım iletim sistemleri yeniden gündeme gelmiştir. Ticari alanda ilk yüksek gerilim doğru akım hattı 1954 yılında İsveç ile Gotland adası arasında kurulmuştur. Bu hat 96 km uzunluğunda ve 150 kV gerilim değerine sahiptir. 1960'lı yıllardan itibaren de dünyanın pek çok yerinde yüksek gerilim doğru akım enerji iletim hatları kurulmuş ve işletmeye alınmıştır.

1.3. Doğru Akım ile Enerji İletimi

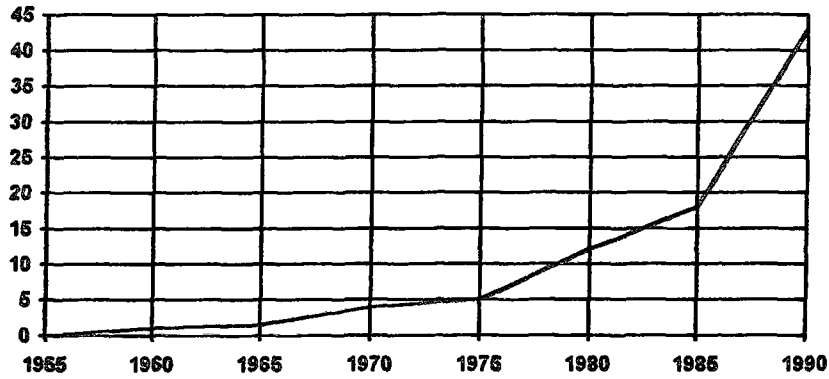
1954'te kurulan ilk yüksek gerilim doğru akım iletim hattından sonra bu alandaki çalışmalar devam etmiştir. Bugün dünya çapında 15.000 MW'dan büyük güçlü iletim hatlarının planlamaları yapılmış bulunmaktadır. Tablo 1.1'de dünyadaki

bazı önemli yüksek gerilim doğru akım iletim sistemleri ve ilgili değerleri verilmiştir.

Tablo 1.1. Önemli HVDC sistemleri

Bulunduğu bölge	Ülke	İleti m Hat Km	mesafesi Kablo Km	Gerilim kV	Taşıma gücü MW	İnşa yılı
Manş	İng-Fra	0	65	100	160	1961
Volga-Don	Sov.Bir	470	0	400	720	1965
Konti-Scan-1	Dan.İsv.	95	85	250	250	1965
Sakuma	Japonya	0	0	2x125	300	1965
	Y.Zelanda	570	39	250	600	1965
Sardunya	İtalya	292	121	200	200	1967
Vancouver	Kanada	41	33	260	312	1969
Gotland1	İsveç	0	96	150	30	1970
Pasifik Bağ.	ABD	1362	0	400	1440	1970
Rel nehri	Kanada	0	0	2x80	320	1972
Nelson nehri	Kanada	895	0	300	1080	1973
Nelson nehri	Kanada	0	0	450	1620	1976
King North	İngiltere	82	82	266	640	1975
Cabora bassa	Mozambik	1414	0	400	1440	1977
İnga-Shaba	Zaire	1700	0	500	1120	1977
Skagerrak	Nor.-Dan.	113	127	200	500	1977
Square-Bat	ABD	730	0	250	250	1977
Cabora Bassa	Mozambik	1414	0	533	1920	1979
CU	ABD	710	0	400	1000	1980
İtaupu-Sao Paola	Brezilya	2x830	0	600	6300	1983

Dünyadaki toplam yüksek gerilim doru akım kurulu gücünün 200 yılına kadar 60.000 MW'a ulaşması beklenmektedir. Halen planalama aşamasında bulunan pek çok proje vardır. Şekil 1.1.'de tüm dünyada kurulu yüksek gerilim doğru akım sistmlerinin kapasitelerinin gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Dünyadaki HVDC sistemlerinin kapasite gelişimi

Günümüzün en büyük kapasiteli doğru gerilim enerji iletim hattı Brezilya'da Itaipu-Sao Paola arasında kurulan ± 600 kV ve 6.300 MW kapasiteli hattır.

Enerji iletiminde doğru akımla alternatif akımdan hangisinin uygun olduğu gerçekleştirilecek iletime göre teknik ve ekonomik özelliklerin araştırılması ile belirlenecektir. Seçimi belirleyecek asıl faktör ekonomikliktir. Bunun yanı sıra sistem güvenilirliği de seçimi önemli ölçüde etkilemektedir.

1.4. HVDC Sistemlerinin Genel Tanıtımı

Bir HVDC sistemi, prensip olarak alışılmış bir AC üretim birimi, AC/DC çevirme birimi, DC iletim hatları ve DC/AC geri çevirme biriminden oluşur. Konunun sistemin işletme güvenliği ve esnekliği, yatırım ve işletme ekonomisi, daha ileri bir teknoloji kullanımı gerektirmesi gibi çok çeşitli yönleri vardır. Doğru akım sistemlerinde çevirici istasyonları önemli bir yer tutmaktadır. Bu çevirici istasyonları gelişen teknoloji ile birlikte karmaşık olmaktan çıkıp daha da basitleşmektedir. Buna paralel olarak maliyetlerinde de önemli bir düşüş olmaktadır [3].

Bugün kullanılan yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletim sistemlerinin uygulama alanları genel olarak şunlardır.

1. Çok uzun mesafelere havai hatlar ile güç iletimi için kullanılmaktadır. Alternatif gerilim ile enerji iletiminde iletim hatlarındaki maliyetin sürekli artması ve bu artışın uzaklıkla doğru orantılı olarak değişmesi sistemi ekonomiklikten uzaklaştırır. Bu nedenle, örneğin 800 km gibi çok uzun bir mesafede, ± 500 kV gerilim değerinde ve 1.200 MW gücünde bir iletimin doğru akımla gerçekleştirilmesi daha uygun olmaktadır. Bunun ana avantajları, hat endüktans ve kapasitansından etkilenmeksizin aktif güç iletimidir. Aynı zamanda düşük korona kayıpları ve iletim kayıpları olarak da ekonomik avantajları vardır.

2. Su altından adalara, açık denizlerdeki petrol veya doğal gaz platformlarına enerji sağlamada ve boğaz atlamalarında kullanılmaktadır. Özellikle çevresel faktörler yüzünden bu gibi yerlere enerji temininin doğru akımla gerçekleştirilmesi avantajlı olmaktadır.

3. İki bağımsız olarak çalışan alternatif akım sistemlerinin bağlantısı için kullanılmaktadır. Alternatif akımda asenkron veya farklı frekanslı şebekeler arasında kararlı iletimin sağlanması oldukça zordur. Şebeke frekansları farklı ülkeler arasında yüksek gerilim doğru akım bağlantısı ile enerji alışverişi gerçekleştirilebilmektedir. Yani doğru akım bağlantısı iki rijit sistem arasında esnek bir bağlantı gibi kullanılabilir. (Fransa-İngiltere arasında olduğu gibi)

Duruma göre bazen yukarıdaki uygulama şekilleri kombine olarak da uygulanabilmektedir [15].

2. ALTERNATİF AKIM VE DOĞRU AKIM SİSTEMLERİNİN GENEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Her iki sistemin karşılaştırılması sonucu kullanılacak iletim sisteminin etüdü daha iyi yapılabilir. Şimdi genel olarak her iki sistemin avantaj ve dezavantajları incelenecektir.

2.1. Doğru Akım Sisteminin Alternatif Akım Sistemine Göre Üstünlükleri

1. Çok uzak mesafelere alternatif akım ile büyük güçler iletilmek istendiğinde stabilite zorluklarından dolayı kondansatörler, bobinler, faz kaytarıcılar vs. gibi bazı özel ilave düzenlerin tesisi gerekmektedir. Hattın uzunluğunun artması ile bu ilave düzenlerin sayısı ve boyutu arttığından iletim olayı ekonomik olmaktan çıkmaktadır. Doğru akım sisteminde kararlılık problemi yoktur ve güç iletimi iletkenin tam kapasitesi ile sağlanır.

Doğru gerilim, alternatif gerilimin tepe değerine eşit olduğundan, doğru akımla iletilen güç tek fazlı alternatif akım sisteminin 2 kat, üç fazlı alternatif akım sisteminden de %50 daha fazladır. Bunu şöyle gösterebiliriz.

Alternatif akım sisteminde,

$$P_a = 3 \cdot U_a \cdot I_a \cdot \cos\varphi \quad (2.1)$$

$$U_a = \sqrt{3} \cdot V_a \quad (2.2)$$

$$P_a = 3 \cdot 3 \cdot V_a \cdot I_a \cdot \cos\varphi \quad (2.3)$$

olup, burada;

U_a : Faz-faz gerilimi

V_a : Faz gerilimi

I_a : Faz akımı

$\cos\varphi$: Güç faktörüdür.

Doğru akım sisteminde ise,

$$P_d = V_d \cdot I_d \quad (2.4)$$

V_d : Toprağa göre hat gerilimi

I_d : Hat akımıdır.

$I_a = I_d$ ve $V_d = \sqrt{2} \cdot V_a$ varsayımlarına göre

$$\frac{P_d}{P_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_a \cdot I_a}{3 \cdot V_a \cdot I_a \cdot \cos\varphi} \quad \cos\varphi=0.943 \text{ alınır}$$

$$\frac{P_d}{P_s} = \frac{1.42}{2.829} = 0.5$$

$$P_d = \frac{P_s}{2} \quad \text{eşitliği elde edilir.}$$

Üç fazlı alternatif akım sistemi yerine iki iletkenli ve toprak telli bir doğru akım sistemi kullanılarak aynı gücün taşınabileceği yukarıdaki hesaptan görülebilmektedir. Doğru akım ile iletimde güç kaybı alternatif akım ile iletimde olabilecek güç kaybının 2/3'ü kadar olacaktır [1].

Alternatif akımda endüktans sorununun oluşu nedeniyle verimli bir güç iletimi sağlanamamaktadır. İlave düzenlerle kompanzasyon yapılması gerekmektedir. Doğru akımla iletimde endüktans sorununun olmayışı alternatif akıma göre bir üstünlüktür.

2. Doğru akım iletim direkleri nispeten basit, küçük ve hafiftir. Doğru akım ile iletimde izolatör sayısı 2/3 oranında azdır. Bu, basitlik ve ekonomiklik sağlar.

3. Doğru akım kablolarında yükleme akımları ve dielektrik kayıpları olmadığından, aynı kesitli alternatif akım kablolarına göre daha fazla güç taşınabilir. Alternatif akımla iletimde ısıнын etkisi yanında güç taşıma kapasitesini belirleyen diğer kısıtlar da gözönüne alınırsa doğru akım ile iletimde tek bir iletkene düşen gücün dört katına kadar yükselebilir.

4. Doğru akım iletkenlerinde reaktif güç akışı olmayacağından kompanzasyon sorunu yoktur. Doğru akım ile iletimde şarj akımından ve hat reaktansından problemler doğmaz. Bunun sonucu olarak doğru akım hatları veya kabloları alternatif akım hatları ve kablolarından çok daha ucuzdur.

5. Doğru akım hatları ile alternatif akım hatlarının başaramayacağı hizmetler yapılabilir. Asenkron durumlu sistemlerle diğer sistemleri farklı ülkeler arasında ancak doğru akım hatları ile ekonomik ve güvenilir bir şekilde bağlamak mümkündür. Doğru akım ile enerji asenkron olarak iletilebilir. Alternatif akım ile enerji sistemlerinin bağlantısında taşınan güç, güç açısına bağlıdır. Bu, farklı yapıdaki sistemlerin bağlantısında sorunlar çıkarmaktadır.

Örneğin, hidroelektrik santraller ile termik santraller arasındaki bağlantılarda, hidroelektrik santrallerin frekans değişimi termik santrallara göre fazla olduğundan sorunlar çıkmaktadır.

Bir örnek verilecek olursa, Itaipu santralının Paraguay tarafında frekans 50 Hz iken Brezilya tarafında 60 Hz'dir. Bağlantı ±600 kV doğru akım hattı ile yapılmakta ve böylece farklı frekanslı sistemler bağlanabilmektedir.

6. Üretim merkezleri ile tüketim yerleri arasında mesafe arttıkça alternatif akım tertibindeki gerilim ve akımların dengelenmesi için zorunlu olan fazlardaki "döndürme" tekniği doğru akım ile iletimde gerekmez, problem olmaz.

7. Doğru akım iletim gücünün yönü ve genliği tristörlerin ateşleme açılarının denetlenmesi ile kontrol edilebilir.

8. Dengeli üç fazlı alternatif akım sisteminde fazlardan birinin arızaya girmesi halinde üç fazın korunması amacıyla tüm enerjinin kesilme riskine karşılık doğru akım ile iletimde iletkenlerden birinin arıza görmesi durumunda bile diğer iletkenle güç taşınabilir.

9. Doğru akım ve alternatif akımın toplam maliyetinin eşit olduğu noktayı özel şartlara bağlı olarak spesifik mesafe belirler. Doğru akımda daha düşük fiyatta direkler ve daha ucuz iletkenlere ihtiyaç duyulduğundan daha düşük gerilimde, daha iyi iletken ve daha uygun yalıtım kullanılarak eşit güç iletilebilir.

10. Bir doğru akım bağlantısının her iki ucundaki alternatif akım devrelerinin senkronize olması gerekmez. Alıcı taraf alternatif akım sistemine, alıcı tarafta artan bir kısa devre olmadıkça ilave güç enjekte edilebilir.

11. Doğru akım bağlantısının ucundaki alternatif akım devresindeki güç akışı, alternatif akım sisteminin stabilitesini sağlamak için özel durumlarda kullanılan herhangi bir elektrik sinyaline cevap verecek şekilde çabuk ve doğru olarak programlanabilir ve genellikle alternatif akım ile düşük izolasayon seviyelerinin kullanılması mümkün olur [5].

12. Alternatif akım iletim sisteminde endüktans probleminden dolayı kararlılık zorlukları vardır. Bu sebeple alternatif akım iletim kapasitesi taşıma kararlılığı nedeniyle sınırlıdır. Bir alternatif akım iletim hattında hattın direncinin ihmal edilmesi halinde,

V_1 : Hatbaşı gerilimi [V]

V_2 : Hatsonu gerilimi [V]

δ : V_1 ile V_2 arasındaki açı (güç açısı)

X : Hattın reaktansı [Ω]

olmak üzere, iletilebilen maksimum güç,

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \cdot \sin \delta \quad [W] \quad (2.5)$$

dır. Çok uzun hatlarda hattın reaktansı artacağından iletilen güç azalır. En önemlisi de, kararlılık açısından $\delta=30^\circ$ 'den fazla istenmemektedir. Bu da yaklaşık olarak iletilebilecek maksimum gücün ancak yarısının güvenli bir şekilde iletilebileceğini gösterir.

13. Alternatif akım iletim sisteminde ideal durum, hatta gerilim düşümünün olmadığı ve güç iletiminin sıfır derecelik güç açısı ile yapıldığı durumdur. İdeal bir iletim hattı, hattın sonunda karakteristik empedans Z_0 değeri ile yüklü olması halidir.

Z : Hattın empedansı [Ω]

Y : Hattın admintansı [$1/\Omega$]

olmak üzere karakteristik empedans,

$$Z_0 = Z/Y \quad [\Omega] \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir. Hattın naturel gücü ise,

$$P_n = U^2 / Z_0 \quad [W] \quad (2.7)$$

dır. Burada U, volt olarak fazlararası gerilimdir. Tablo 2.1'de çeşitli hat gerilim değerlerine karşılık gelen naturel güçler verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı fazlar arası gerilime karşılık gelen naturel güçler

Fazlararası Gerilim [kV]	Naturel güç [MW]
10	0.27
20	1.07
30	2.40
110	32
150	60
220	130
400	170 (1)
400	660 (2)

(1) Dalga direnci 280 Ω olan ikili demet iletken

(2) Dalga direnci 240 Ω olan dörtlü demet iletken

Tablodan da görüldüğü gibi her geçen gün ihtiyaç duyulan enerji artışı gözönüne alınacak olursa büyük güçlerin iletimi için alternatif akım sistemindeki naturel güçler pek büyük değerlerde olmamaktadır. Naturel gücü artırmak için ya U gerilimi artırılır ya da Z karakteristik empedansı azaltılır. Fakat karakteristik empedans hattın boyutlarından bağımsızdır ve sabit bir değer olarak 375 Ω alınır.

2.2. Doğru Akım Sisteminin Dezavantajları

Yüksek gerilim doğru akım sistemlerinin yukarıda sayılan pek çok avantajına rağmen birtakım olumsuz yönleri

de vardır. Ancak bu olumsuzluklar gelişen teknolojiye paralel olarak azalmaktadır. Doğru akım sistemlerinin dezavantajları şunlardır.

1. Doğru akım sisteminde kullanılan doğrultucu ve inverter gruplarının ilk yapım maliyetleri oldukça yüksektir.

2. Doğrultucu ve inverter gruplarının yüksek reaktif güç çekmeleri. (Kompanzasyon amacıyla devreye konulan kapasitörler çeviricilerin ürettiği yüksek frekanstaki gerilimleri süzmek için de kullanılabilir.)

3. Topraklanmış doğru akım sistemleri yeraltı su boruları ve yeraltı kablolarında hasara neden olurlar. Çevirici gruplarındaki tristörlerin açma ve kapama sırasında oluşturduğu yüksek frekanstaki gerilimler radyo ve televizyon yayınlarını etkileyebilmektedir. Bunu önlemek için koruyucu ve ayırıcılarda metal topraklama gerekmektedir.

4. Doğrultucu ve inverterlerin ürettiği yüksek frekanstaki gerilimler bağlı bulundukları alternatif akım devrelerini de etkiler. Bunun için filtre devreleri gereklidir.

5. Alternatif akım devrelerinde daha fazla güç iletebilmek için ek bağlantılar kolayca yapılabilir. Buna karşın doğru akım ile iletimde böyle bir ek bağlantı güç akışının kontrolü, arızanın farkedilmesi, gerekli koruma aletlerindeki yetersizlikler nedeniyle zordur. Ancak son yıllarda çok kutuplu düzenler ve kontrolü konusunda önemli gelişmeler olmuştur ve araştırmalar devam etmektedir.

6. Doğru akımda kesiciler önemli bir konudur, problem yaratmaktadır. Alternatif akımda akımın periyodik olarak sıfırdan geçtiği anda SF_6 veya vakumlu kesiciler vasıtasıyla güvenli bir kesme işlemi gerçekleştirilir.

Doğru akımda ise akım sıfırdan geçmediğinden kesiciler için özel donanımlar gerekmektedir. Doğru akım sisteminde iki terminalli sistemler kullanılmaktadır. Gelişen teknolojinin dört veya daha fazla terminalli sistemlere olanak vereceği görülmektedir.

7. Doğru akım iletim hatlarının yaratabileceği düşünülen bazı sağlık sorunları vardır. Yüksek gerilim doğru akım iletim hatları civarında benzer yüksek gerilim alternatif akım iletim hatlarındakinden daha şiddetli bir elektrik alan vardır. Örneğin, 500 kV alternatif akım hatlarının altında toprak düzeyinde alan şiddeti 9 kV/mm iken 500 kV doğru akım hatlarının altında bu değer 30 kV/mm olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler Kuzey Dakota ile Minnessota (ABD) arasında yapılmıştır.

Diğer bir nokta, yüksek gerilim doğru akım hatlarının statik manyetik alanları, yakın objeler üzerinde bir gerilim endüklemeyebilir. Alternatif akım ve doğru akım hatlarının elektriksel karakteristiklerinin arasındaki önemli bir fark hava-iyon konsantrasyonlarında ve hatlar civarındaki iyon akımlarında görülür. Yüksek gerilim doğru akım hatları civarındaki hava-iyon konsantrasyonunun fazla oluşunun sağlık üzerinde problem yaratabileceği düşünülmektedir. Ancak bu konuyu kesin olarak açıklığa kavuşturacak deneyler yapılmamıştır. İletim gerilimleri mertebesinde gerilim uygulanan hatlar civarındaki elektrik alan şiddeti havanın delinme geriliminden daha yüksektir ve bu durum hat civarında iyonizasyona neden olur. Alternatif akım hatlarında bu durum sorun yaratmaz. Çünkü periyodun farklı yarılarında alan ters olduğundan iyonlar uzaklaşamaz. Halbuki, doğru akımda oluşan iyonlar uzaklaşabilir. Yağmur ve rutubetin bu iyonlaşmayı artırdığı belirlenmiştir. Bununla beraber zararlı etkileri görülmemiştir.

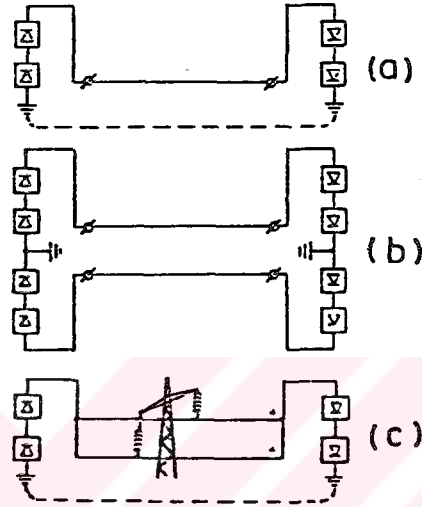
Ayrıca alternatif akım sisteminde filtre düzenleri, çevirici valfleri, bunların soğutma ve kumanda düzenleri yer almadığından birim tesis masrafı açısından doğru akım sistemine göre ucuzdur.

Alternatif akımın değişken akı karakteri nedeniyle her büyüklükteki gerilimi bir diğerine çevirmek mümkündür. Çok büyük güç ve gerilimlerde transformatörler imal edilebilmektedir [2].



Enerji, hava hatları veya yer altı kablosu ile iletilir. İletim tek kutuplu, iki kutuplu ve eş kutuplu tertiplerle yapılabilir. Şekil 3.2'de bu düzenlemeler toplu olarak gösterilmiştir. Bu kadar değişik modele gerek

duyulması bir bakıma gelişen tüketici gereksinimi ve artan güvenceli çalışma gereğinin bir sonucudur. Sistem ne kadar basit olursa işletme, tesis ve maliyet sorunları o derece az olur. Buna karşılık güvenli çalışma niteliği kaybolabilir.



Şekil 3.2. Tek kutuplu (a), çift kutuplu (b) ve çok kutuplu (c) doğru akım iletim hattı

Örneğin, çift iletkenli bir sistemde, hat veya çeviricilerin herhangi birinde oluşan bir arıza sonucu iletim çıkmaza girebilir. Ancak tesis masrafı bu sistem için azdır. Toprak dönüşlü sistemlerde iletimin yapıldığı güzergahın toprağının çok iyi iletken olması gerekir. Güzergah boyunca taban yapısı mümkün olduğunca aynı özellikleri taşımalıdır. Deniz altından kablo çekilmesi halinde ikinci bir dönüş çekilmez. Bunun iki sebebi vardır. Birincisi tesis masrafı ve güç kayıplarından kaçınmaktır. İkincisi ise dönüş hattının eş potansiyel alanlar oluşturup deniz canlılarını, denizaltı haberleşmesini, sonar ve radar

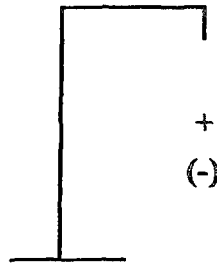
aygıtlarını, yön belirleyici aletleri ve pusulaları olumsuz yönde etkilemesidir.

Bazı durumlarda dönüş yolu için de iletken çekilebilir. Bunun yararı, hatlardan birinde oluşabilecek bir arıza durumunda dönüş iletkenini faz gibi kullanabilmektir. Ancak dönüş için ayrı iletken kullanılması ek tesis masrafı ve güç kaybını beraberinde getirir.

Yüksek gerilim doğru akım iletiminde toprak dönüşü kullanılır ise her bir iletken bu toprak dönüşü ile ayrı bir elektrik devresi oluşturacak şekilde ayrı ayrı izole edilirler. Şimdi temel iletim düzenlerini inceleyelim.

3.1.1. Tek Kutuplu İletim Düzeni

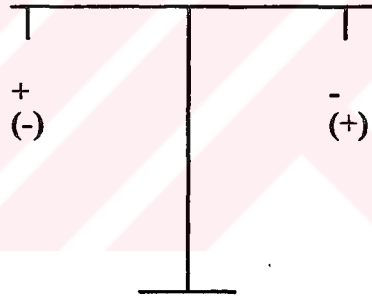
Küçük güçlerin iletiminde esasen kablo ile iletimde kullanılır. Şekil 3.2.a'da görüldüğü gibi bu modelde sadece bir iletken vardır ve geri dönüş iletkeni olarak toprak kullanılmaktadır. Bu modelin direkte yerleştirilmesi de şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Tek kutuplu iletim modelinin direkte yerleştirilişi

3.1.2. Çift Kutuplu İletim Düzeni

Çift kutuplu (bipolar) iletim düzeni, yüksek gerilim doğru akım havai hat direklerinin dizaynında mekanik yönden en uygun iletim modelidir. Bu iletim modelinde farklı iki kutba (+ ve -) ait iki iletken birbirinden yalıtılmış olarak taşınmaktadır. Yüksek gerilim doğru akım sistemlerinin bu şekilde çift devre olarak çalıştırılması servis güvenilirliği konusunda dikkat edilmesi gereken bir noktadır. Çift kutuplu iletimde toprak dönüş iletkeni gerekli değildir. Yine de hazırda tutma kapasitesini yükseltmek amacıyla kullanılabilir. Şekil 3.2.b'de böyle bir iletim düzeni şeması gösterilmiştir. Şekil 3.4.'de de çift kutuplu iletim düzeninin direkte yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Çift kutuplu iletim modelinin direkte yerleştirilmesi

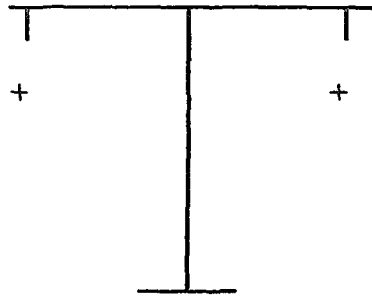
Yüksek gerilim doğru akım iletim sistemlerinde gerilim düzeyi ve taşınan güç arasındaki ilişkiyi görebilmek amacıyla Tablo 3.1.'de gerilim ve kapasite değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1. HVDC sistemlerinde gerilim ve taşıma kapasiteleri

Gerilim Düzeyi (Bipolar kV)	Taşınan Güç (MW)
250	200-500
300	400-1000
400	800-1600
600	2000-4000
800	4000-8000

3.1.3. Eş Kutuplu İletim Düzeni

Çift kutuplu direk dizaynı çok kutuplu iletimde aynı polaritedeki kutuplar için de kullanılabilir. Eş kutuplu iletim modeli, korona kayıplarını azaltmak için aynı polariteli iki veya daha fazla iletken kullanılarak yapılan iletim düzenidir. Şekil 3.2.c'de böyle bir iletim düzeninin şeması verilmiştir. Görüldüğü gibi dönüş iletkeni olarak toprak kullanılmıştır. Şekil 3.5.'de eş kutuplu (homopolar) iletim düzeninin direkte yerleştirilmesi görülmektedir.



Şekil 3.5. Eş kutuplu iletim modelinin direkte yerleştirilmesi

Bu sistem tek kutuplu iletimin havai hatlara uygulanmış modelidir. İki tek kutuplu devre kullanıldığından ve her direğin izolatör zincirleri ayrı polaritede iki ayrı iletken taşıyacağından çok geniş bir havai iletim sistemi düşünülmelidir.

3.2. Alternatif Akım Sistemlerinin Asenkron Enterkonnekte Edilmesi

Uzun zamandır bilindiği gibi büyük bir enterkonnekte alternatif akım şebekesinin işletilmesi daha küçük bir kaç bağımsız şebekenin işletilmesinden daha ekonomik olmaktadır. Enterkonnekte şebekelerin başlıca avantajları çok sayıda dönen makinelerin bağlanabilmesinden ve yedeklerinin bulunmasından dolayı daha büyük generatör kapasiteli ünitelerin sisteme bağlanabilmesidir. Azami pik zamanlamasındaki coğrafik farklılıklar generatörlerin daha fazla yüklenmesine ve böylece daha ekonomik üretime izin verebilmektedir. Bununla birlikte coğrafi açıdan büyük alternatif akım şebekeleri kararsızlığa eğilimli olabilmekte ve şebeke büyüklüğü genellikle böyle durumlarda kısıtlanmaktadır. Ayrıca bütün santraller senkron çalıştırılmak zorundadırlar.

Bir yüksek gerilim doğru akım projesinde, bir alternatif akım sisteminden alınan elektrik gücü bir redresörle doğru akıma dönüştürülmekte ve inverter ile yeniden alternatif akıma dönüştürüldükten sonra orijinal sistemle asenkron olabilen bir diğer alternatif akım sistemine bağlanmaktadır. Bir yüksek gerilim doğru akım sisteminin asenkron yapısı demek, bağımsız alternatif akım şebekelerinin, münferit alternatif akım sistemlerinin geçici rejimi azaltmaksızın birbirine bağlanabilmesi demektir.

Gerçekte, doğru akım ile güç iletimi ateşlemeli faz açılı tristörlerle elektronik olarak kontrol edilebildiğinden, iletilen güç, frekans kontrolü ve iki alternatif akım sisteminden birinin devreden çıkmasıyla diğer sistemin ayarlanmış güç akışını taşıyacak kadar kuvvetli olması sağlanarak ayar edilebilmektedir.

İngiltere ve Fransa arasındaki Cross Channel 2000 MW'lık yüksek gerilim doğru akım hattının İngiltere'deki istasyonu 1986'da hizmete açılmıştır. Bu proje öncelikle her ülkedeki günlük farklı değişiklikler esasına göre düzenlenmiştir. Fakat doğal olarak hızlı güç kontrolü nedeniyle bağlantı her bir sistemin döner makinalarının yedeklerinin miktarını azaltabilecektir. Bağlantının her iki ülkede 1500 MW'lık üretim kapasiteli tesise eşdeğer olduğu tahmin edilmektedir.

Birçok durumlarda, birbirine komşu alternatif akım şebekeleri arasındaki asenkron bir bağlantı, doğru akım iletim hattı ihtiva etmeyen ardarda (back to back) şeması biçiminde düzenlenen basit bir yüksek gerilim doğru akım projesi ile elde edilebilir.

3.3. Uzun Mesafelere Güç İletimi

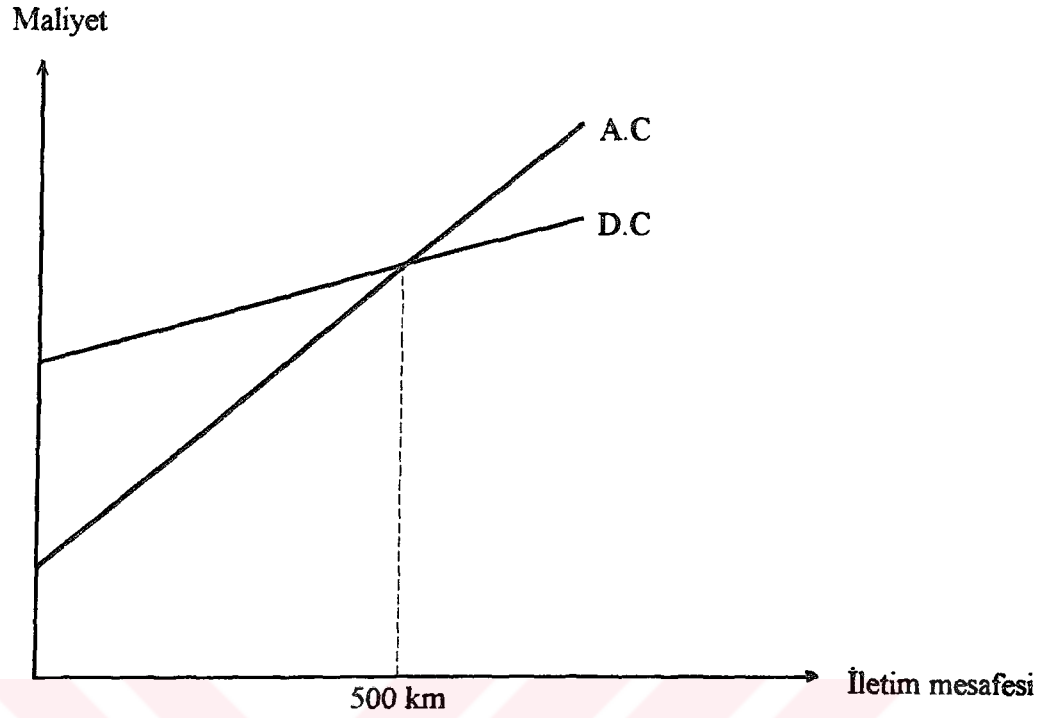
Hidrolik potansiyel ve kömür gibi birincil enerji kaynakları genellikle yük merkezlerinden oldukça uzak yerlerde bulunmaktadır. Bu kaynakların taşınması, pratik veya ekonomik olmadığı zaman, büyük miktardaki elektrik enerjisinin uzun mesafelere iletimi gerekmektedir. Düz doğrultuda alternatif akım iletimi nispeten kısa mesafelerde geçici rejim stabilite problemleri nedeniyle sınırlıdır fakat uzun mesafede alternatif akım ile iletim ancak paralel ve/veya seri kompanzasyon kullanılarak başarılabilmektedir.

Bir yüksek gerilim doğru akım bağlantısının performansı, hattın uzunluğundan önemli ölçüde etkilenmez ve hattın maliyeti mukayese edilen alternatif akım hattına göre önemli ölçüde düşük olduğundan, doğru akım ekseriyetle uzun mesafelere güç iletiminde en düşük maliyetli tercihi sağlamaktadır.

Alternatif akım hatlarına uygulanabilen stabilite sınırlamaları ve gerilim regülasyonu ihmal edildiğinde özdeş iletkenli (kesit ve karakteristiği aynı) alternatif akım ve doğru akım hatları ile hemen hemen aynı miktarda güç iletimi yapılabilmektedir. Bu nedenle, iki iletkeni olan bir doğru akım hattının yatırım maliyeti, üç iletkenli eşdeğer bir alternatif akım çözümüne ilişkin nakil kaybı, eşdeğer alternatif akım hattınının yalnızca üçte ikisi kadardır. Doğru akım hattının tercihine ilişkin bir başka avantaj da ince ve hafif direklerden kaynaklanan, araziden geçiş hakkı gereksinimini ve çevresel etkiyi azaltmasıdır.

Doğru akım iletiminde gerekli olan konverter postası maliyeti, benzer değerli alternatif akım postasınınkinden önemli ölçüde yüksektir. Bu nedenle alternatif akım eşdeğerlerininkinden daha az olan doğru akım çözümünün seçimi için projenin toplam maliyetinden önce bir kara geçiş mesafesinin aşılması gerekir. Şekil 3.6'da iletim uzaklığına göre her iki sistemin maliyetlerini karşılaştıran değişim gösterilmiştir.

Tipik olarak hava iletim hattı için kara geçiş uzaklığı yaklaşık 500 km'nin altındadır. Bu uzaklık, yalnızca yüksek gerilim doğru akım teknolojisinde süregelen gelişmelere değil, fakat aynı zamanda kayıpların sürekli artması nedeniyle de geçen yıllarda aşamalı olarak azaltılmıştır.



Şekil 3.6. AC ve DC iletim masraflarının karşılaştırılması.

Kara geçiş uzaklığı, iletim hattının maliyeti ve terminal donanımının maliyeti arasındaki ilişki ile saptanmaktadır ve bu maliyetler yerel işgücü maliyeti, ithalat vergileri vs.' den de ayrıca etkilendiği için, ülkeden ülkeye değişmektedir.

Yüksek gerilim doğru akım sistemleri ile ilgili araştırmamıza devam edelim.

3.4. Yüksek Gerilim Doğru Akım Sistemlerinin Aşırı Gerilimlere Karşı Korunması

Alternatif akım sistemlerinde ve doğru akım iletim hatlarındaki çeviriciler aşırı gerilimlere karşı parafudrlar ile korunurlar.

3.4.1. Doğru Akım Hatlarında Kullanılan Parafudrlar

Günümüzde işletmelerin büyük bir kısmında aşırı gerilim koruması alternatif akım işletmelerinde kullanılan parafudrlar ile yapılmaktadır. Fakat doğru akım çevirici donanımlarında kullanılan parafudrların dizayn kriterleri alternatif akım sisteminden farklıdır. Doğru akım tarafında aşırı gerilimden koruma için basit parafudrlar kullanılır. Bu parafudrların doğal olarak polariteden bağımsız çalışmaları gerekir. Bir parafudrun çalışması sonuçta bir kısa devreye yol açması şeklindedir. Doğru akım parafudrları endüktif devreler için uygundur ve deşarjdan dolayı meydana gelen osilasyonlara nispeten dayanabilirler. Bazı durumlarda sıfır geçiş devrelerinin yardımı olmaksızın kullanılabilirler. Doğru akım parafudrları açıklıklara dağılan deşarj enerjilerini korurlar ve yayılan dalgaları temizleme kabiliyetleri yüksektir. Uygulamalarda kullanılan parafudrlar akım kontrollu olarak çalışırlar.

Tetikleme sırasında parafudrların zarar görmemesi için özel bir donanım ile çevirici istasyonunun çok kısa bir sürede bloke olması sağlanır. Çeviricilerin tekrar işletmeye alınmaları 0.5-1 saniye zaman zarfında gerçekleşir.

3.4.2. Topraklama Hattı

Doğru akım hatlarının topraklama ihtiyacı alternatif akıma göre daha azdır. Çünkü arıza akımını sınırlamak ve bu suretle izolatörlerin hasara uğrama riskini azaltmak için doğru akım sistemlerinde zaten koruma sistemleri mevcuttur.

Yüksek gerilim doğru akım hava hatlarında yıldırım darbelerinin iletken kutba etki etmemesi için topraklama yapılabilir. Ancak bu da ek korona kayıplarına neden olur. Topraklama, kutuplar arasında oluşan geçici olayların

etkisini azalttığı gibi aynı zamanda toplam topraklama direncini de düşürür. Bu durum iletim hattı koruma sistemleri açısından oldukça önemlidir. Yüksek gerilim doğru akım hava hatlarında istasyon koruması yıdırım etkisi sonucu meydana gelen geçici aşırı gerilmelere karşı hattın uç noktalarına kadar her 3 veya 5 km'de bir topraklanır.

3.4.3. İletim Hattı Koruma Sistemleri

İzolatörlerin zarar görmemesi için arıza akımlarının ve sürelerinin azaltılması gereklidir. Bu yüzden akım kontrollü sistemlerin karakteristikleri çok hızlı olmalı (20-40 ms) ve arıza akımlarını sınırlayarak nominal değere döndürmelidir. Bu tip koruma sistemi izolatör civarındaki iyonizasyonu sınırlar ve hattın tekrar enerjilenmesini kolaylaştırır.

Hat arızası açısından topraklama direncinin hattın birçok noktasında 100 Ω civarında bir değerle sınırlandırılması gerekir. Direk topraklaması zayıf ise birkaç direk enterkonnekte olarak bağlanmalıdır. Bu enterkonnekte bağlantı hattın uzunluğunu sınırladığından bütün hat boyunca topraklama yapmaya imkan verir.

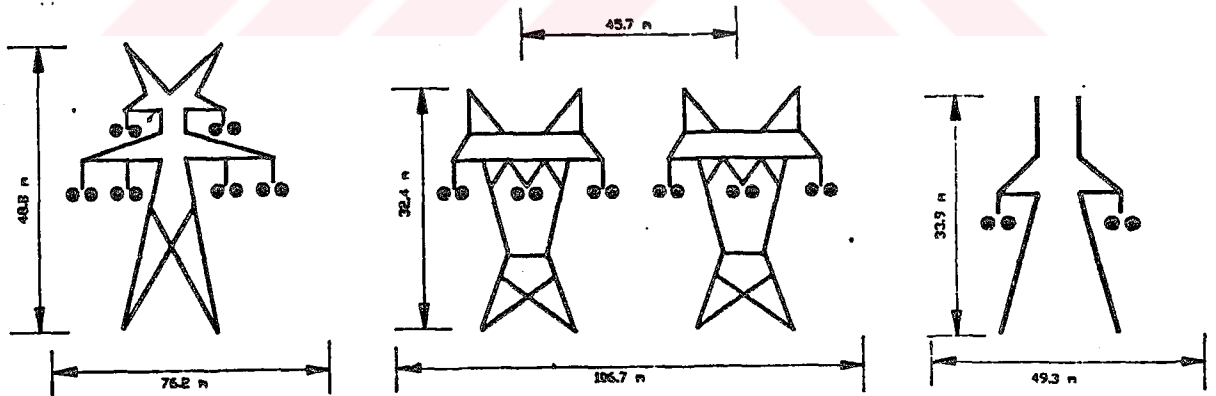
Bir yüksek gerilim doğru akım iletim sistemini oluşturan elemanlar incelendikten sonra bu tesisler için koruma ve kontrol düzeneklerine ve bu alandaki gelişmelere değinilecektir.

3.5. Yüksek Gerilim Doğru Akım Enerji İletiminde Kullanılan Direkler

Yüksek gerilim doğru akım iletim hatlarında kullanılan direkler daha az iletken taşımaları sebebiyle alternatif akım hatlarını taşıyan direklere göre daha hafif ve ince yapıdadırlar. Böylece yüksek gerilim doğru akım iletim

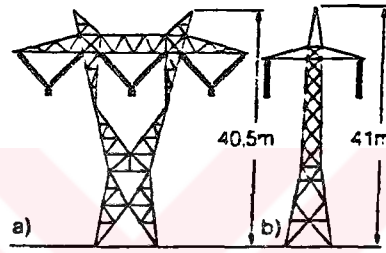
hattı direkleri alternatif akım sistemlerinin direklerine göre daha dar bir arazi şeridi kaplarlar. Dolayısıyla, tarım arazilerinin enerji iletiminden daha az etkilenmesi, istimlak bedelleri yüzünden daha ekonomik olması ve coğrafi kısıtlılıkların bulunduğu arazi şeritlerinde daha kolay tesis edebilmeleri bakımından doğru akım sistemleri oldukça büyük avantajlara sahiptir. Şekil 3.7'de alışılmış bir alternatif akım taşıyıcı direği ve ABD'de uygulanan Square-Butt yüksek gerilim doğru akım iletim sisteminin kapladıkları arazi şeridi görülmektedir.

Bir AC taşıyıcı kulenin yüksekliği yaklaşık 48.8 metre, taban genişliği ise 76.2 metredir. Bu kulelerden iki tanesi yan yana yerleştirildiği zaman taban ölçüleri minimum olarak 103 metre olmaktadır. Bu ölçüler, aynı taşıma kapasitesine sahip bir HVDC sisteminde 33.6 ve 48.8 metredir. Genel olarak, HVDC sistemlerinin AC sistemlerine göre yaklaşık %25 daha az arazi şeridi kapladıkları söylenebilir.



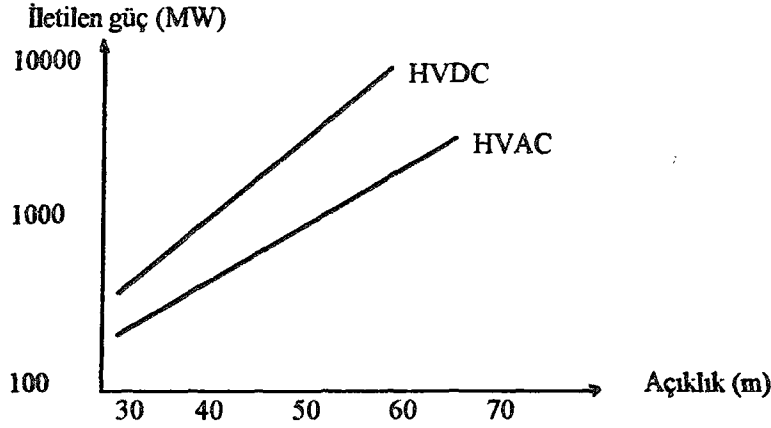
Şekil 3.7. AC iletim sistemlerinde ve HVDC sistemlerinde (en sağda) fiziksel boyutlar.

Kapladıkları arazi şeridinin daha dar olması nedeniyle, yüksek gerilim doğru akım sistemlerinin enerji iletim yoğunluğu AC sistemlerine göre daha yüksektir. Bu yoğunluğu artıran nedenlerden biri de hattan reaktif güç akmaması ve deri etkisinin olmamasıdır. Şekil 3.8.'de de aynı iletim kapasitesi için tasarlanmış, 800 kV 3 fazlı AC iletim için ve ± 500 kV DC iletim için iletim hat direkleri gösterilmiştir.



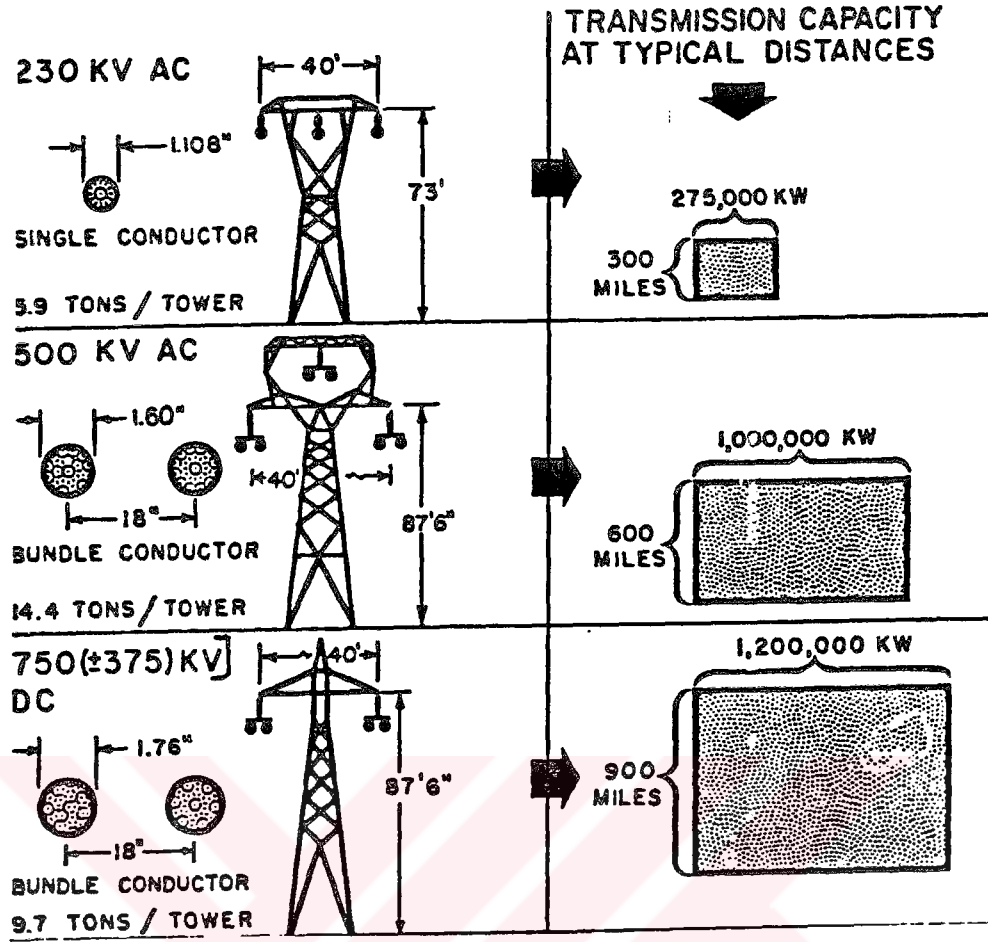
Şekil 3.8. 800 kV 3 fazlı AC iletim (a) ve ± 500 kV HVDC iletim (b) sistemi direklerinin karşılaştırılması

Aynı açıklık için yüksek gerilim doğru akım hatları, 3 fazlı AC iletim hatlarından önemli ölçüde yüksek güç taşınmasına olanak verir. Şekil 3.9.'da açıklığa bağlı olarak her iki sistemin iletim kapasitesinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. 3 fazlı AC sistem ve HVDC sisteminin açıklığa bağlı olarak ekonomik iletim kapasitelerinin karşılaştırılması

Korozyon sebebiyle, Avrupa'da yüksek gerilim doğru akım iletim hatlarında geri dönüş iletkeni olarak toprak kullanılmamaktadır. Çift kutuplu (bipolar) iletim modeli kullanılmaktadır veya akım geri dönüşü için bir iletken çekilmektedir. İletken kırılmalarının dikkate alınmak zorunda olduğu durumlarda az sayıda iletken olsa bile güçlü bir dizaynı gerektirebilir. Demet iletkenlerin kullanılması durumunda genellikle demetteki tek bir iletkenin kırılmasını gözönüne almak yeterlidir. Tek kutuplu hat dizaynı ise alışılmış hat dizaynından oldukça farklılık göstermektedir. Her iki enerji iletim sistem kapasitelerinin karşılaştırılmasına ilişkin bir başka gösterim Şekil 3.10.'da yapılmıştır.

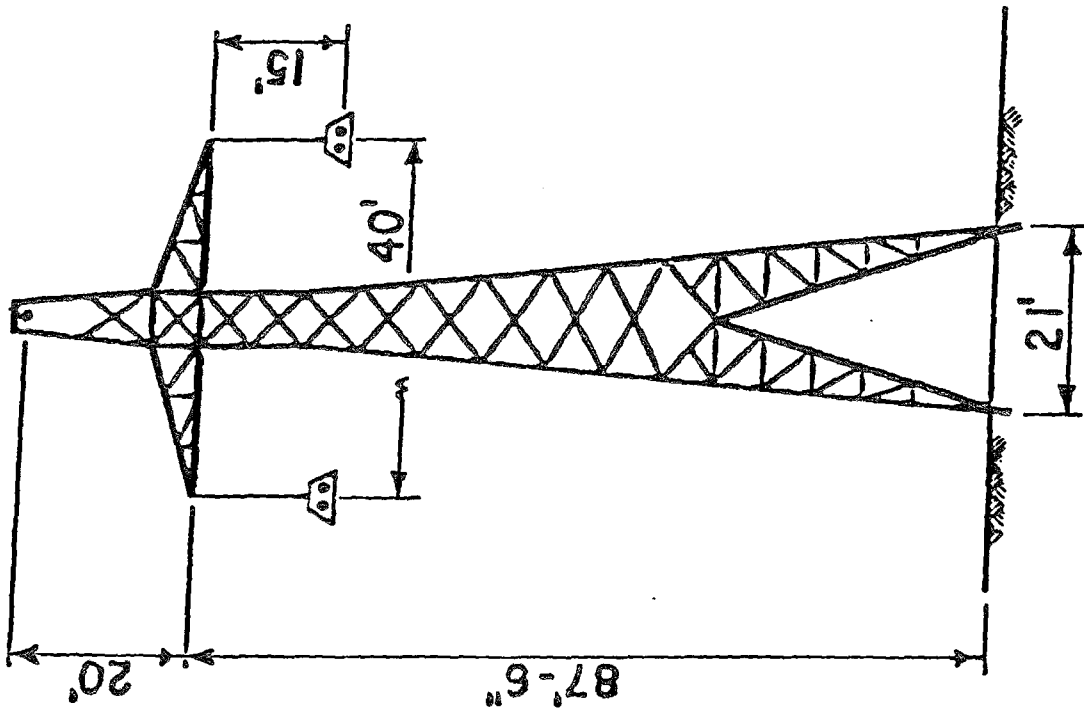


Şekil 3.10. Tek devreli AC ve DC iletim hatlarının kapasitelerinin karşılaştırılması

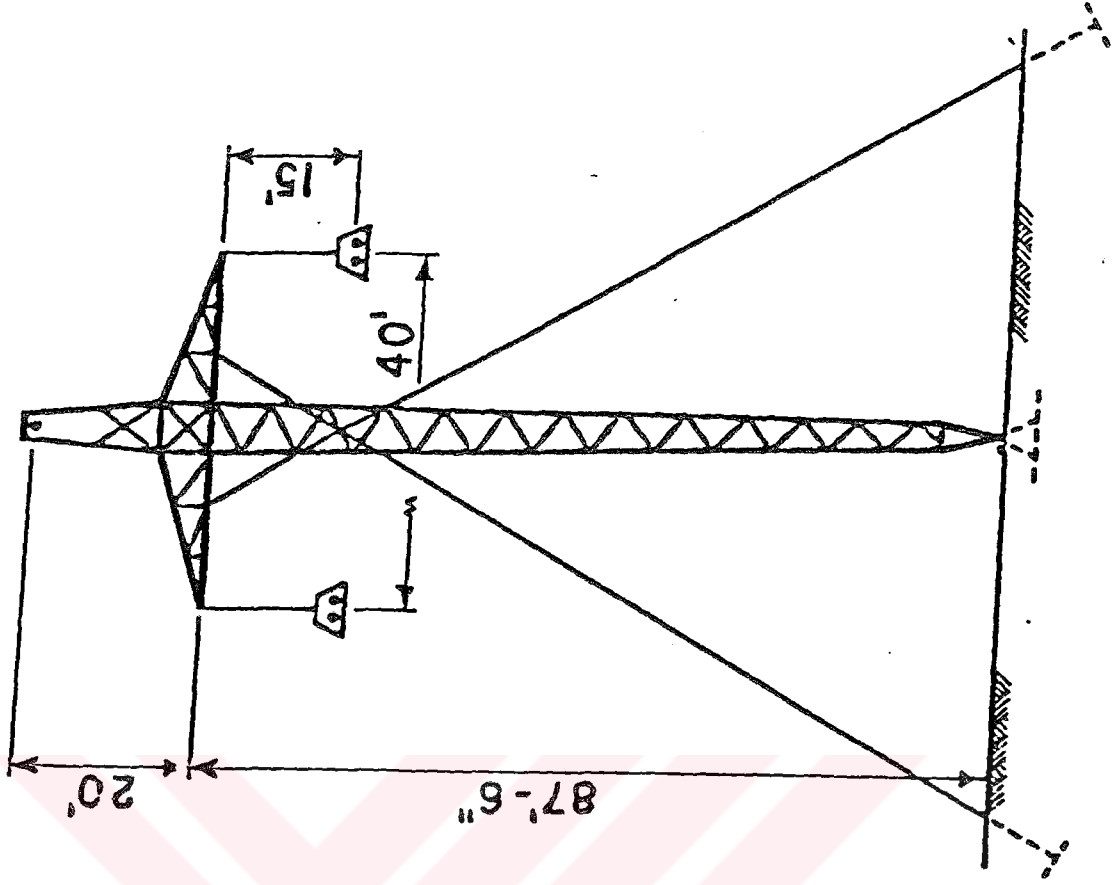
Yüksek gerilim doğru akım iletim hat direkleri için birçok tasarım mevcuttur. Bunlardan bazıları hakkında bir fikir vermek amacıyla Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de iki ayrı direk tipi gösterilmiştir.

Direk tasarımlarındaki bu hafiflik ve ince yapı sayesinde HVDC sistemleri çevre görüntüsünü daha az bozarlar. Metropollerde can güvenliğini tehdit eder bir şekilde yerleşim merkezleri ile iç içe inşa edilmiş AC sistemleri görülmektedir. Fiziksel boyutlarının küçük olması nedeniyle bu iç içelik HVDC sistemlerinde daha azdır.

Ayrıca HVDC sistemleri tarafından yaratılan elektromanyetik gürültü AC sistemlere göre daha azdır [13].



Şekil 3.11. M Tipi doğru akım iletim direği



Şekil 3.12. Yere bağlanarak desteklenmiş doğru akım iletim hattı direği

3.6. Yüksek Gerilim Doğru Akım ile Enerji İletiminde Kablolar

Kabloların birim uzunluklarına karşılık gelen kapasite değerlerinin büyük oluşu ve termik sınırlamalar nedeniyle yükün, doğal yükten çok daha küçük olması alternatif akım kabloları ile yapılabilecek iletim mesafesini düşürür. Buna karşın, doğru akımda sürekli olarak kapasitif yüklenme akımı söz konusu olmadığından pratikte doğru akım kabloları ile iletim mesafesi sınırsızdır. Yani daha iyi bir izolasyona sahip olması ve kapasitif akımların olmaması nedeniyle kablolarla enerji iletimi doğru akımda daha kolaydır. Yine kapasitif yüklenme akımlarının olmayışı kablo tasarımlarını basitleştirmektedir. Deniz altından enerji iletiminde doğru akımla iletim daha ekonomik olmaktadır.

Kablonun maliyetinde önemli bir yer tutan kalın dielektrik tabaka doğru akım kablolarında daha incedir. Deniz altından enerji iletiminde 80 km'den sonra yüksek gerilim doğru akım sistemleri daha ekonomik olmaktadır. Alternatif akım sistemlerinde kullanılan kablolar doğru akım iletim sistemlerinde de kullanılabilirler.

Doğru akım sistemlerinde kablolu iletimde genellikle dört tip kablo kullanılmaktadır.

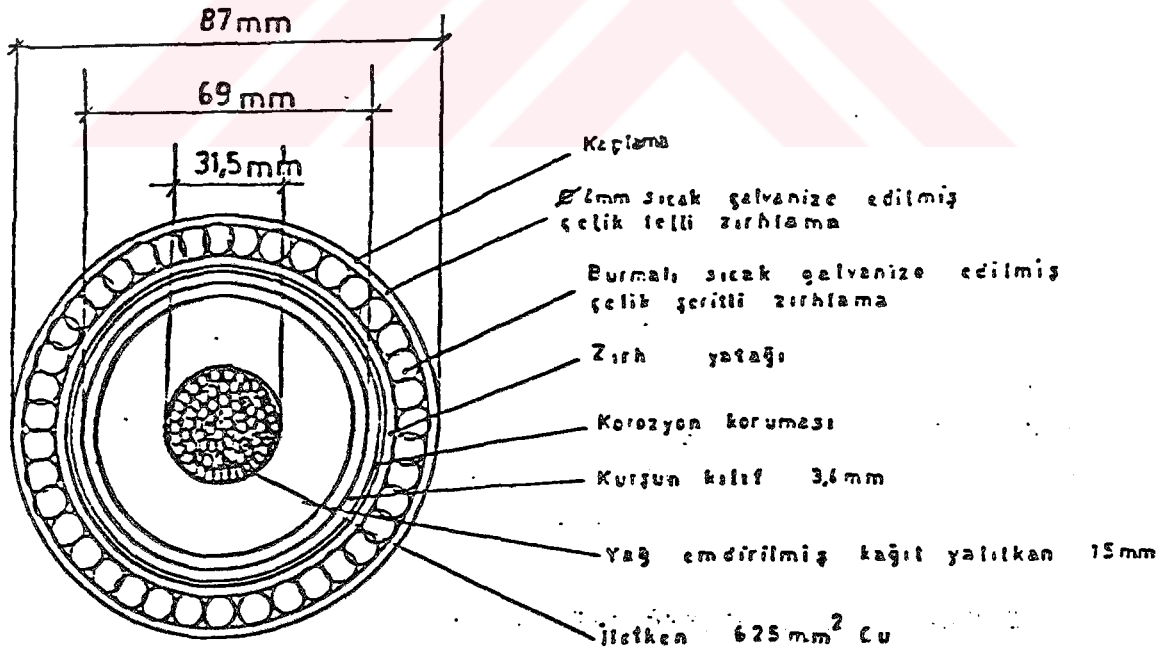
1. Katı Tip Kablolar: Yalıtımı, viskozitesi yüksek yağ emdirilmiş kağıt şeritlerden oluşur. 300 kV'a kadar imal edilirler. İletken sıcaklığı yağ gücünü önlemek için 50°C ile sınırlandırılmıştır. En ekonomik ve en çok kullanılan kablo tipidir.

2. Yağlı Tip Kablolar: Daima yağ basıncı altında çalışan kablolardır. Dayanımları çok yüksektir. Yüksek basınçlar altında çalışırlar. Deniz altı iletimlerinde kullanılırlar.

3. Basınçlı Gaz Tipi Kablolar: Bu tip kablolar orta basınçta yağ yerine gaz kullanımı ile elde edilirler. Bu kablolarda yalıtım, önceden petrol peltesi emdirilmiş kağıt şeritlerle sağlanır. İletkenin merkezi bir gaz borudur ve gaz basınçlı ortamda kullanılır.

4. Plastik Yalıtkanlı Kablolar: Haddeden geçirilmiş plastik yalıtkanlı kablolar genelde alternatif akım iletim sistemlerinde kullanılır. Yüksek gerilim doğru akım sisteminde de uygulamak için denemeler yapılmaktadır.

Doğru akım kablolarında küçük de olsa akan kaçak akımlar iletken ve kılıf arasındaki yalıtkindan akar. Eğer bu akım kılıfa eşit olarak dağıtılırsa akım yoğunluğu korozyona sebep olmayacak kadar düşük olur. İyi bir korozyon koruması için belli bir noktada kılıfı toprağa bağlamak gerekir. Şekil 3.13'de 250 kV'luk Konti-Scan doğru akım iletim hattında kullanılan deniz altı kablosunun kesiti gösterilmiştir.

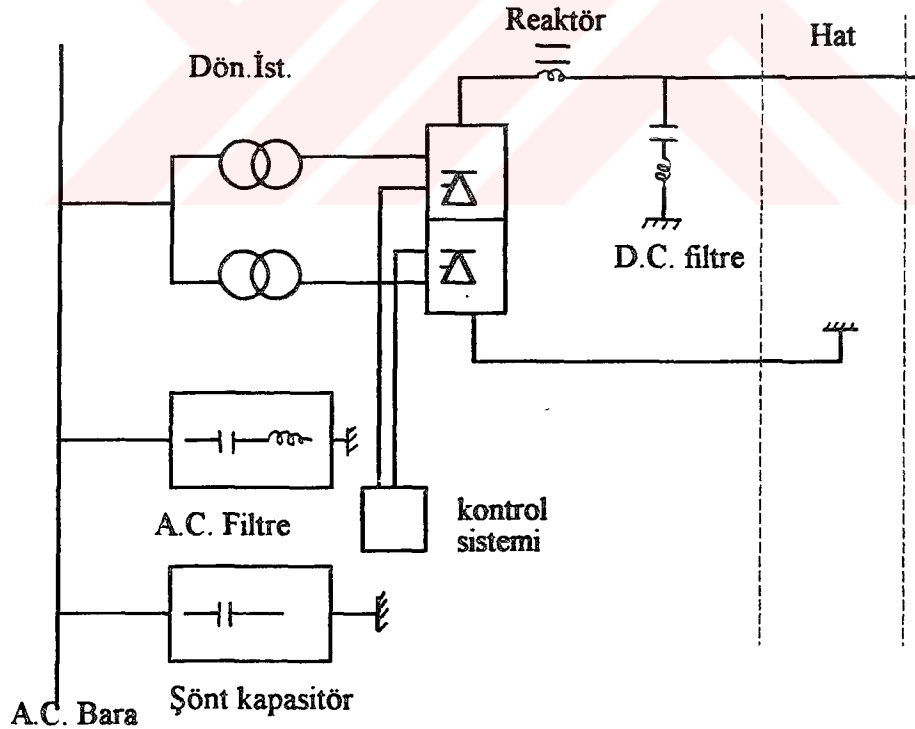


Şekil 3.13. 250 kV'luk Konti-Scan deniz altı doğru akım kablosunun kesiti.

Korozyon koruması kurşun kılıf ile zırh arasında yapılır ve bu koruma aynı zamanda bu iki katman arasında oluşabilecek yüksek gerilimleri de önler. Fuko akımların neden olduğu kayıpların doğru akım kablolarında olmaması nedeniyle zırh olarak çelik teller kullanılır.

3.7. Yüksek Gerilim Doğru Akım ile Enerji İletiminde Kullanılan Donanımlar

Bir yüksek gerilim doğru akım iletim sistemi dönüştürücü istasyonları ve iletim hatlarından oluşur. Dönüştürücü istasyonları da tristörler, valfler, parafudrlar, transformatörler, reaktörler, filtreler, kapasitörler ve kontrol elemanlarından oluşur. Bunlardan parafudrlara daha önce değinilmişti. Şekil 3.14 'de bir yüksek gerilim doğru akım enerji iletim sisteminin ana elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3.14. HVDC sisteminin temel bileşenleri

Şimdi dönüştürücü istasyonlarını oluşturan diğer elemanları inceleyelim. Asıl önemli donanım olan dönüştürücülere de geçmeden önce bunların dışında bir doğru akım iletim sisteminde bulunması gereken elemanları tanıyalım.

3.7.1. Doğru Akım Düzleme Reaktörleri

Doğru akım hava hattı veya kablosu kullanıldığında doğru akımı düzleştirmek ve dışardan karışmalara bağlı gerilim ve akım salınımlarını söndürmek için kullanılan bir reaktördür. Ayrıca doğru akım hattında telefona karışmaları önleyebilmek için süzme devreleri kullanılır. Bu söndürme devresinin ana elemanı kondansatör olup, doğru akım hattı ile toprak arasına bağlanır. Kapasitör birimlerinde gerilimin birimler arasında eşit olarak dağıtılması için dahili ya da harici gerilim bölücülerinin olması gerekir.

3.7.2. Reaktif Güç İhtiyacı ve Şönt Kapasitörler

Dönüştürücünün çalışması için belli bir miktarda reaktif güç gerekir. Bunun nedeni,

a) Yüksek gerilim doğru akım dönüştürücülerinin kontrol etme yöntemi alternatif akım ve gerilimin temelleri arasında faz kayması ile tespit edilir. Bu faz kaymasının büyüklüğü tetikleme açısı α ve söndürme açısı γ 'ya bağlıdır.

b) Doğru akımda komütasyon işlemi bir valften diğerine değiştirilebilir, aynı alternatif akımın yer değiştirmesi başlar.

Aktif ve reaktif güce gelince sadece temel frekans düşünülmelidir. Harmonikler ihmal edilebilir. Dönüştürücü

hem doğrultucu hem de inverter olarak çalıştığı zaman reaktif güç tüketir. Ayrıca dönüştürücünün kendi kendine göre reaktif güç isteği, dönüştürücü transformatördeki belli bir reaktif güç tüketimi vardır.

Doğrultucu veya eviricinin normal değerleri düşünülürse, reaktif güç isteği genellikle iletilen aktif gücün %50-%60'ı kadardır. Bu her bir dönüştürücü istasyon içindir. Gerekli olan bu reaktif güç birçok yoldan üretilir. Bunlar,

- Alternatif akım filtreleri
- Şönt kapasitörler
- Alternatif akım devresinden aşırı reaktif güç
- Statik kompanzatörler
- Senkron kondansatörler

şeklinde sıralanır.

Reaktif güç üretim donanımı seçildiği zaman hem ekonomik hem de teknik yönden düşünülmelidir. Maliyet olarak en ucuz çözüm şönt kapasitörlerdir. Ancak alternatif akım devresi güçsüz ise belki bir senkron kondansatör yerleştirilebilir. Devre dönen bir makina gerektirmiyor fakat biraz hızlı gerilim düzeni gerekiyorsa bir statik kompanzatör tercih edilebilir. Alternatif akım filtreleri de toplam reaktif güç üretimi için belli bir katkıda bulunurlar [9].

3.8. Dönüştürücü İstasyonlar

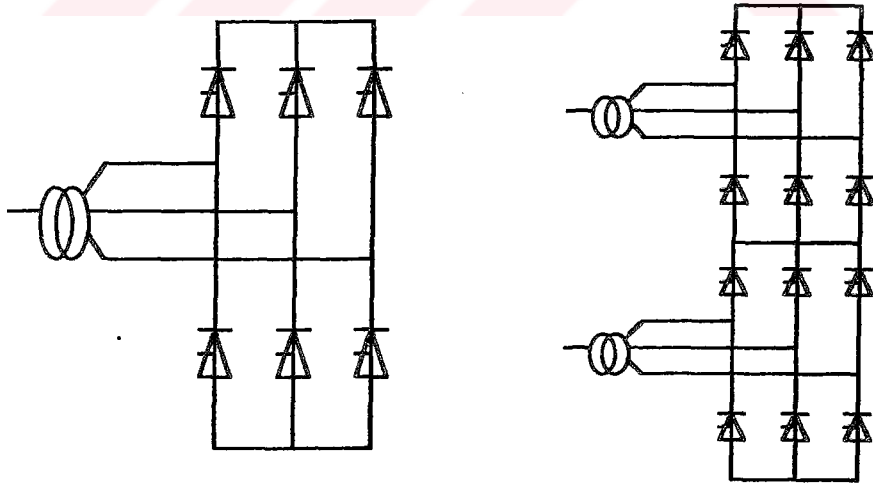
Dönüştürücü istasyonlarında, doğru akım barası bir yanda alternatif akım barası bir yandadır. Doğru akım

tarafında düzleme reaktörü, parafudrlar, gerilim bölücüleri, akım ölçü aletleri ve kesiciler bulunur. Alternatif akım tarafında filtreler, transformatörler ve kesiciler vardır.

Dönüştürücü transformatörü ve düzleme reaktörleri bina duvarına yakın olarak yerleştirilmiş olup soğutma sisteminin vantilatörleri tabanda bulunmaktadır.

3.8.1. Dönüştürücü Elemanlar

Dönüştürücü istasyonlarının en önemli elemanları 3 fazlı tam dalga köprüleri için yerleştirilmiş yarıiletken elemanlardır. Bu yarıiletken elemanlar alternatif gerilimin doğru gerilime veya doğru gerilimin alternatif gerilime çevrilmesini sağlarlar. Transformatörler ise alternatif akım sistemini doğru akım sisteminden ayırarak uygun bir gerilim oranıyla istenen doğru gerilime çevirir. Şekil 3.15'de 6 ve 12 darbeli dönüştürücüler gösterilmiştir.



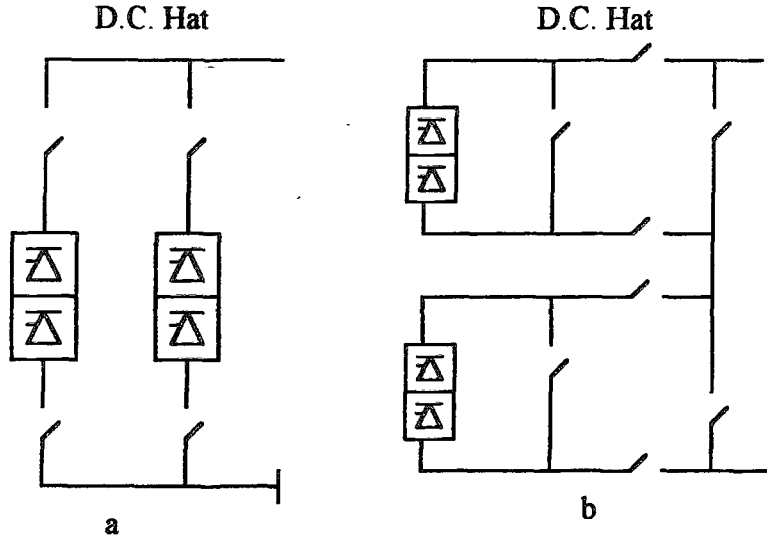
Şekil 3.15. 6 darbeli dönüştürücü (a) ve 12 darbeli dönüştürücü (b)'nin yapısı

Ekonomik bir doğru akım iletim gerilimini elde edebilmek için dönüştürücü sistemde çok sayıda seri bağlanmış tristörler kullanılır. Böylece, dönüştürücü elemanların her münferit uygulama için en ekonomik iletim gerilimine bağlanabilmesi imkanı elde edilir. Fiziksel olarak bir, iki ya da dört valf bir tek yapıda birleştirilebilir.

3 faz tam dalga köprü, 6 tristörlü valften veya civa buharlı valflerden meydana gelir. Valfler sadece bir yönde akımı iletebilir. Kontrol darbeleriyle tetiklenen bir yarıiletken eleman (yani akımı iletmeye başladığı an) iletimde olduğu zaman karşı valfin iletim yönünde geriliminin pozitif olması gerekir. Valf akımı iletmeye başlar başlamaz akımın büyüklüğü valf dışındaki ana devreler ile belirlenir. Dış etkinin azalmasıyla ve akım sıfırdan geçmeye başlayıncaya kadar devamlı olarak akar. Böylece bir yarıiletken eleman için aşağıdaki üç durum tanımlanabilir.

- İleri tıkama aralığı
- İletim aralığı
- Geri tıkama aralığı

Şekil 3.16'da dönüştürücülerin bir kutuplu bağlantısı gösterilmiştir. Bir 12 yollu dönüştürücü iki adet 6 yollu dönüştürücünün seri bağlanmasından meydana gelir. Köprülerin her biri transformatör ile alternatif akım devresine bağlanır. Bu transformatörlerden biri yıldız-yıldız diğeri yıldız-üçgen (üçgen bağlama doğru akım tarafında olmak üzere) bağlanır. Böylece 6 yollu dönüştürücü 12 yollu dönüştürücüye çevrilir.



Şekil 3.16. Dönüştürücülerin bir kutuplu paralel (a) ve seri (b) bağlantısı

Terminal çift kutuplu bir hattı beslediğinde her kutup diğerinden bağımsız olarak çalıştırılabilir şekilde düzenlenir. Bir kutbun devre dışı kalması halinde bu kutba bağlanan cihazların diğer kutbun çalışmasına engel olmaması düşünülerek sistem kurulur. Kutbun çekeceği güç bir blok için çok fazla ise birçok 12 yollu dönüştürücünün seri veya paralel bağlanmasıyla ve bağımsız işletiminin sağlanmasıyla kutbun çekeceği güç artırılabilir.

Valf söndürme devreleri normal olarak valfin içinde bulunmaktadır. Eğer düşük bir radyo gürültü seviyesi istenirse, valfe bağlanan iletkenlere ilave yüksek frekans reaktörleri konması uygun olabilmektedir. Daha önceki projelerde kullanılan civa buharlı valf tekniğinin tristörlü valf tekniğine dönüşmesinin nedenleri özetle şunlardır.

Tristörler yarıiletkenlerdir. Bakım gerektirmezler ve son derece yüksek hızlı elektronik anahtarlar olarak çalışırlar. Tristörler hem yüksek gerilim DC iletimde hem de statik VAR kompanzasyon tesislerinde kullanılırlar. Yeni

geliştirilmiş çok yüksek güç tristörleri basit dizaynlıdır, böylece güvenilirlik ve ekonomik verimlilik artmaktadır.

Tristörler bir yüksek gerilim DC konverter transformatör merkezinin bileşenleri olarak AC'yi DC'ye ve DC'yi AC'ye çevirirler. Büyük miktarlarda enerjinin uzak mesafelere ekonomik iletimine katkıda bulunurlar ve frekans ve gerilimleri farklı elektrik güç sistemlerine bağlamak için kullanılırlar. Bir DC ara devre vasıtasıyla iki güç sistemini bağlamanın bir sonucu olarak sadece aktif güç iletilir. Bundan dolayı çok yüksek kısa devre değerli iki güç sistemi bir yüksek gerilim DC hat vasıtasıyla bağlandığı zaman bir güç sisteminden diğerine kısa devre akımı akmaz.

Statik VAr kompanzatörlerde kullanılan tristörler, iletim kayıplarını ve gerilim dalgalanmalarını düşük tutmaya ve böylece güç sistem kararlılığını artırmaya katkıda bulunurlar.

Tristörler son derece güvenlidirler. Üretim aşamasındaki testlerle bu güvenilirlik sağlanır. Çok hızlı, mikrosaniyeler içinde cevap verirler. Böylece yüksek gerilim DC iletim ve statik VAr kompanzasyon tesisleri için tüm dinamik gereksinimleri karşılarlar.

Kompakt dizayn ve düşük yarıçapa rağmen 4000 A ve 8 kV'a kadar gerilim değerli güçlü tristörler yapılabilir.

Tristörlerin mekanik olarak hareketli parçaları olmadığı için aşınmaya maruz kalmazlar. Onların pozitif karakteristikleri yıllarca ağır çalışma şartlarında bile sağlanır. Tristörler kurum veya egzost gazı gibi reaksiyon ürünleri üretmeksizin çalışırlar ve su soğutmalıdırlar. Problemlili yalıtım malzemeleri kullanılmadığından dolayı insan ve çevre üzerinde zararlı etkileri olmaz.

Civa buharlı valflerde sık sık rastlanan geri tepmeler tristörlerde bulunmaz.

Tristör valflerinin servis gereksinimi civa buharlı valflerle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. Eğer bir tristör bozulursa tıkanma kapasitesi çözülür ve daha önceki gibi aynı şekilde akım iletmeye devam edebilir. Böylece, birkaç tristörün hatası tüm sistemi etkilemez. Gerekli bazı ekstra tristörler valf tasarımıyla ilave edilebilir.

Yüksek gerilim doğru akım donanımında kullanılan tristörler için en önemli istek, valfin sadece iletim yönü olarak tanımlanan bir yönde akım iletebileceğidir. Normal çalışmada akımın genliği dönüştürücü biriminin doğru akımıyla aynıdır.

Yüksek gerilim doğru akım uygulamaları için kullanılan valfler kontrol edilebilen valflerdir. Bunun anlamı, yalıtkan olan valfin ileri tıkanma gerilimi denilen ileri yönde karşı gerilimi tutabilmesidir. Tıkanma koşulundan iletim koşuluna geçiş valfe bir kontrol darbesi verilmesi ile oluşur (tristörlere tetikleme darbesiyle) ve normal olarak valfin içinden geçen akım sıfır oluncaya kadar iletimde kalır. Diğer bir deyişle valf kendi kendini kapayamaz.

Valf asla karşı yönde akım iletmez. Valf maksimum tıkanma gerilimi için tasarlanır ve valflerin korunması için tesis edilen durdurucuların koruma seviyesi ile belirlenir.

Valf aynı zamanda aşırı akım koşulları için de tasarlanır. Maksimum aşırı akım valf içindeki doğru kısa devre için var olur ve iletkenliği ise dönüştürücü transformatörün reaktansı ile belirlenir. Tristörlerde gereksiz aşırı gerilimleri önlemek için tristörlerin hepsi birlikte tetiklenmelidir. Işık kılavuzları her bir tristörün tetikleme darbelerini taşımak için

kullanılabilir. İleri yönde tristörü aşırı gerilimden korumak için her bir tristör için özel kontrol düzenlenir.

3.8.2. Dönüştürücü Elemanların Soğutulması

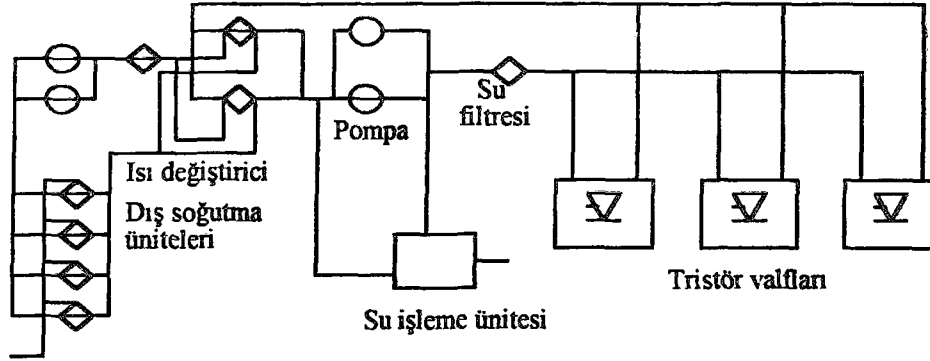
Bir tristörün gerilim kapasitesi göbeğin sıcaklığına bağlıdır. Bu yüzden tristör göbekleri yeter derecede soğutulmalıdır. Sadece nominal akımdaki değil aynı zamanda kısa devreler ve aşırı akımlar da göz önüne alınmalıdır. Kısa süreli aşırı akımların sebep olduğu ani sıcaklık artışı dış ortama bağlı değildir. Sıcaklık artışı ısı kapasitesine ve tristör göbeğine en yakın soğutucunun ısıl iletkenliğine bağlıdır.

Yüksek gerilim doğru akım sistemlerindeki tristör valfleri için ilk standart soğutma şekli olarak hava ile soğutma kullanılmıştır. Düşük akım çıkışları için daha doğru bir soğutma şeklidir. Ancak daha sonraları yapılan araştırmalar sonucu sıvı ile soğutmanın yüksek gerilim doğru akım sistemleri için daha verimli olduğu saptanmıştır. İlk sıvı ile soğutma da transformatör yağı ile gerçekleştirilmiştir. Sonraları ise daha gelişmiş bir yöntem olan iyonsuzlaştırılmış su ile soğutma kullanılmıştır.

Su, havadan ısı kapasite yönünden 5000 kat daha iyidir ve iyonsuzlaştırma sayesinde yüksek elektriksel direnç elde edilir. Ayrıca, su soğutma sisteminin tasarımı oldukça basittir. Su ile soğutma, tristör valflerinin kompakt dizaynına olanak tanır ve ilave olarak soğutucuların, tüm sistemin çalışma koşullarından bağımsız olarak bakımına imkan verir.

12 darbeli bir dönüştürücünün tristör valfleri için tamamen su ile soğutma sisteminin temel ilkesi Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Suyun iyonunu gidermek ve oksijen

miktarını sınırlamak için özel bir su işleme ünitesinde katkısız su sistemi kullanılır.

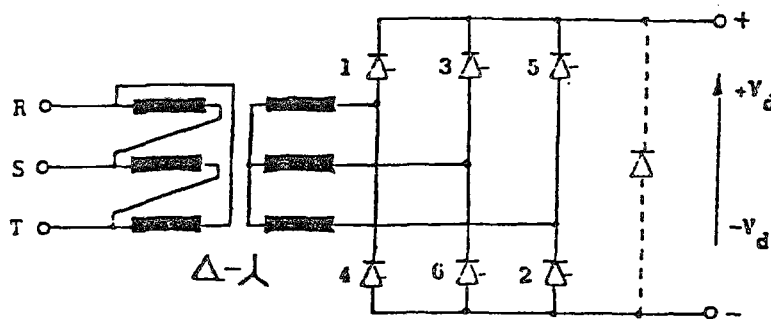


Şekil 3.17. 12 darbeli bir dönüştürücünün tristör valflerinin su soğutma devresi

Soğutma kulelerini içeren sistemin dış kısmı hem hava hem de su soğutmalı sistem için aynı olabilir ve yöresel koşullara bağlıdır.

3.9. Doğrultucular

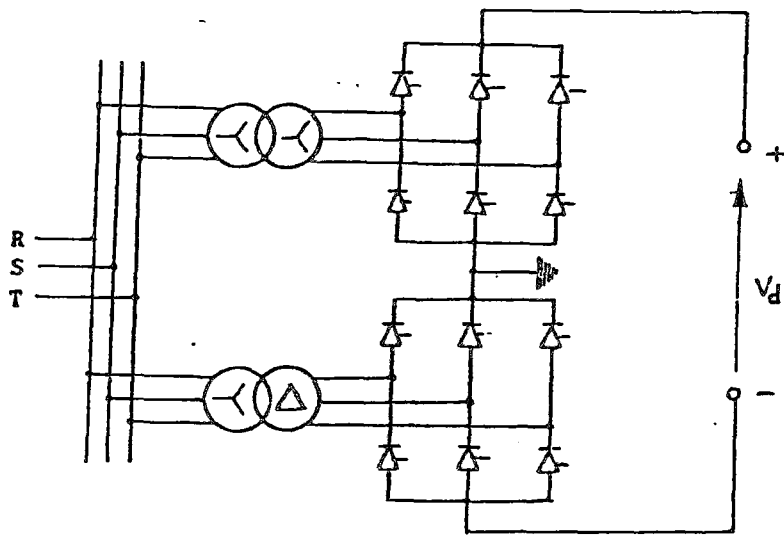
Alternatif dalgayı doğru dalgaya dönüştüren elemanlardır. Genellikle köprü tipinde çevirici kullanılır. Çünkü bu tip devrelerin transformatör kullanılması ve valf gerilimi bakımından üstünlükleri vardır. Şekil 3.18'de basit 3 fazlı köprü gösterilmiştir.



Şekil 3.18. 3 fazlı köprü çeviricinin bağlantı düzeni

Bu köprü, üçer valflik iki grubun alternatif akım taraflarından paralel bağlanmasıyla oluşmuş çift üç yollu bir köprü çeviricidir. Bu şekilde ters yönlü gerilim dalgaları da doğrultulduktan sonra doğru akım tarafına geçirilmekte ve doğru yönlüler ile seri toplanmaktadır. Böylece bu iki valf grubu 6 fazlı bir çevirici gibi görev yapar. Valfler civa buharlı ise bu altı valfe bir valf daha eklenir. Bu yedinci valf doğru akım tarafının (+) ve (-) uçları arasında doğrudan bağlanır. Normal çalışmada ızgara kumandası yardımıyla çalışmaması sağlanır. Buna karşılık bir valfte arkın geri dönmesi gibi bir iç arıza olduğu zaman arızalı valf kısa bir süre için kısa devre edilerek bu yedek valf işletmeye sokulur. Fakat tristörlü valfler kullanılırsa bu yedinci valfe gerek yoktur.

Bu altı valflik dönüştürücülerden iki ayrı grup alternatif akım tarafında bir araya getirilebilir. Burada kullanılan transformatörlerden biri yıldız-yıldız diğeri ise yıldız-üçgendir. Doğru akım tarafında seri bağlanan grup 12 fazlı bir dönüştürücü gibi çalışmaktadır. Şekil 3.19'da 3 fazlı çift köprü doğrultucunun bağlantısı verilmiştir.



Şekil 3.19. Üç fazlı çift köprü doğrultucunun bağlantı düzeni

Izgara ya da kapı kumandasıyla valflerin açısı 0° ile 180° arasında değiştirilebilir. Bu açının değeri 90° 'den büyük olduğu zaman doğrultulmuş gerilimin yönü değiştirilmiş olur. Bu durumda evirici çalışmaya geçilir. γ söndürme açısının varlığı nedeniyle her fazda o fazın gerilimine göre geride kalan bir alternatif akım akar. Bu durumda doğrultucu reaktif güç çeker. Doğrultulmuş gerilimde ateşleme açısı bir düşme, sönüm açısı ise bir yükselme oluşturur.

3.10. İnverterler (Eviriciler)

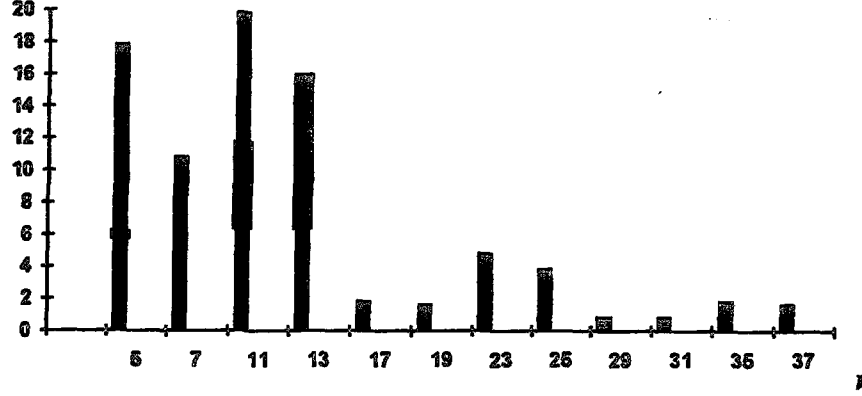
Doğru akımı alternatif akıma çeviren elemanlardır. Izgara kontrolü ya da kapı kumandası dediğimiz sistemler aracılığıyla gecikme açısını, ortalama gerilim negatif oluncaya kadar değiştirme olanağı vardır. Bu negatif gerilimle valfler ters olarak hareket ettirilebilmekte ve gücün, çeviricinin doğru akım tarafından alternatif akım tarafına iletilebilmesi sağlanmaktadır. Böylece "evirme" işlemi meydana gelmektedir. Bu şekilde işleyen çeviriciye de "evirici" adı verilir.

Eviricinin başarılı olarak çalışması için gecikme açısının değeri $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ olmalıdır.

3.11. Alternatif Akım Filtreleri

Alternatif akım şebekesinde çeşitli mertebelerde ortaya çıkan harmonik akımları, kullanılan çeşitli büyüklüklerde şönt filtreler tarafından kısa devre edilerek önlenebilir. Bölgesel rezonans dolayısıyla, konverter istasyonlarından çok daha uzak mesafelerde bir takım harmonikler meydana gelir ki, bunlar önceden bilinemez, sadece ortaya çıktıkları alanda kuvvetlenirler. Şekil 3.20'de harmonik akımların büyüklüğü gösterilmiştir.

Harmonik akımlar



Şekil 3.20. Harmonik Akımlar

$n=k.6\pm1$, $k=1, 2, 3, \dots$ (6 darbelide alternatif akım harmonikleri) olmak üzere n .harmoniğin etkin değeri,

$$I_n = (I_1/n) \cdot k_n \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. Burada,

I_1 : Alternatif akım tarafındaki faz akımının temel bileşeni

k_n : Azaltma faktörü'dür.

k_n ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$k_n = f(I_d, x) \quad (3.2)$$

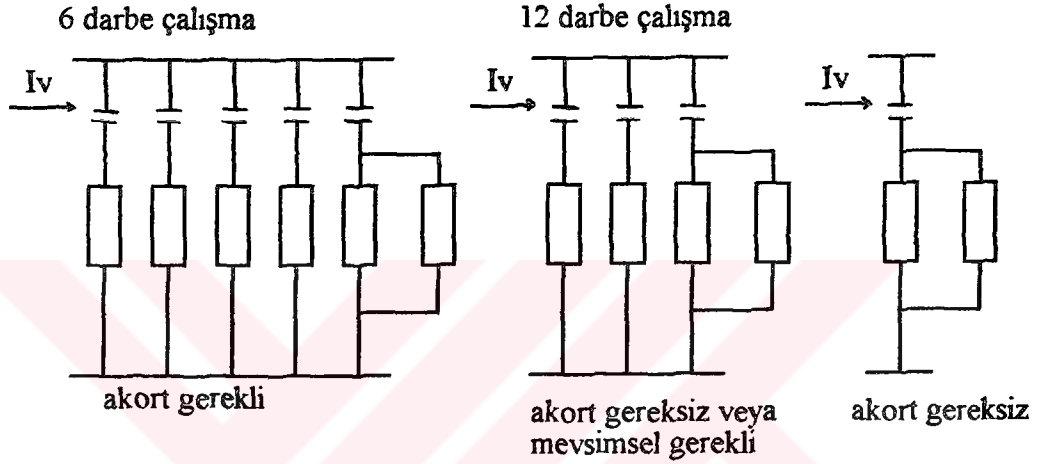
yani k_n , I_d ve x 'in bir fonksiyonudur. Burada,

I_d : Doğru akım

x : Herbir fazdaki eşdeğer reaktansdır.

Alternatif akım şebekesine giren harmoniklerin miktarını sınırlamak için konverter istasyonlarında bazı

önlemler alınabilir. Bir seri filtre kullanımı ile alternatif akım şebekesi dışındaki harmoniklerin önlenmesi mümkün olabilmektedir. Örneğin, Cahora Bassa HVDC sisteminde, 6 darbeli çalışma, beşinci, yedinci, onbirinci ve onüçüncü harmoniklerin filtrelenmesi ve bir yüksek geçiş gerekmiştir. Ayrıca filtre devreleri yük altında ayar (akort) için donatılmıştır. Şekil 3.21'de filtre devrelerinin gelişim aşamaları açıklanmaktadır.



Şekil 3.21. 6 darbeden 12 darbeye filtre devrelerinin basitleştirilmesi

Altı yollu köprü beşinci, yedinci, onbirinci, onüçüncü, ondokuzuncu, ... mertebeden akımlar üretir. Oniki yollu bir çevirici sistemin harmonik akımları ise onbirinci, onüçüncü, yirmiüçüncü, yirmibeşinci, ... mertebededir. Oniki yollu çeviricide oluşan harmonik akımlarının genliği ve sayısı altı yollu çeviricinininkinden daha azdır. Oniki darbeli çalışma şekline sahip konverterlerde beşinci ve yedinci harmonik için filtre devreler gerekmez. Doğru akım tarafındaki gerilimin de altıncı bileşeninin olmaması istasyonlarda filtre boyutlarının küçülmesine ve dolayısıyla maliyetlerin azalmasına imkan verir.

Konverterler doğru akım tarafında da gerilim harmoniklerine sebep olmaktadır. İstenmeyen akımların

oluşmasını önlemek için bir seri düzenek bağlanır. Şayet gerekirse etkisi, hat tarafında bir şönt filtre ile artırılabilir.

Uygun değerlerle yüksek geçişin eşsiz kullanımı ile rezonans sırasındaki frekans yoğunluğundan kaçınılır. Sonuç olarak, alternatif akım filtreleri basitleştirildi ve sistem güvenilirliği artırıldı. Yük altında akort artık gerekmemektedir. Bu filtre sistemi ilk defa Nelson River HVDC sistemini kuzey istasyonunda ve Acaray ve Duernrohr projelerinde kullanıldı. Kol başına artan güçle aynı anda filtre kollarının azaltılmasının teknik avantajları vardır ve gerekli olan alanı azaltır. İlave olarak basit düzenlemelerle daha az bileşenle tüm sistemin güvenilirliği artırılabilir. Sistem çok düşük bir distorsiyon seviyesi gerektirdiği zaman yeni geliştirilmiş çift akortlu filtre devreleri kullanılır. Bu filtre devreleri bir filtre devre sistemindeki rezonansın birkaç noktasının ekonomik kombinasyonuna izin verir.

Doğru gerilim ve şebeke akımındaki harmoniklerde en önemli faktör çeviricinin yol sayısıdır. Zira yol sayısı ortaya çıkan harmoniğin numarasını belirler. Darbe sayısının ve dönüştürücü transformatörünün bağlantı şeklinin uygun seçilmesiyle de bazı harmonikler ortadan kaldırılabılır.

Komütasyon devresindeki reaktanslar şebeke akımının büyük numaralı harmoniklerini zayıflatırlar. Bu reaktanslar komütasyon sırasında ani akım değişimlerine engel olurlar.

Filtreyi oluşturan elemanların değerleri, süzecekleri harmonik bileşen mertebesine, akıma, gerilime ve güce bağlı olarak değişir. Aynı şekilde değişik bağlantılar da kullanılabilir [14].

3.12. Yüksek Gerilim Doğru Akım İletim Hatlarında Korona Olayı

Eğrilik yarıçapı nispeten küçük olan elektrodalarda görülen, tam olmayan ve kendi kendini besleyen deşarja "korona deşarjı" denir. Gerilim yavaş yavaş artırıldıkça elektrodların yakınındaki alan o derece yükselir ki çarpma suretiyle iyonizasyon başlar. Böylece elektrodları kuşatan ince tabakada tam olmayan deşarj için gerekli şartlar sağlanmış olur. Hatların çevresi korona adı verilen ışıklı bir alan ile kuşatılır. Gerilimin artması ile akım da artacağından iletken ışıklı bir zarla örtülür ve cızırtılar duyulur. Akımın daha da artmasıyla ışık saçılımı artar, ön deşarj ve kıvılcımlar oluşur, sonuçta korona deşarjı meydana gelir.

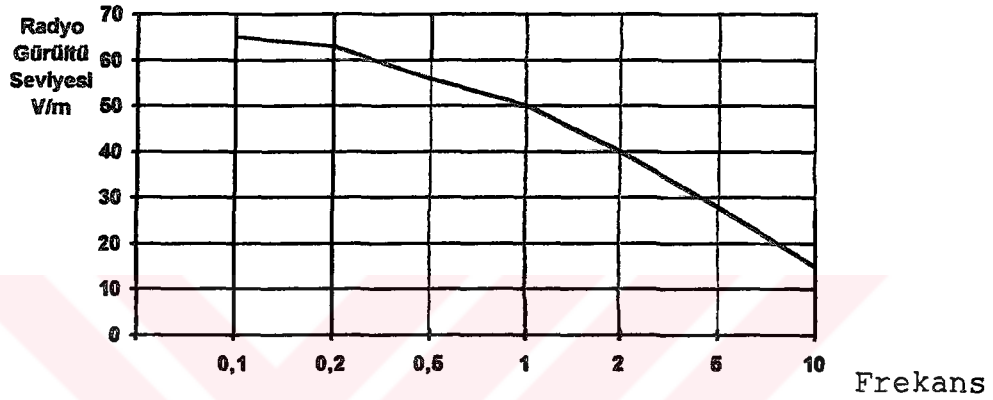
Doğru akımdaki korona kayıplarına ilişkin ilk denemeler test hatları üzerinde yapılmıştır. Bunlar araştırma ve laboratuvar çalışması niteliğindedir. Ancak bu deneyler tüm hava koşullarında ve çok yüksek gerilimlere çıkılarak yapılmamıştır. Doğru akımdaki korona kayıpları yağmur, kar gibi kötü koşullarda artar. Deneyler sonucunda doğru gerilimdeki korona kayıplarının alternatif akımdakine nazaran daha az olduğu ve hava koşullarının bozulmasıyla da bu durumun doğru gerilim lehine değiştiği görülmüştür.

3.13. Yüksek Gerilim Doğru Akım Hava Hatlarında Görülen Radyo Parazitleri

Bir yüksek gerilim doğru akım hava hattında radyo parazitleri oluşmasının üç nedeni vardır.

- Valflerin ateşlenmesi ile oluşan darbeler
- Hattaki korona darbeleri
- İzolatörlerdeki kısmi deşarjlar

Radyo parazitleri genellikle pozitif yüklü iletken için etkin olup, negatif yüklü iletken için çoğu kez ihmal edilebilir. Negatif kutbun toplam korona kayıpları pozitif kutba göre daha büyük olsa bile negatif darbeler genelde efektif değer olarak çok küçüktür. Şekil 3.22'de korona olayında oluşan parazitlerin tipik frekans spektrumu gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Bipolar doğru akım hattından 30 m uzakta ölçülmüş parazitlerin frekans spektrumu

Tek bir iletken yerine aynı toplam kesite sahip bir demet iletken kullanımı radyo parazit seviyesini düşürür. Birçok durumda rüzgar, kar vs. gibi kötü hava koşullarında parazit seviyesi düzensiz bir şekilde artar.

3.13.1. Radyo Parazitleri İçin Alınan Önlemler

Radyo parazitlerini önlemek için aşağıdaki tedbirler alınabilir.

- Tesis yerinin bir vadi olarak seçilmesi
- Manevra istasyonunun izolasyon tipinin radyo parazitlerini önleyecek şekilde seçilmesi

- Çevirici istasyonundaki iletkenlerin boyları ve yüksekliklerinin sınırlandırılması, topraklama iletkenlerinin istasyon dışında tesis edilmesi, bağlantılarda yer kabloları döşenmesi

- Tristör köprülerinin yerinin elektromagnetik radyasyonu engelleyecek şekilde tasarlanması

İstasyon civarında çok düşük seviyede radyo haberleşme işaretleri alınıyorsa radyo parazitinin önlenmesi için katod reaktörleri ve söndürücülerin kullanımı, iletkenler ve toprak arasında RC devreleri, çıkış iletkenlerinde filtreler kullanılması veya çevirici bölgesinin perdelenmesi fayda sağlamaktadır. Bu tür alınacak önlemlerle radyo paraziti seviyesi kolaylıkla istasyondan 300 m uzaklıkta 1 V/m'de 50 dB'in altına getirilebilir.

3.14. Yüksek Gerilim Doğru Akım Tesisleri İçin Koruma

Koruma sisteminin ve transformatör merkezi kontrolünün en önemli bileşenleri, açık ve kapalı çevrim kontrolleri ve bir yüksek gerilim doğru akım tesisinin koruma ekipmanlarıdır. Alternatif akım ve doğru akım çözümlerinin maliyetleri dikkate alındığında en çok yüksek gerilim doğru akım projeleri tatminkar bulunmuşken, doğru akım bağlantısı boyunca güç akışının kontrol edilebilirliği dikkate değer ilave bir avantaj olmaktadır. Alternatif akım sistemi ihtiyaçları ile uyumlu bir bağlantı için güç tertibinin modülasyonu, telekomünikasyon mevcut olduğunda daha etkin bir koruma ve kontrol başarılabilmesine rağmen, doğrultucu ve inverter arasında hiçbir telekomünikasyon tesisine sahip olmayan bağlantılar üzerinde bile uygulanabilmektedir.

Kesin bazı istisnai durumlar hariç bir HVDC tesisinin koruma prensibi bir yüksek gerilim iletim sistemi korumasıyla tamamen aynıdır. Bu ana korumanın ve yedek

korumanın yapısında açık olarak ifade edilir. Esas olarak, sürekli hal koruyucu röle ekipman program sistemleri kullanılır.

3.14.1. Koruma Bölgeleri

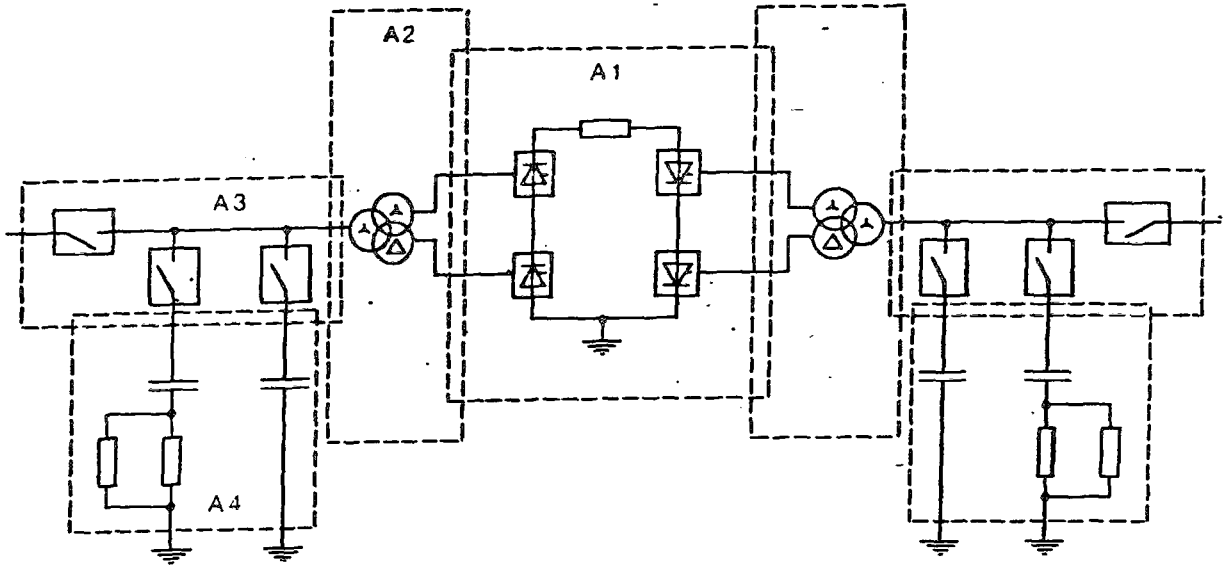
HVDC tesislerinde elektronik koruma röleleri kullanılır. Gelişmeyle birlikte dijital koruma ekipmanları bunların yerini almaktadır. Bir yüksek gerilim doğru akım ard arda (back to back) istasyonunun koruma alanı temel olarak üst üste binen dört bölgeye ayrılmıştır (Şekil 3.23).

- Konverter koruması
- Konverter transformatörü koruması
- Bara koruması
- Filtre devresi ve kondansatör grubunun koruması

Herbir bölgenin koruma cihazları, kendi kendine yeter bağımsız ünitelerdir. Tarama, değerlendirme ve sinyalleme için ayrı kanallara sahiptirler. Onlar, sadece seçici (selektif) programlamaya göre çalışırlar. Aşağıda açıklanan koruma kavramı bir HVDC ard arda istasyonuna uygun tiptedir. Doğrultucu ve konverter birbirine bitişik yerleştirilir ve doğru akım bağlantılar konverter valf odası içinde yapılır.

Denizaltı kabloları veya hava hatları vasıtasıyla uzun mesafeli HVDC güç iletimi için ilave koruma bölgelerine ihtiyaç duyulur. Bu bölgeler,

- DC şalt sahası koruması
- DC hat koruması



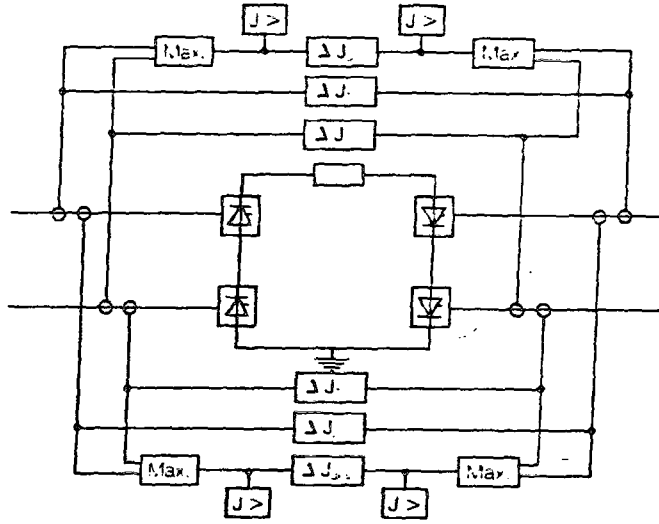
Şekil 3.23. Bir HVDC ard arda istasyonunun koruma bölgeleri

- A1: Konverter koruması
- A2: Konverter transformatörü koruması
- A3: Bara koruması
- A4: Filtre koruması

3.14.2. Konverter Koruması

12 darbeli bir konverter köprüsünün güvenilirliğini artırmak için koruyucu ekipman bir yedek dizayna da sahiptir. Bu sistem, bir köprü diferansiyel koruma, bir tüm diferansiyel koruma ve bir aşırı akım zaman koruması içerir (Şekil 3.24).

Koruyucu ekipman çok adımlı bir yapıya sahiptir. Açma değerleri ve tetikleme zamanları çeşitli arıza olasılıklarına göre ayarlanır. Örneğin, tesis, komütasyon hataları olması durumunda durdurulmaz. Arıza giderilinceye kadar akım, konverter kontrolü vasıtasıyla %20-%30'a indirilir. Milisaniyeler sonra normale döner ve bu durumda normal çalışma yeniden başlatılabilir.



Şekil 3.24. Konverter koruması

DC devredeki herhangi bir yalıtım arızası yüksek akımlara neden olabilir. Aşırı akım koruması bu arızayı görür ve sistem güvenli olarak durdurulur. Yüksek gerilim tarafında düzleme reaktörünün tertibi, mevcut konverter koruma ekipmanı ile reaktörün koruması avantajına sahiptir. Böylece, düzleme reaktörünün her muhtemel arızası (toprak arızası vs.) bir konverter arızası olarak aynı etkiye sahiptir. Toprak tarafında düzleme reaktörünün daha ekonomik düzenlenmesiyle ilave bir toprak arıza koruması sağlanır.

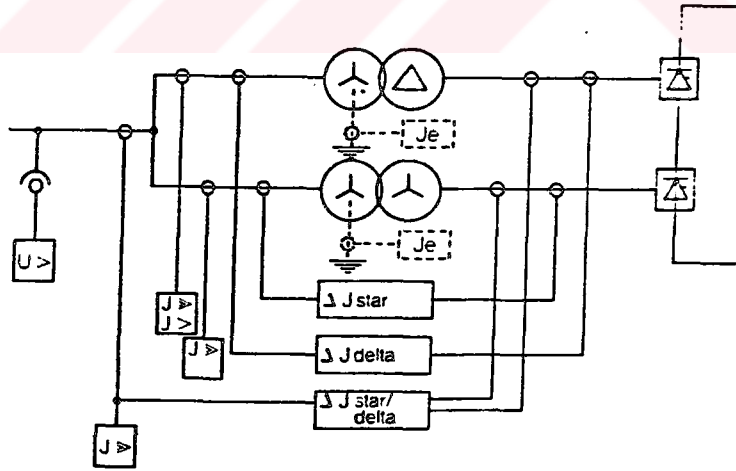
Yukarda tanımlanan koruma rölesinin yanında, konverter valfi ilave HVDC spesifik tristör koruma ekipmanı sağlar. Her tristör, koruyucu ateşleme diyoduna sahiptir (BOD= Break Over Diode). Bu koruyucu ateşleme diyonu, tristör elektroniği arızalandığı zaman veya tristördeki gerilim izin verilen pozitif tutma gerilimini aşmadan önceki geçici aşırı gerilimlerde tristörü ateşler.

Köprü kolunun merkezi olarak ateşlemesi ilave bir korumadır. Bu ateşleme sistemi, belirli sayıda tristörde gerilim yükselmesinin izin verilen dikliği artırıldığı zaman harekete geçirilir. Yani, tüm köprü kolu için komütasyon arızası tehlikesi olabildiği zaman.

Metal oksit şok tutucular köprü kolları boyunca paralel düzenlenir. Onların koruyucu tutucu karakteristikleri sistem değerlerine ve konverter verilerine denk düşer. Böylece konverterlerin koruma kavramını tamamlarlar. Gerektiğinde, konverterlerin aşırı yüklenme ve durmasına karşı koruma sağlanmış olur.

3.14.3. Konverter Transformatörü Koruması

Şekil 3.25'deki diyagram konverter transformatörleri için koruma ekipmanlarını gösterir.



Şekil 3.25. Konverter transformatörü koruması

Bu koruma sistemi yedekli olarak yapılır ve aşağıdakileri içerir.

- Yıldız/yıldız ve yıldız/üçgen sargı için diferansiyel koruma

- Ani kısa devre ayırmalı yıldız/yıldız ve yıldız/üçgen sargı için aşırı akım zaman koruması

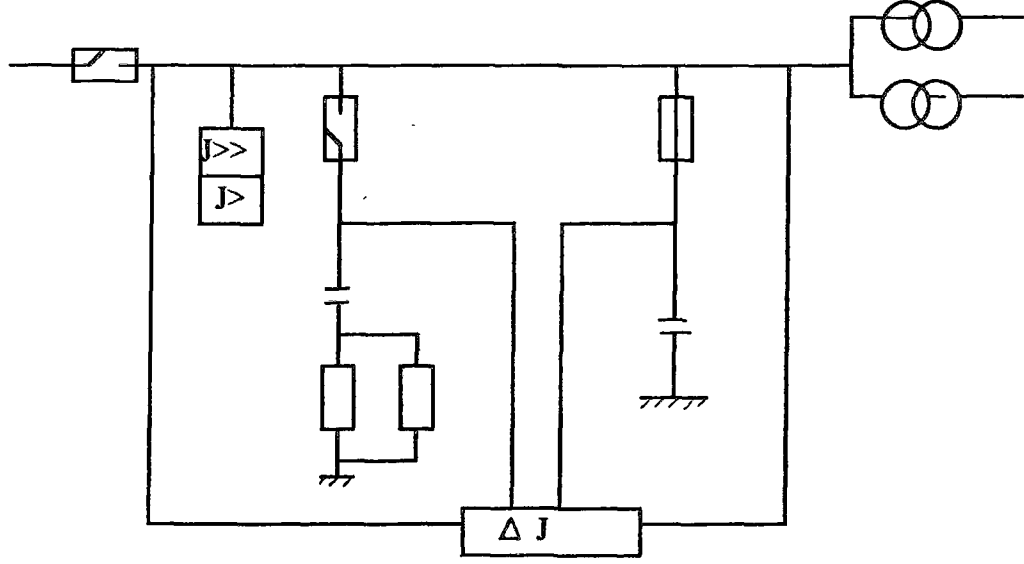
- Primer toplam diferansiyel koruma ve ani kısa devre ayırmalı aşırı akım zaman koruması

- Transformator bloğu ve termal görüntünün sıfır gerilim sistemini görüntülemek için bir aşırı gerilim röleli, yıldız noktasının yer değişimine karşı koruma

Bu elektronik koruma cihazlarının yanısıra ilave olarak Bucholz röleli transformator koruması ve her biri iki hareketli kontaklı bir yük anahtar koruması sağlanır. Ayrıca, sargı sıcaklığının termal görüntüsü biçimlendirilir. Termal görüntü, bir yedek koruma olarak, tali yağ sıcaklık gözlemleme sistemine sahiptir.

3.14.4. Bara Koruması

Şekil 3.26'daki diyagramda gösterilen bara koruması, primer konverter transformator terminalleri ve filtre devreli sistem güç anahtarı arasındaki bara sırasını içerir.



Şekil 3.26. Bara koruması

Bu koruma, ana koruma olarak bara diferansiyel korumalı klasik hat koruması ve yedek koruma olarak ani kısa devre ayırmalı aşırı akım zaman koruması gibi yapılır.

3.14.5. Alternatif Akım Filtre Devrelerinin Koruması

Alternatif akım filtre devreleri seri bağlı kondansatör grubu ve reaktör içerir. Çünkü üniteler üç fazlıdır, reaktörün toprak tarafı bağlantıları bir yıldız nokta bağlantısıyla topraklanır.

Her bir filtre, baraya bir güç devre kesici vasıtasıyla bağlanır. Her bir filtre reaktörü bir metal oksit şok tutucu ile yüksek gerilime karşı korunur. Şok tutucular yalıtım seviyesini ekonomik bir değerde tutar.

Endüktif akım ve gerilim transformatörlerinin aşağıdaki koruma fonksiyonlarını gerçekleştirmesi istenir.

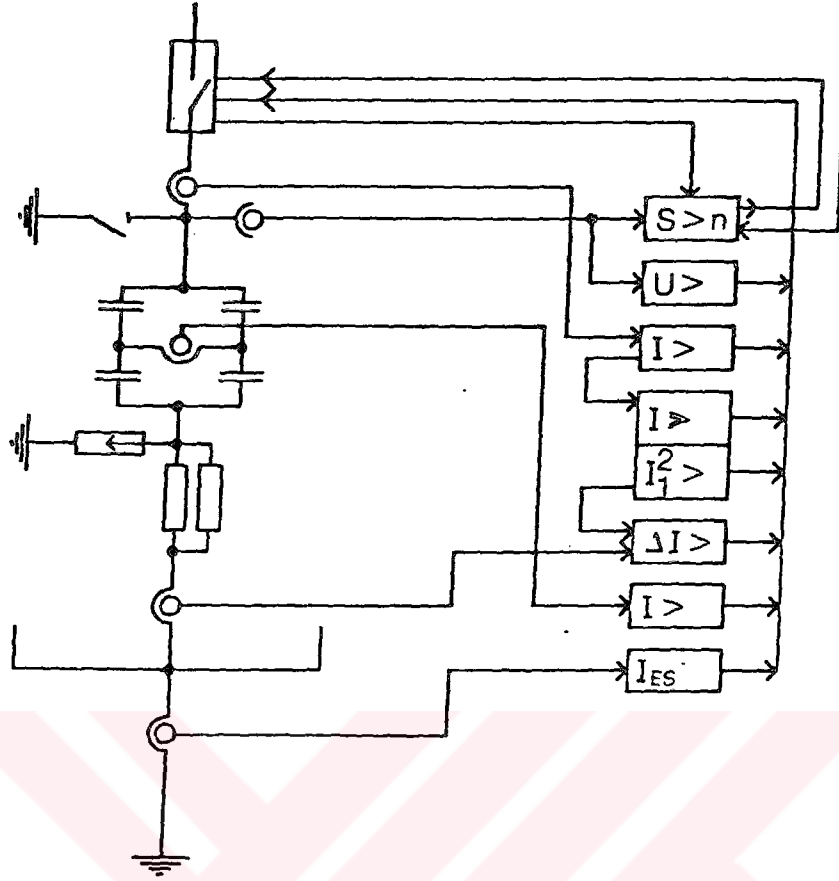
- Durdurma gözlemleme
- Aşırı gerilim zaman koruması

- Aşırı akım zaman koruması
- Kısa devre koruma
- Reaktif aşırı yük koruması
- Diferansiyel koruma
- Kondansatör dengesizlik koruması
- Toprak arıza koruması

Gerilim transformatörleri, filtrelerin durdurulmasından sonra kondansatör şarj gücünü üzerine alır. Böylece, çok kısa bir zaman içinde kondansatör grubunu deşarj eder.

Şekil 3.27. her bir koruma fonksiyonu için ölçme sinyallerinin devresini gösterir. Koruma ekipmanının standartlaşmış tasarımı yüksek dereceli fonksiyonel güvenilirlik ve elverişlilik sağlar.

Dengesizlik korumasına bir ilave olarak kondansatörler, kullanılan ekipmana bağlı olarak dahili sargı sigortaları veya harici sigortalar ile temin edilirler. Bunun için de bir tek sargının veya bir modülün arızası kondansatör grubunun çalışmasını kesmez. Ancak, bu durum çok adım dengesizlik koruması vasıtasıyla servis personeline sinyallenir.



Şekil 3.27. AC filtre devre koruması

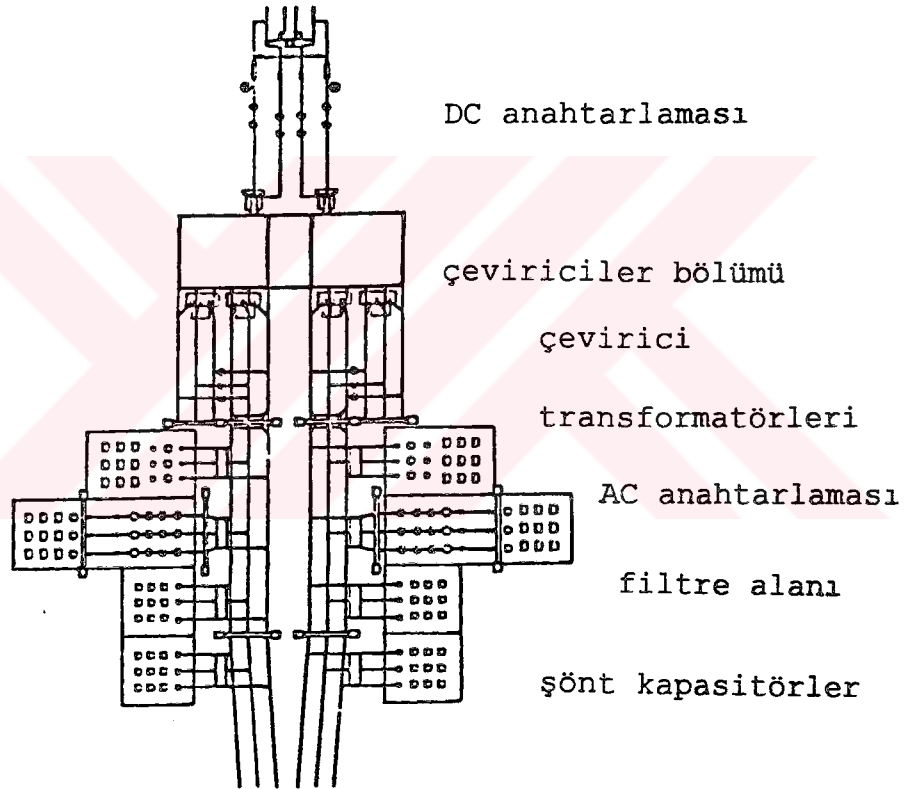
3.15. Dönüştürücü İstasyon Tertibi

Her çevirici istasyonda bulunan genel düzenler Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Komple bir tasarımda transformatörler ve söndürme reaktörleri istasyon binasının duvar kısımlarına yerleştirilirler. Kapalı hava soğutma sisteminin aspiratörleri tabana yerleştirilir. Valf kanadındaki diğer elemanlar parafudrlar, hava reaktörleri doğru akım yüksek gerilim tarafına bağlanmışlardır.

Kontrol ve yedek elemanlar daha az yer kapladıklarından iki valf kanalı arasına yerleştirilirler. Alternatif akım şalt tesisi ile doğru akım şalt tesisi birbirlerinden ayrı

olmalıdır. Hattın geçit izolat6r6 alternatif akım alt tesisine bağlıdır. Alternatif akım alt tesisi; AC filtreler, AC anahtar ve g6 devresi ayırıcılarını kapsar.

Valflerin içinde bulundukları mekanların duvar ve çatısının 0.5 m kalınlığında elik veya al6minyum levhalarla yapılması ve zeminin aė şebeke biçiminde 5x5 cm²'lik betonla takviye edilmesi yeterli korumayı sağlamaktadır. Bu muhafaza birçok noktadan topraklanmalı ve istasyonun topraklaması ile birleştirilmelidir.

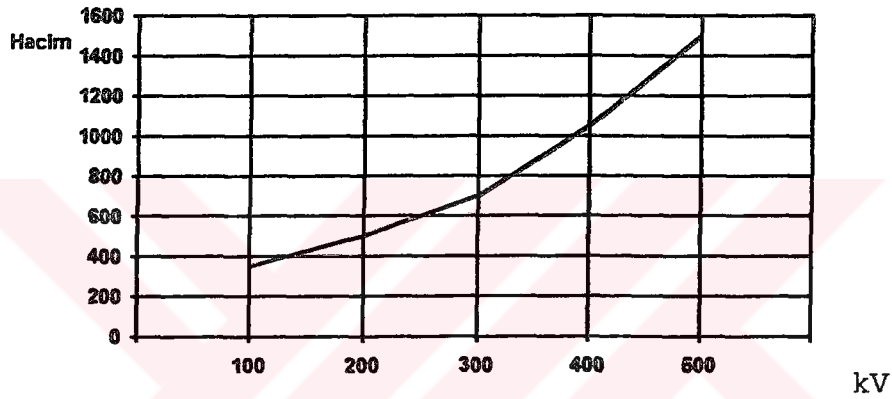


şekil 3.28. Tipik bir d6n6řt6r6c6 istasyonun planı

Doğru akım tarafında toprak ile hat arasına seri bağlı çevirici donanımların istasyonları hattan toprağa doğru kademe kademe yapılır. Sadece evirici hattı nominal doğru akım hat gerilimine g6re izole edilir. Geri kalan kısımların toprağa g6re izolasyonları kademeli olarak

azaltılır. Şekil 3.28'deki gibi bir çevirici istasyonunun düzenlenmesi için $20 \text{ m}^2/\text{MW}$ 'lık bir alana ihtiyaç vardır.

İstasyon boyutlarını azaltırken, baraların ve cihazların geometrik şekillerine ve inşaat alanının toprak yüzeyinin biçimine dikkat edilmelidir. Binanın hacmi Şekil 3.29'daki gibi sadece çeviricinin doğru gerilimine bağlıdır.



Şekil 3.29. Dönüştürücü bina hacminin doğru gerilime göre değişimi

Belli bir gerilim değerinden sonra eğri lineer hale gelmektedir. Bu hacimde elemanların payı ise Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. İstasyonlarda elemanların yüzde olarak kapladıkları alan

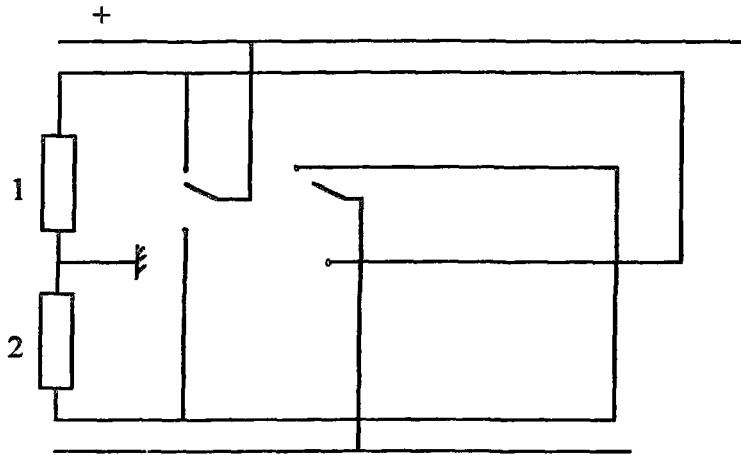
Yarıiletken elemanlar	% 8
Alternatif akım filtreleri	% 35
Alternatif akım barası ve transformatörler	% 45
Doğru akım	% 11

Doğru akım tarafındaki elemanların söndürme reaktörü hariç yerleştirilmeleri dik olarak yapılır.

3.16. Güç Akış Yönünün Değiştirilmesi

Bir yüksek gerilim doğru akım enerji iletim sisteminde istenirse güç akış yönü değiştirilebilir. Bu, gerilimin polaritesinin değiştirilmesiyle olur. Bu durumda doğrultucular inverter, inverterler doğrultucu olarak çalışacaktır.

Güç akış yönü sadece bir uçta değiştirilmişse doğru akım hattındaki gerilimin polaritesini değiştirmek yerine hattaki bağımsız ucun bağlantısını değiştirmek yerinde olur. Valf grupları için toprağa göre farklı izolasyon seviyeleri bulunduğundan, bu gruplara seri bağlı bütün bağlantıları değiştirmemek gerekir. Aynı uçta farklı polaritede iki kutup varsa, güç akış yönünü değiştirmenin en basit yolu Şekil 3.30'da görüldüğü gibi (+) ve (-) kutuplarda kullanılan çeviricileri değiştirmektir.



Şekil 3.30. İki kutbun ters çevrilmesi

3.17. Yüksek Gerilim Doğru Akım Disjonktörleri

Noktadan noktaya iletimde akımı kesme problemi için mekanik bir düzene ihtiyaç yoktur. Bu kesme işlemi ızgara kumandası ile yapılabilir. Fakat genelde kullanılacak olan çoklu terminal sistemlerinde bağlantının arızalı bölümlerini ayırmak için doğru akım disjonktörler gerekmektedir.

Bir şebeke için disjonktörün sahip olması gereken özellikler şunlardır.

- İşletme güvenilirliğini ve elverişliliğini artırması
- Çok kısa sürede kesme işlemini gerçekleştirmesi
- Bağlantının, toprağa göre nominal geriliminin iki katı veya daha fazlası aşırı yüklenme gerilimine sahip olması
- Esas itibarıyla bir doğru akımı kesme alternatif akımdan daha zordur. Doğru akımı kesmek için endüktans selflerde depo edilmiş magnetik enerjinin boşaltılması gereklidir.

3.18. Bir HVDC Sisteminin Açık Çevrim Kontrolü

Yüksek gerilim doğru akım iletim sistemlerinin yüksek elverişliliği ilk olarak açık çevrim kontrol sisteminin kalitesi sayesinde. Bugün için tüm montajlar açık çevrim kontrolleri ile donatılır. Fonksiyon özellikleri, güvenlik ve uygunluk açısından HVDC sistemlerinin ihtiyaçlarını tamamen karşılarlar.

3.18.1. Fonksiyon Genişliği

Bir açık çevrim kontrol sistemi aşağıdaki fonksiyonlara sahiptir.

- Tüm sistemin otomatik olarak çalışması ve durdurulması
- Arıza durumunda durdurma koordinasyonu
- Transformator kademe deęiřtiricinin açık çevrim kontrolu
- AC filtre ve kondansatör gruplarının otomatik açılıp kapatılması
- Çalışma frekansını kontrol etmek için boşalma gerilim transformatorünün gözlemlenmesi
- Soğutma ve havalandırma sisteminin açık çevrim kontrolu
- Hat (bara) ayırıcıları ve devre kesicilerinin durum gözlemi

Sistem işletimi için ilave bilgi, görüntüleme birimi vasıtası ile sağlanır. Esnek görüntüleme formatı, örneğin, ilgili bütün verilerle fonksiyon prosesinin ayrıntılarını görüntüler. Tüm görüntüler çalışma sırasında sağlanabilir, ara vermek her an mümkündür. İlave olarak, durum görüntüleri, ölçülmüş veri kayıtları ve alarm sinyalleri görüntülenir.

3.18.2. İletişim Kabiliyetli Yüksek Kapasiteli Donanım

Açık çevrim kontrol teknolojisinin performansı, HVDC sistemlerinin ihtiyaçlarını karşılamak için pek çok kez geliştirildi. Ana performans gelişimi, özellikle yardımcı

prosesörlerin ve hızlı 16 bit prosesörlerin kullanımı ile başarıldı. İlave olarak, adreslenebilir hafıza yerleşimleri genişletildi. İlave iletişim işlemciler, diğer birimler veya harici ünitelerle veri değişimine imkan verir. İletişim işlemcilerin seri arabirimleri, printer veya görüntüleme üniteleri gibi diğer cihazların bağlantısı için uygundur.

HVDC sistemlerine yüksek elverişlilik, performans ve açık çevrimi kontrol güvenilirliği sağlamak için, sistem aşağıdakilerle desteklenmelidir.

- Kontrol sisteminin merkezi ünitesinde programlanmış teşhis fonksiyonları
- I/O alanındaki kontrol fonksiyonları
- Hata toleransı
- İki sistemden birinde yedek açık çevrim kontrolü

3.18.3 Yeni Yazılım Modülleri

Açık çevrim kontrolü için yeni yazılım modülleri, kontrolü programlamak için uygun yardımcılardır. Aynı zamanda aşağıdaki olanakları sağlarlar.

- Kullanım kitabındaki metinlerle yazılımın uygun dökümantasyonu
- Uygulama programındaki lojik fonksiyonlar ve yapılar
- Kolay ilaveler
- Görev bölüşümü sırasında yüksek esneklik

3.18.4. Hızlı Müdahale İçin Programlama Üniteleri

Değişik programlama üniteleri programın icrasını kontrol etmek için elverişlidir. Programlama birimleri, durum görüntülerini ve programlama ifadelerini analiz etmek için her zaman açık çevrim kontrolüne "on line" olarak bağlanabilir. Kontrol çalışma ve geri besleme dökümantasyonu sırasında doğrudan değişimlere izin verir. Programlama ve dökümantasyon bir üniteyle gerçekleştirilebilir.

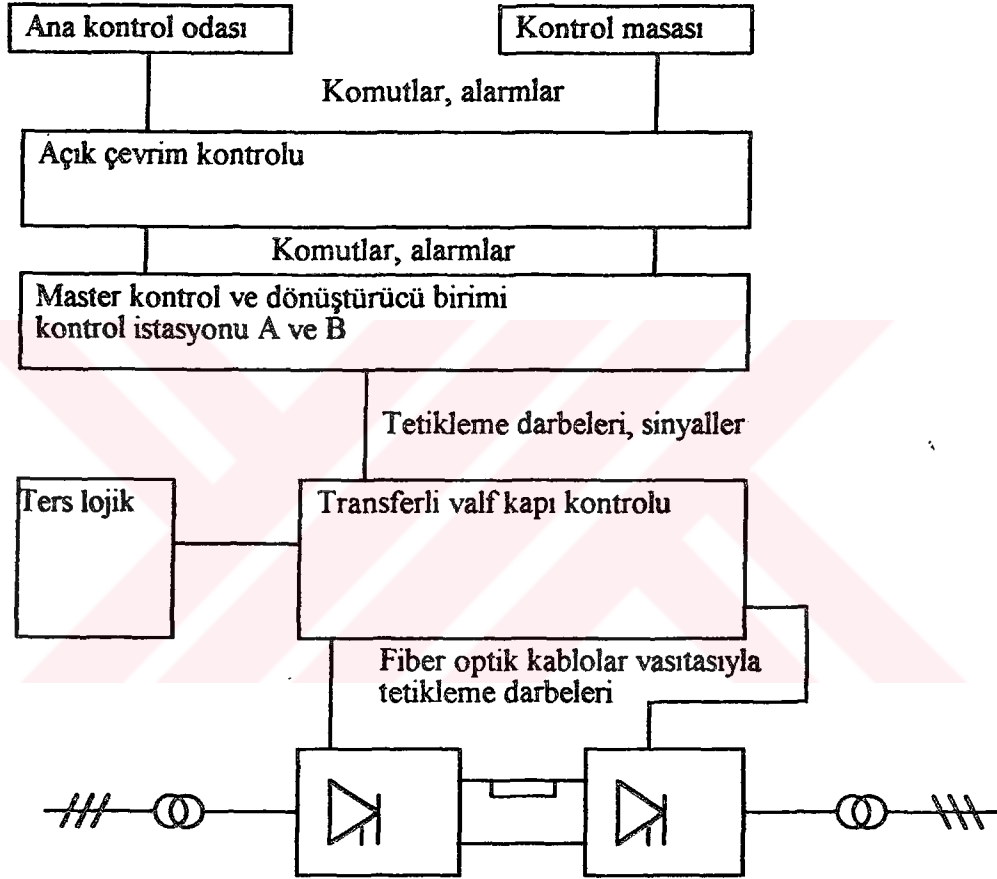
3.19. HVDC Sistemler İçin Hata Toleranslı Dijital Kapalı Çevrim Kontrolü

HVDC montajları ve statik kompanzatörlerin kompleks kapalı çevrim kontrolü için mikroelektronik sistemler idealdir. Özel olarak HVDC sistemlerin kapalı çevrim kontrolleri için bir hata tolerans düşüncesi geliştirilmiştir. Bu düşünce dijital teknolojinin tüm avantajlarını kullanır. Yedekleme, sadece çok yüksek güvenilirlik sağlamaz aynı zamanda çalışma sırasında daha kolay değişiklikler ve sistem bakımı sağlar.

3.19.1. Hata Toleranslı Sistem Düşüncesi

Hata toleransı bir tek özel fonksiyonun başarısızlığı ile tüm fonksiyonların tehlikeye girmeyeceği anlamındadır. Örneğin, gerekli alandan daha fazla tristör mevcut olduğu zaman, eğer güç bölümünde bir tristör arızalanırsa sistem durdurulmak zorunda değildir. Aynı zamanda, bir bileşenin arızası nedeniyle güç iletiminin kesilmemesi için açık çevrim kontrolü, kapalı çevrim kontrolü ve koruma tasarlanır. Bu açık ve kapalı çevrim fonksiyonlarının her bileşeninin, çalışma sırasında değiştirilebileceği anlamına gelir. Örneğin, bakım, onarım veya bir fonksiyon değişimi

için. Esnek mikrobilgisayar sistemleri, değişen ihtiyaçlara fonksiyonların uygun adaptasyonunu sağlar. Yedekleme, çalışma sırasında bile bu değişikliklere olanak verir. Şekil 3.31'de bir HVDC sisteminin hata toleranslı açık ve kapalı çevrim kontrolü gösterilmiştir [10].



Şekil 3.31. Bir HVDC sisteminin hata toleranslı açık ve kapalı çevrim kontrolü

3.19.2. Hata Toleranslı Dijital Kapalı Çevrim Kontrolünün Avantajları

HVDC sistemlerinin veya statik kompanzatörlerin kapalı çevrim kontrolü için bir çift yedekli kombinasyonda çoklu

bilgisayar sisteminin kullanımı aşağıdaki avantajlara sahiptir.

- Fonksiyonlar blok diyagramlara göre düzenlenir ve değişen tanımlamalarına kolayca ayarlanabilir

- Donanım ve yazılım, güç iletimi kesilmeksizin değiştirilebilir.

- Servis, teşhis ve dökümantasyon kullanıcı için oldukça kolaydır.

- Hata toleransı yapısı, çok yüksek güvenilirlik ve elverişlilik sağlar [10].



4. YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLE ENERJİ İLETİMİNİN EKONOMİK YÖNDEN İNCELENMESİ

Yüksek gerilim doğru akım iletim sistemlerinin maliyeti pek çok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin detaylı olarak etüd edilmesi sonucunda sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olup olmadığına karar verilir. Yüksek gerilim doğru akım iletim sistemlerinin maliyetlerinin hesaplanmasında uygulamanın yapılacağı ülkenin özel koşulları da çok önemlidir. Bir HVDC enerji iletim sisteminin uygulanabilmesi konusunda üç önemli parametre vardır.

1. Yatırımda ekonomi
2. İşletmede ekonomi
3. İşletmede güvenilirlik ve esneklik

Yatırımda ekonomi; kaplanan arazi şeridi ve dolayısıyla istimlak bedelleri, verimli tarım arazilerinin heba olması, harcanan iletken, demir ve hırdavat malzemesi, işçilik ve mühendislik harcamaları, terminal tasarım ve montaj maliyetlerini kapsamaktadır. Bunlardan arazi ile ilgili olana direkler incelendiğinde değinilmişti.

İşletmede ekonominin ana eksenini ise sistem kayıpları oluşturmaktadır. Ayrıca bakım onarım, arıza sıklığı vs. gibi sistemin sağlıklı çalışması için kurulacak ilave sistemler de bu kapsama girer.

İşletmede güvenilirlik ve esneklik ise sistemin verimini belirler ve çok önemlidir.

4.1. Harcanan İletken Demir ve Hırdavat Malzemesi

Demet iletkenler göz önüne alınmazsa, HVDC sistemlerde kullanılan iletken sayısı sadece ikidir. Bu nedenle, iletken, izolatör ve hırdavat malzeme tasarrufu sağlarlar. HVDC sistemleri, daha az iletken kullanılması nedeniyle hafiftir ve dolayısıyla daha az demir malzeme kullanılmasını gerektirirler. Çeşitli araştırmalarda aynı iletim kapasitesine sahip bir HVDC hattının bir AC hattından %33 daha ucuz olduğu sonucu çıkmıştır. Yine aynı şekilde kullanılacak izolatör ve hırdavat malzemesi miktarında da yaklaşık olarak 1/3 oranında azalma olmaktadır.

Tablo 4.1. ve Tablo 4.2'de 1994 yılı fiyatları üzerinden 380 kV bir AC sisteminin ve aynı taşıma kapasitesinde 380 kV bir AC ve bir HVDC hattının kilometre başına birim maliyetleri gösterilmiştir. Hesaplamalar Türkiye şartları için geçerli değildir, yaklaşık genel bir hesaplama ve dolardaki değişime bağlıdır [7].

Tablo 4.1. 380 kV (3x954 mcm çift devre) bir AC sistemin birim maliyetleri

Malzeme	Birim	Birim fiyat (TL/km)	Toplam fiyat (TL/km)
Çelik konstrüksiyon	51700 kg	23000	1.189.000.000
İzolatörler	726 tane	266800	193.630.000
Hırdavat malzemesi	17 takım	5060000	86.020.000
Çelik iletkenler	33764 kg	34500	1.164.850.000
Toprak iletkeni	1542 kg	23000	35.460.000
İletken dem. parçası	33764 kg	6900	232.970.000
Toprak il. bağ.	1542 kg	9200	14.230.000
İnceleme			4.140.000
Arazi istimlak			17.110.000
Diğer masraflar (%10)			258.500.000
TOPLAM			3.196.050.000

Tablo 4.2. 380 kV (3x954 mcm çift devre) bir AC sistem ile aynı taşıma kapasitesine sahip bir HVDC havai hat sisteminin birim maliyetleri

Malzeme	Birim	Birim fiyat (TL/km)	Toplam fiyat (TL/km)
Çelik konstrüksiyon	35000 kg	23.000	791.180.000
İzolatörler	485 tane	266.800	129.080.000
Hırdavat malzemesi	17 takım	3.370.000	57.280.000
Çelik iletkenler	22500 kg	34.500	776.550.000
Toprak iletkeni	1542 kg	23.000	35.460.000
İletken dem. parçası	22800 kg	6.900	157.320.000
Toprak il. bağ.	1542 kg	9.200	14.230.000
İnceleme			4.140.000
Arazi istimlak			12.830.00
Diğer masraflar (%10)			190.800.000
TOPLAM			2.175.870.000

4.2.Ekonomik Hat Gerilimi

Yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletiminde verilen nominal gücü iletmek için optimum gerilim seviyesini bulmak gerekir. Belli bir güç çıkışı için daima optimum bir doğru akım hat gerilimi vardır.Bunun için, iletilen güç, dönüştürücü istasyonlarının maliyetleri, hat maliyetleri, toplam kayıp maliyetleri göz önüne alınmaktadır.

Alternatif akım sistemlerinde iletim gücü P, genellikle doğal güce karşılık gelir. Karakteristik empedans ekonomik hesaplamalar için pratikte uygun büyüklüktedir. Bu değer doğru akım için de kullanılabilir.

$$P = c.n.U^2/z \quad (4.1)$$

dir ve burada c sabiti,

$$c = \frac{1.k_u.z}{2.k_p.Du} \left(\frac{u_0}{u} \right)^2 = 0.94 \quad (4.2)$$

Burada,

n : kutup sayısı

Z : karakteristik empedans $[\Omega]$

k_u : birim gerilim başına izolasyon maliyeti
[TL/kV.km.kutup]

k_p : birim güç başına maliyet [TL/kW]

U : hat gerilimi [kV]

U_0 : referans gerilimi [kV]

ΔU : gerilim düşümü [V/km]

dir. c değeri yaklaşık 1 alınarak ekonomik güç doğal güce eşit kabul edilebilir. Yukarıdaki güç ifadesinden ekonomik gerilim,

$$\text{Tek kutuplu hatlar için} \quad U = 17\sqrt{P} \quad (4.3)$$

$$\text{Çift kutuplu hatlar için} \quad U = 12 \sqrt{P} \quad (4.4)$$

bulunur [4].

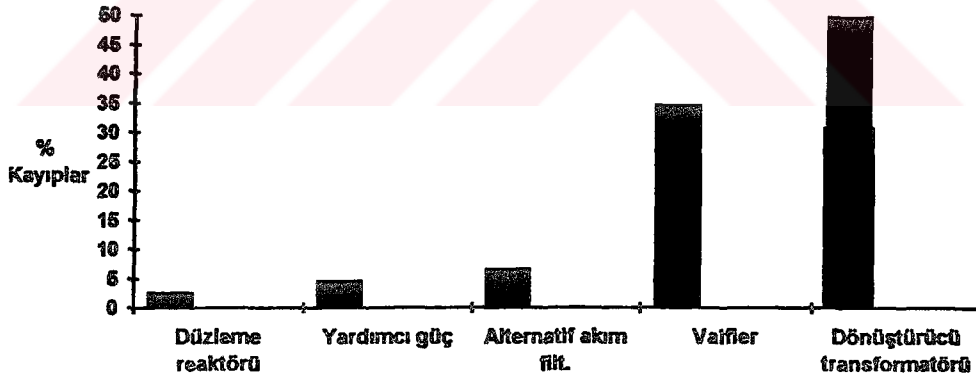
4.3. Dönüştürücü İstasyon Maliyetleri

Terminal donanımları içinde en geniş yeri dönüştürücüler tutar ve istasyon maliyetlerinin özünü esas olarak dönüştürücünün boyutları belirler. Toplam iletim maliyetini optimize etmek için yüksek gerilim seviyeleri seçilirse birim maliyet yükselir. Tek kutuplu sistemde aynı

nominal güçte iletim yapılırsa öz terminal maliyetleri %2-%3 oranında artar.

Doğru akım terminali enerji üretim istasyonuna bağlı ise dönüştürücüleri ferdi generatörlerden ayırmak için direkt bağlantı yapılır. Transformatör için kademe değiştirici kullanmak gerekiyorsa, gerilim kontrolü generatör regülatörü ile de yapılabilir. Fazların kompanzasyonu için şönt kapasitörlere ihtiyaç yok ise reaktif güç generatörlerden sağlanabilir. Bu şekilde sistem maliyetleri azaltılabilir.

Dönüştürücü istasyonunda güç kayıpları büyüklüğüne göre sırasıyla dönüştürücü transformatörlerinde, tristör valflerinde, doğru akım reaktöründe ve alternatif akım valflerinde meydana gelir. Dönüştürücü istasyonlarında meydana gelen kayıplar genellikle iletilen gücün %1-%1.5'u arasında değişir. Dönüştürücü istasyon kayıplarının dağılımı Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Dönüştürücü istasyon kayıplarının dağılımı

Bir çevirici dönüştürücü istasyonunun verimini hesaplamak için donanımdaki güç kayıplarının yanısıra istasyonun yardımcı güç ihtiyaçlarını da hesaba katmak gerekir.

Dönüştürücü istasyonundaki tristör valflerinin kayıpları valflerdeki gerilim düşümünden dolayı meydana gelir. Toplam uç postaların kayıpları ise çevirici transformatörlerden dolayı meydana gelir.

4.4. Kablo Maliyetleri

Alternatif akım ve doğru akım maliyetleri arasındaki oran yaklaşık olarak 1/3'tür. Katı yalıtkanlı kablolardaki kayıplar nominal gücün fonksiyonudur. İletken sıcaklığı belirtilen değerleri aşarsa akım yoğunluğu hızlı bir şekilde azalır. Bunun nedeni, birim maliyet ile düşük gerilim sahasında seçilen nominal kablo parametreleri arasında kuvvetli bir ilişkinin var olmasıdır.

4.5. Hat Kayıpları

Doğru gerilim iletim hattındaki kayıplar dirençli iletken kayıpları ve korona kayıplarıdır. Diğer kayıplar önemsenmeyecek kadar azdır. Deri etkisi yoktur ve alternatif akım ile karşılaştırıldığında akım yoğunluğunun biraz daha yüksek olması gerekir. Alüminyum iletkenler için normal olarak akım yoğunluğu değeri 0.75 A/mm² veya 0.90 A/mm²'dir. Tablo 4.3'te çeşitli gerilimlerde kayıpların değişimi görülmektedir.

Tablo 4.3. Çeşitli gerilimlerde kayıpların değişimi

İletim	Gerilim düzeyi (kV)	Kayıplar (MW)	İzafi kayıp Kayıp/iletilen güç
AC	400	109	% 7
AC	400	117	% 7.8
AC	765	50	% 3
HVDC	500	73	% 4.8

Tablodan da görüleceği gibi HVDC/AC sistem kayıpları oranı yukardaki sonuçlarla tutarlı bir şekilde 0.68 civarındadır.

Bir yüksek gerilim doğru akım iletim hattının bir kilometresi için bir yıl boyunca oluşan kayıplar,

$$n \cdot \frac{(P/n \cdot U)^2 \cdot \rho}{q} \cdot T_p \quad (4.5)$$

ile ifade edilir. Burada,

n : Kutup sayısı

q : Kutup başına iletken kesiti

ρ : İletken özgül direnci

P : Planlanan hat için nominal güç

T_p : Kayıpların oluştuğu zaman süresi

dir.

4.6. İşletmede Güvenilirlik ve Esneklik

Bu konunun HVDC sistemlerinin lehine ve aleyhine olan çeşitli yönleri vardır.

4.6.1. Servis Dışı Olma Yüzdesi

Bir birimin serviste olma yüzdesi,

$$\text{Servis yüzdesi} = \left(1 - \frac{\text{servis dışı olma süresi}}{\text{toplam çalışma zamanı}}\right) \times 100$$

olarak tanımlanabilir. Sistem genellikle tümüyle ve uzun bir süre servis dışı olmayacağı için, servis dışı olma süresi, servis dışı olan gücün toplam servis süresi ile çarpımı olarak tanımlanır. HVDC sistemlerinde yıllık servis yüzdesi yaklaşık olarak %98 civarındadır. Bu yüzdeye göre yıllık olarak servis dışı olma süresi yaklaşık olarak bir haftadır. Bu süre genellikle bakım amacıyla yapılan programlı kesintilerden oluşur. Bu nedenle, diğer yedek iletim sistemleri devrededir yani tüketici açısından herhangi bir kesinti sözkonusu değildir. Bu noktada belki de daha fazla önemli olan kesintiler, beklenmedik bazı arızalar sonucunda yapılan kesintilerdir. HVDC sistemlerinde bu tür kesintilerin oranı %1 civarındadır. Bu anlamda HVDC sistemlerinde enerji iletim güvenilirliği %99 civarındadır.

Bipolar HVDC sistemlerinde sistemin her zaman çift devre olarak serviste olma yüzdesi %99, sadece bir devrenin her zaman serviste olma yüzdesi ise %99.9'dur.

Sistemin en çok bozulmaya yatkın olan kısımları koruma ve kompanzasyon sistemleri yedeklidir. Bu kısımlarda servis dışı olma oranı %0.3 civarındadır. Geriye kalan kısımlarda en çok problem AC güç kaynağında görülmektedir. Burada en önemli problem kaynağı AC/DC çevirme transformatörleridir.

4.6.2. Sistem Kararlılığını Artırma Yolları

HVDC ile enerji iletiminin bir sistemin kararlılığını artırdığı uzun zamandan beri bilinmektedir. Bu yazıda sistem kararlılığından sistem üretim elemanlarının en çok 2-10 saniyeye kadar olan zaman sınırları içinde ortaya çıkan çeşitli elektriksel olaylara karşı senkronizmini muhafaza edebilmesi, yani sistemin elektriksel olarak bütünlüğünü koruyabilmesi kastedilmektedir. Sistem kararlılığı ile

birlikte hatların taşıma kapasiteleri de artmaktadır. Özellikle uzun iletim hatları ile yapılan taşımalarda bu durum önemli olmaktadır.

Bir HVDC sistemi, temel olarak bir sistemin kararlılığını sistemdeki güç salınımlarının genliklerini azaltarak sağlar. Sistem genellikle AC sisteme paralel olarak çalışır, yani HVDC sisteminin terminal baraları arasında genellikle diğer paralel AC enerji iletim kolları vardır. Sistem hızlı davranabilme özelliğine sahip olduğu için salınımları absorbe edebilme ve sonuçta sönümlendirme özelliği vardır. Elde edilen kararlılık genellikle ilk salınım kararlılığı tipindedir, yani sistem kararlılığını kaybetme riski en yüksek olan ilk salınım periyodunda kararlı bir duruma getirilebilmektedir. Bir HVDC sistemi AC sisteme paralel bağlanabileceği gibi paralel olmayan bir şekilde de bağlanabilmektedir. Böyle bir bağlantıda, HVDC sistemi AC sisteme bir branşman olarak bağlanmaktadır. Bu durumda sistem kararlılığı HVDC sisteminden AC sisteme güç enjekte edilmesiyle sağlanmaktadır.

HVDC sistemleri çok terminalli olarak da tasarlanabilmektedir. Çok terminalli bir HVDC sisteminin sistem kararlılığına olan etkisi ile iki terminalli basit bir HVDC sistemininki arasında prensip olarak bir fark yoktur. Çok terminalli sistemler kullanım bakımından daha esnektir, dolayısıyla sistem kararlılığı üzerinde daha etkilidir fakat denetimleri daha karmaşıktır.

4.7. HVDC Sistemlerinin Tasarım ve İnceleme Yöntemleri

Bir HVDC sisteminin bir AC sistemi içindeki performansı kararlı hal altında diğer işletme şartlarına olan katkısı bilgisayar yöntemleri ile incelenebilir. Yapılacak incelemeler ve analizler kabaca kararlı hal altında ve

geçici durum altında incelemeler olarak ikiye ayrılabilir. Kullanılacak yük akışı ve kısa devre programlarının HVDC sistemlerini gözönüne alabilecek özellikte olması gerekir. Geçici rejim şartları altında en temel analiz programları ise geçici ve dinamik kararlılık analizi ve EMTP (ELEktromagnetic Transient Analysis Program) dır.

Son yıllarda analog ve sayısal simülasyon yöntemlerini aynı anda kullanan hibrid analiz sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Oldukça pahalı olan bu sistemlere bir örnek olarak TNA (Transient Network Analyser) verilebilir. Sistemin incelenmesi için yapılması gerekli analizler temel olarak şöyle sıralanabilir.

- Sistem kararlı hal altında, puant yükte birli açmalara, yani bir devre elemanının devre dışı olması durumuna karşı normal çalışma durumunda kalmaya devam edebilmelidir. Burada, normal çalışma durumu, hiçbir sistem elemanında taşma olmaması ve tüm gerilimlerin nominal %10 civarında olması anlamında kullanılmıştır.

- Sistem ortalama veya minimum yükte ikili açmalara karşı normal çalışma durumunda kalmaya devam edebilmelidir.

- Gerekli olması durumunda, tüm yük şartları altında reaktif güç kompanzasyonu yardımıyla tüm gerilimler nominal değerlerinin %5'i civarına getirilebilmelidir.

- Sistem arızalı bir hattın tekrar kapama yapılmadan devre dışı edilmesi durumuna karşı ilk beş salınım periyodu içinde kararlılığını muhafaza edebilmelidir.

- Sistem, HVDC sisteminin bir devresinin devre dışı olması durumuna karşı yine normal durumda kalmaya devam edebilmelidir [12].

4.8. HVDC Sistemlerinin Bakımı

Belli aralıklarla, örneğin yılda bir kez dönüştürücü istasyonların her bölümü genel bir kontrole tabi tutulmalıdır. Kontrol aletleri, akım ve gerilimleri referans değerleriyle karşılaştıran özel ölçü düzenleridir. Her tristör devresinin ve valfteki ortak donanımın bütün işlevleri dikkate alınarak kontrol yapılmalıdır.

Hava ile yalıtılmış 12 yollu çeviriciler, normal eğitilmiş elektrikçiler tarafından yılda yaklaşık 250 iş gününde bir bakıma alınırlar. Yağ ile yaratılmış valflerde daha fazla teknisyene gerek vardır.



5. YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLE ENERJİ İLETİMİNDEKİ SON GELİŞMELER

Başlangıçtan bugüne kadar yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletimindeki teknoloji sürekli olarak gelişti. Bu gelişme üç temel ihtiyacın çözülmesi için zorunludur.

1. Güç iletimi ekonomik olmalıdır. Enerji taşınması sırasındaki kayıplar en düşük seviyede tutulmalıdır.

2. Güç sistem arıza riski azaltılmalıdır.

3. Güç kaynağının kalitesi sağlanmalıdır. Tüm girişim faktörlerine rağmen güç sisteminin frekansı ve gerilimi tanımlanan bant genişlikleri içinde tutulmalıdır ve ideal bir güç kaynağına mümkün olduğu kadar uyum sağlamalıdır.

Özellikle mikroelektronik ve güç elektroniğindeki gelişmeler daha verimli, daha ekonomik ve daha güvenli sistemlere ulaşma konusunda ana unsuru oluşturmaktadır. Aşağıdaki gerçekler bu gelişmeyi vurgular.

- Bugün tristörlerdeki gelişmeler, güç elektroniği alanında daha küçük ünitelerin kullanımına izin verir.

- Konverter yapısı için yeni bir modüler tasarım, standartlaşmaya ve konverter odalarının boyutlarını küçültmeye doğru eğilimi artırır.

- 12 darbe çalışma ve yüksek geçişin kullanımı AC filtre devrelerini önemli ölçüde basitleştirdi. Böylece hatların frekans uyumu ve güvenilirliği artırıldı. Ayrı ayrı filtre devrelerinin tipi ve miktarı ile gerekli olan alan azaltıldı.

- Kapalı ve açık çevrim kontrolu için yeni programlanabilir dijital sistemler, sistem işletmesi için yeni perspektifler önerir.

Bu gelişmeler, HVDC sistemlerinin etkinliği ve dünya çapında uygulanabilmesi için fiziksel özellikler ve avantajlar ortaya çıkarmıştır. Tristörlerle donatılmış HVDC sistemlerinin değeri bütün dünyada kabul edilmiştir.

5.1. Tristör Performansının Gelişimi

Altmışlı yıllardaki başlangıçla karşılaştırıldığında, tristörler civa buharlı valflerin yerini aldığı zaman, tristör teknolojisinde kesinlikle şiddetli bir performans gelişimi oldu. Her 1000 kW için 35 mm çaplı bir yarı iletkenli 14 tristör gerektiren ilk HVDC sistemin aksine bugün sadece 100 mm çaplı bir yarıiletkenli tristör gerekmektedir. Bu, her bir tristör ünitesinin performansının 20 yıl öncesine göre oldukça yüksek olduğu anlamına gelir.

5.2. Tristör Soğutulmasının Gelişimi

Havalı soğutmadan sıvı ile soğutmaya geçilmesi bu alandaki en önemli gelişmedir ve avantajları şunlardır.

- Sıvı ile soğutma, tristör konverterin kompakt dizaynına imkan verir.

- İlave olarak, soğutucuların, tüm sistemin çalışma koşullarından bağımsız olarak bakımına imkan verir.

5.3. Tristör Ateşlemesinin Gelişimi

Tristörlerin ateşlemesi ve kapı kontrolü ilk olarak elektromanyetik transdüserler (güç çeviriciler) vasıtasıyla gerçekleştirildi. 1974'de, tristör koruma devresinden alınan ateşleme gücü ile fiber optik kablolarla kapı kontrolü, valflerin yapısal tasarımına önemli derecede esneklik kattı. Bu aynı zamanda ateşleme kayıplarını azalttı. Aynı zamanda, ikinci bir fiber optik kablo kullanarak tristör çalışabilirliğinin sürekli gözlemlenmesi başarıldı. Böylece, HVDC işletmecisi istasyon başına 1000-2000 adet olan tristörlerin tümünün şartları hakkında daima bilgilendirilir. Bugün, doğrudan ışıık darbeleri ile ateşlenen tristörler kullanılmaktadır. Gelişmiş valf dizaynlarında bu tristörleri kullanarak HVDC sistemlerinin ekonomik verimliliği daha da artırılabilir [11].

5.4. Elverişlilik ve Yedekleme

Bugün müşteriler tarafından istenen %99 veya daha fazla elverişlilik, HVDC sistemler için yedek parça stoğu ve dizayn üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir.

Elverişliliğin bu yüksek yüzdesi aşağıdakilerle sağlanır.

- Dizayn ve üretimin maksimum kalitesi. Bu, planlamadan işbölümüne kadar geniş kalite sağlama ölçüleri ile sağlanır.

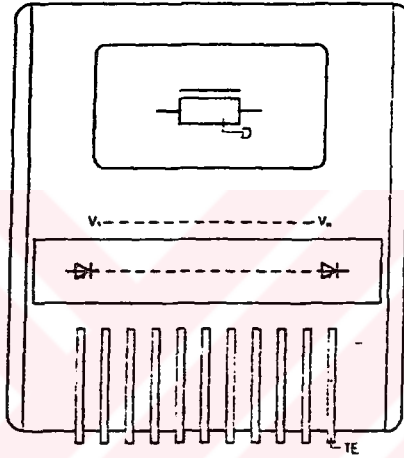
- Yardımcı sistem için kaynak, havalandırma, soğutucu, konverterler için tristörler, açık ve kapalı çevrim sistemleri gibi hayati fonksiyonlu bölgelerde yedekleme.

- Gerekli yedek parça stoğu.

- Yapım için yardımlar olarak kullanılan sistemdeki zayıf noktaları belirlemek için modern bilgisayar sistemleri kullanarak etraflı elverişlilik analizleri.

5.5. Modüler Sistem

Yeni standart valf, kule tipi dizayna ve sayısı ona ulaşan modüllere sahiptir (Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.).

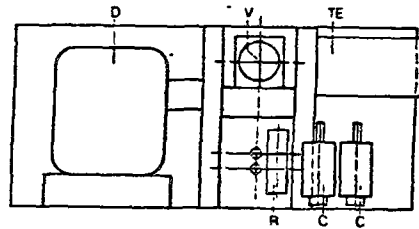


Şekil 5.1. Modülün üst görünüşü

D - Reaktör

V - Tristor kümesi

TE - Tristor elektronikleri



Şekil 5.2. Modülün yandan görünüşü

R - Bastırıcı direnç

C - Bastırıcı kondansatör

En uygun yapı, kulelerin toprak yalıtımlı bir tabla üzerine üçlü gruplar halinde düzenlenmesidir. Bu valf gruplarının her bir dahili olarak bir 6 darbeli köprü geçişine bağlanır. Böylece 12 darbeli bir geçiş kutbu iki valf grubu gerektirir.

5.6. Kule Tipi Dizayn ve Avantajları

Modüllerin alüminyum yan panelleri kule sisteminin destek parçalarıdır. Yan panellerin mekaniki bağlantıları yalıtım ihtiyaçlarını karşılar. Tristörlerin kaskad bağlantıları bu yalıtım açıklıklarına paralel olarak düzenlenir. Bu yapı bir modül bağlantıları arasındaki elektrik alanın homojen düzenlenmesini sağlar. Bu, küçük bileşenlerin rahatsızlık veren pik etkisini önler.

Elektrik alan homojen olduğu zaman hava açıklıkları minimum tutulabilir. Bunun için de tesis inşaatları daha önce olmadığı kadar düşük bir boyuta getirilebilir. En, boy ve yükseklik oranları tüm modern konstrüksiyon metodlarına inşaatın ekonomik inşasına olanak verir. İlave bir maliyet azaltımı, normal maliyetlerin bir parçası olan elektriksiz kılıfı azaltarak gerçekleştirilir.

5.7. Modüler Sistemin Avantajları

100 mm'lik tipten 10 tristörden oluşan bir modülün boyutları yaklaşık olarak 1350x620x1400 (mm olarak genişlik x yükseklik x derinlik). Bunun ağırlığı 400 kg'dan azdır. Bu üniteler kolayca taşınabilir ve normal bir montaj kreni ile bir kuleye monte edilebilir. Modüller test edilip komple olarak dağıtıldığı zaman montaj zamanı daha kısa olur ve test sırasında riskler daha düşüktür.

Yüksek performans konverterler 30 yıldan daha fazla bir hizmet süresi için dizayn edilirler. Bu nedenle, tüm malzemeler ömür ve aşınma yüzünden değiştirilmeleri gerekmeyecek şekilde seçilirler. Gözlemeleme ünitesi sürekli olarak tristörlerin elektriki fonksiyonlarını gözlemler. Bakım isteyen bir kaç parçaya bakımı ve tamiri kolaylaştırmak için kolayca girilebilir. Genel olarak, yalıtım açıklığının görüntüsel gözlemlenmesi ve yüksek toz üretimi durumunda önleyici temizleme yeterlidir [11].

Yüksek performans tristör valflerinin bakımı çok kolaydır. Modüldeki bir tristörün değiştirilmesi 5 dakika bile almaz. Ateşleme elektroniklerinin değiştirilmesi 2 dakika alır. Modüler sistemdeki standartlaşma daha ekonomik üretime olanak verir.

5.8. Kompakt İnşaat Dizaynı

Standartlaşmış modüler konverterler ve 2x6 kule teknolojisi öncekinden daha düşük valf odalarına olanak verir ve bunun için de önemli ekonomik avantajı vardır.

Örneğin, iki 12 darbeli tristör konverter grubu (Şekil 5.3.) içeren 600 MW HVDC ard arda istasyonunun valf odasına yerleşimi için gerekli olan alan önceki montajlarla karşılaştırıldığında 2000 m³ (%38) daha azdır. Tristör valfı ve dijital kapı kontrolü arasındaki kısa mesafe sinyal iletimi için fiber optik kablolar kullanıldığında valf odalarında bodruma gerek yoktur. İlave olarak, modüler konverter teknolojisi; montaj, bakım ve yedek parça stoğu için gerekli alanı azaltır.

Konverter transformatörleri ve düzleme reaktörleri konverter odasının dışında düzenlenir. Tristörlere bağlantı için onların yalıtım kovanları doğrudan konverter odasına

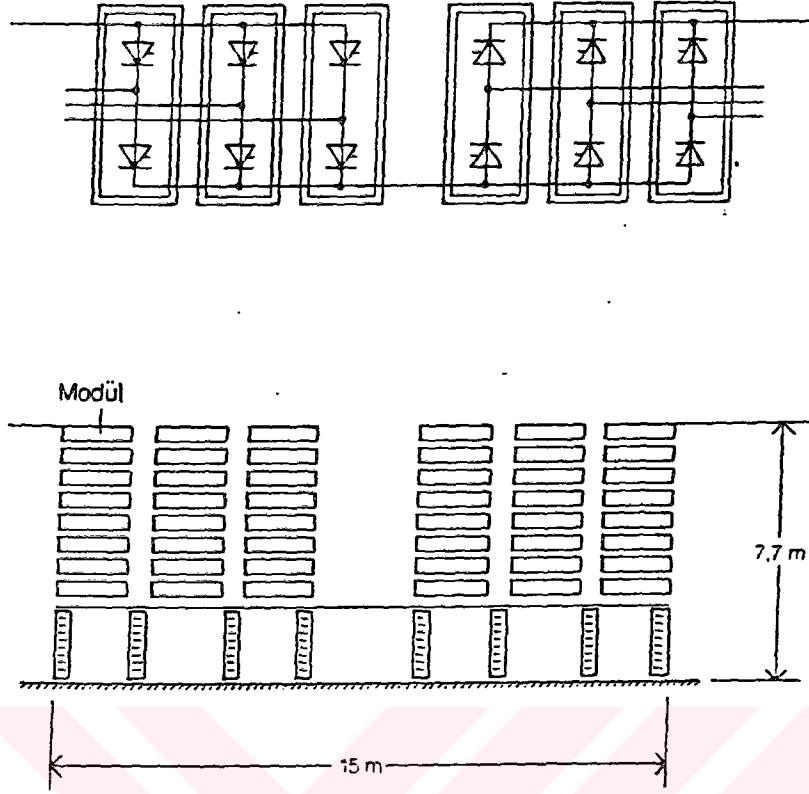
çıkarılır. Böylece kovanlar kir ve yıldırıma karşı korunurlar.

HVDC sisteminde kontrol odasına yerleştirilen diğer ekipmanlar şunlardır.

- Açık ve kapalı çevrim kontrolü
- Koruma ve otomatik gözlemleme
- Kontrol odası veya yerel kontrol masası
- İstasyon hizmeti için gerilim kaynağı

Valf odasındaki modüler sistemin diğer avantajları şunlardır.

- Temiz inşaalı montaj sistemi
- Valf kulesindeki yıldırım tutucuların (parafudr) kompakt montajı
- Kısa elektriksel bağlantılar
- Odaların boyutlarının azaltılması
- Bodrumsuz inşaat
- Düşük taşıma yüklü ve küçük boyutlu servis platformu
- Servis ekipmanları için küçük koridor ve odalar



Şekil 5.3. 12 darbeli tristör konverter grubu

Tüm bu faktörler tesis maliyetinde açık bir azaltım anlamına gelir ve bu avantajlar müşterilere aynen yansıtılır.

6. YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN TÜRKİYE AÇISINDAN İNCELENMESİ

6.1. Tarihsel Gelişim

Ülkemizde ilk defa elektrik enerjisi 1902'de Tarsus'ta kullanılmış, ilk büyük santral 1914'te İstanbul Silahtarağa'da servise alınmıştır. Osmanlıların son dönemi ile Cumhuriyetin ilk yıllarında yabancıların yaptığı, pahalı yakıta dayanan, geliştirmeye ve genişlemeye müsait olmayan küçük gruplardan kurulu tesislerin 1923'deki kurulu güçleri 40-50 milyon kWh'dır.

1948 yılında Çatalağzı Santrali yapılarak 154 kV'luk enerji taşınmasına başlanmıştır. 1950 yılında ülkenin kurulu gücü 408 MW, yıllık enerji üretimi ise 0.8 milyar kWh olmuştur. Bu yıldan sonra ülkede bölgesel hidrolik ve termik santraller yapımına başlanmıştır.

1963 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı kurularak sektörde bütünleşmeye gidilmiştir. 1970 yılında 1312 sayılı kanunla TEK hizmete girmiştir. 1980 yılında ülkenin kurulu gücü 5119 MW, yıllık üretim ise 23 milyar kWh'dır.

Geçmişteki 10 yıllık periyotlara göz atarsak, 1950-1960 yılları arasında 3.6 katı artan elektrik enerjisi arzı azalarak sırasıyla 3.1, 2.9 ve 2.3 olarak gerçekleşmiştir. Bu trendin sürmesi durumunda ortalama %8 artışla 2000 yılında 120 milyar kWh'a ulaşacağımız tahmin edilmektedir.

6.2. İletim Sistemi

TEK enterkonnekte yüksek gerilim ve çok yüksek gerilim sistemleri sırasıyla 154 kV ve 380 kV standart işletme gerilimine sahip olup bugün ülkenin tümünü kapsayan bir bütün teşkil eder. Anılan standart işletme gerilimlerine

tekabül eden maksimum işletme gerilimleri 170 kV ve 420 kV'dur.

Ülkenin ilk 154 kV iletim hattı, zamanına göre büyük kapasiteli (129 MW) sayılabilecek Çatalağzı Termik Santrali'nda üretilen enerjiyi İstanbul çevresine iletmek üzere 1952 yılında tesis edilen K.Ereğlisi-Ümraniye hattıdır. Zamanla daha büyük kapasiteli ve ana tüketim merkezlerinden çok daha uzakta olan üretim tesislerinin yapımının ele alınmasıyla uzun mesafeler ve yüksek taşıma güçleri için 154 kV'luk yüksek gerilim iletim sisteminin yetersiz kalacağı düşünülmüş ve 1960'lı yılların başlarında projelendirme çalışmalarına geçilen Keban Barajı ve Hidroelektrik Santrali'nin Ankara, İstanbul ve İzmir gibi büyük tüketim bölgelerinin 500-800 km'lik mesafeler üzerinde besleyeceği de göz önüne alınarak gerilim seviyesinin Avrupa standardına uygun olarak 380 kV'a çıkarılmasına karar verilmiştir.

Türkiye'nin çok yüksek gerilimli iletim sisteminin planlama kriterleri geçen 20 yıl içinde bir yandan üretim planlamalarını ve yük tahminlerinin güncelleştirilmesine, diğer yandan teknolojiadaki gelişmeler ve diğer ülkelerdeki uygulamalara bağlı olarak şebekenin büyük ölçüde geliştirilmesi gerektiği durumlarda yeniden gözden geçirilmiştir. 1970 ve 1980'lerde doğu ile batı arasında enerji transferi için yapılan uzun vadeli planlama etüdları aşağıdaki alternatiflere dayandırılmıştır.

1. Sadece 420 kV'luk tevsi
2. 420 kV'luk alternatif akım şebekesini örten 800 kV'luk sistem
3. 420 kV'luk alternatif akım şebekesini örten ve çok yüksek gerilimli doğru akım bağlantısı

Karakaya HES ile İstanbul arasında büyük kapasiteye sahip çok yüksek gerilim doğru akım hattı ilk olarak 1973-1974 yıllarında teknik ve ekonomik yönden incelenmişti. Bu etüd 1979-1980 yıllarında güncelleştirildi. Son olarak ise 1989 yılı başında Atatürk HES'ten çıkarak batıdaki yük merkezlerini besleyecek çok yüksek gerilim doğru akım sisteminin yeniden ele alınarak incelemesi yapılmıştır. Bu inceleme çok yüksek alternatif akım sistemine eşdeğer teşkil edecek bir doğru akım sistemi için oldukça detaylı bir şekilde hazırlanan şartname yoluyla, dünyadaki doğru akım teknolojisi konusunda en tanınmış imalatçı firmalardan toplanan teknik ve ekonomik veriler bazında yapılmıştır.

Atatürk HES sistemiyle karşılaştırmaya alınan eşdeğer doğru akım sisteminin ana parametreleri aşağıdaki gibidir ve sonuçlar şunlardır.

Nominal iletim kapasitesi	: 2x900 MW
Nominal gerilim	: $\pm$ 500 kV
Nominal akım	: 1800 A

Konverter istasyonlarının yeri : Gönderici uç Atatürk HES, alıcı uç Paşaköy (İstanbul)

- Konverter istasyonlarının maliyeti çok yüksek bulunmuştur (200 \$/kW)

- TEK'in amaçladığı çok uzun mesafelerde noktadan noktaya iletim olmayıp, iletim güzergahı üzerinde çeşitli terminallere uğrayarak transformatör merkezlerine ve yeni üretimlerin de entegrasyonuna imkan veren ve aynı zamanda çok değişiklik gösteren üretim planlamasına ve yük gelişmesine uyum gösterecek esneklikte yapım programlarına izin veren bir iletim sistemi kurmaktır.

- Konverter istasyonlarının aşırı yüklenme kabiliyeti azdır ve bunun artırılması pahalıdır.

- Gelecekte, özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu'da yürütülen büyük projeler (GAP gibi) uzun mesafe üzerinde büyük enerji transferi gereğini ortadan kaldıracaktır. Bu durumda 420 kV sistemi, bölgesel iletim ve bölgelerarası enterkonneksiyon fonksiyonlarını devam ettirerek ekonomik ömürleri boyunca hizmet vermeye devam edebileceklerdir.

- Yüksek gerilim doğru akım teknolojisi karmaşık olup alternatif akım teknolojilerinden farklıdır. Bu da, bu yeni teknoloji için gerekli teknik kadroyu yetiştirmekte büyük gayretleri gerektirecektir.

- Ülkemizde bugün 420 kV alternatif akım teçhizatının tüm bileşenlerinin imalat ve bakımını yapabilecek bir endüstri gelişmiştir.

- Türkiye enterkonnekte şebekesi bir bütündür. Türkiye'nin kapsadığı alan büyüklüğü bağımsız şebekelerin oluşturulmasını gerektirmemektedir. Bu nedenle asenkron bağlara gerek yoktur.

Yukardaki temel sonuçlardan da görüleceği gibi, etüdlere yapılmasına ve bunların güncelleştirilmesine rağmen yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletimi şimdilik gündemde değildir. Ancak yaklaşık 850 km'lik kuzeybatı-güneydoğu koridorunda enerji iletimi için bir alternatif oluşturmayı sürdürdüğü söylenebilir. Bunu gelecekteki ihtiyaçların ve enerji politikasının belirleyeceği açıktır. Dünyadaki bu konuda yapılan çalışmaların izlenmesi, literatür toplanması gibi çalışmalar yapılmasına devam edilmelidir [8].

6.3. 420 kV Yüksek Gerilim AC ve ± 500 kV HVDC Sistemlerinin Ekonomik Mukayesesi

Yüksek gerilim doğru akım iletim sistemi için maliyet tahminleri özellikle ayrıntılı bir şartname bazında dünyanın en tanınmış imalatçılarından alınan bütçe fiyatları ile yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibidir.

a) ± 500 kV'luk iki terminalli HVDC sisteminin ilk yatırım maliyeti (iki kutuplu 3 ve 4 demet iletkenli pheasant ve bir kutuplu 3 ve 4 demet iletkenli pheasant alternatiflerine bağlı olarak) 552 milyon \$ ile 616 milyon \$ arasındadır.

b) 420 kV'luk alternatif akım sistemi 3 demetli pheasant iletkenli iki iletim hattı (1922 km), şalt, transformatör ve seri kapasitör merkezleri dahil 353 milyon \$'dır.

c) Bakım ve işletme masraflarının AC sistem lehine olduğu açıktır. Diğer taraftan toplam kayıpların bugüne indirgenmiş değeri, TEK sistemi için yapılan analizlerde aradaki farkı kapatacak mertebede bulunmamıştır. Tam yükte çok yüksek gerilim alternatif akım sisteminde 112 MW ve doğru akım sisteminde 92 MW civarındadır. Dolayısıyla, ekonomik yönden de 420 kV'luk işletmedeki alternatif akım sisteminin devamına karar verilmiştir.

Bu arada, genelde bir karşılaştırmanın yapılabilmesi amacıyla gerçek dışı bir varsayımla, Türkiye şartlarına indirgenmiş bir uzun mesafe iletim problemi için 1989 yılı fiyatları ile 800 kV AC, 420 kV AC ve ± 500 kV DC iletim arasında ekonomik karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan varsayımlar şunlardır

- İletim mesafesi 940 km'dir (Atatürk HES-İstanbul).

- Bir defasında (doğudaki bütün santrallerin toplam kapasitesi 5400 MW) doğudan İstanbul'a iletilecektir (kademeli gelişme söz konusu değil).

- Üç alternatif sistem,

A. Tüm 420 kV AC, 3 demetli pheasant iletkenli 6 tek devreli enerji iletim hattı

B. Tüm 800 kV AC, 4 demetli Grackle iletkenli 3 tek devre enerji iletim hattı

C. Tüm ± 500 kV DC, tek kutuplu 3 adet 3 demetli pheasant iletkenli enerji iletim hattı

Sonuçta, 940 km iletim mesafesi için yıllık toplam masraflar ve kWh maliyeti aşağıdaki gibi bulunmuştur.

	Yıllık toplam masraf (106xUS \$)	Birim maliyet (US cent/kWh)
A. Tüm 420 kV AC	174.7	0.647
B. Tüm 800 kV AC	143.6	0.532
C. Tüm ± 500 kV DC	235.4	0.872

SONUÇ

Yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletimi, alternatif akım karşısında başlangıçtaki dezavantajlarının artık ortadan kalkmasıyla bugün için ciddi olarak üzerinde durulması gereken bir sistemdir. Bazı özel uygulamalar için eşsiz bir çözüm olması nedeniyle önemi daha da artmaktadır. Yarıiletken güç elektroniği ve mikroelektronik teknolojisindeki gelişmeler daha verimli, güvenilir ve ekonomik HVDC sistemleri kurulması konusunda pek çok problemi ortadan kaldırmıştır. Örneğin, dönüştürücü istasyonları için civa buharlı valflerin yerine tristörlerin kullanımı, bu alandaki maliyeti yarıya indirmiştir.

Ayrıca, çok uzun mesafeli alternatif akım sistemlerinde ortaya çıkan dezavantajlar doğru akım enerji iletiminde ortadan kalkmaktadır. Deniz altından kablo ile doğru akım enerji iletimi de aynı şekilde alternatif akıma göre daha üstündür.

Yüksek gerilim doğru akım enerji iletimindeki çalışmaların devamıyla, bu sistemde oluşan kayıplar sürekli azalmaktadır ve üstün kontrol teknikleri geliştirilmektedir. Dünyada, HVDC sistemlerinin kullanımına doğru artan bir eğilim vardır.

Yarıiletken elemanların ileriki yıllarda seri olarak üretilmeleri ve teknolojik gelişmeler sayesinde sürekli olarak ucuzlaması ve çok büyük güçler için üretilebilmeleri yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletimi lehine sonuçlardır.

Sonuç olarak, iletim sistem tipini seçmeden önce her iki enerji iletim sisteminin avantaj ve dezavantajlarının çok iyi etüd edilerek karşılaştırılması ve daha sonra

uygulamaya geçilmesi yerinde olacaktır. Ayrıca, her iki sistemin birbirine destek olacak şekilde kullanılması ile daha verimli sonuçlar alınabilir.



KAYNAKLAR

1. FINK, G.DONALD-BEATY H.WAYNE, Standard Handbook for Electrical Engineering, 11th Edition Mc Graw-Hill Book Company, 1978.
2. BAYRAM, M., Elektrik Santralları ve Şebekeleri, İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi, 1980.
3. SERİM, İ., Yüksek Gerilim Doğru Akımla Enerji İletimi, Kaynak Dergisi, Sayı 60, Eylül 1990.
4. UHLMANN, E., Power Transmission by Direct Current, Berlin Heidelberg, New York Springer Verlag, 1975.
5. ÖZAĞAÇ, B., Doğru Akımla Enerji İletimi, TMMOB-EMO Yayın Organı, Sayı 346, 1987.
6. YÜKSELER, N., Yüksek Gerilim Doğru Akımla Enerji İletimi ve Ekonomisi, Kaynak Dergisi, Sayı 30, Nisan 1985.
7. SEVAİOĞLU, O., HVDC Sistemleri ve Türkiye, Kaynak Dergisi, Sayı 60, Eylül 1990.
8. BABALIOĞLU, M., Yüksek Gerilim Doğru Akımla Enerji İletimi ve TEK'in Değerlendirmeleri, Kaynak Dergisi, Sayı 60, Eylül 1990.
9. KIMBARK, W.EDWARD, Direct Current Transmission I, Wiley Interscience, New York.
10. IEEE MONTECH'86, Conference on HVDC Power Transmission, September 29-October 1, 1986.
11. EPE'89 3rd EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, Proceedings Volume 1.

12. ASEA, HVDC Seminar, HV Switchgear and HVDC Converter Division, S771-01 Ludvika-Sweden.
13. DEMİRKUT, B., Elektrikle Enerji Taşınması, İDMMA Yayınları, Sayı 100, 1970.
14. PADİYAR, K.R., HVDC Power Transmission Systems, Wiley Eastern Limited, 1990.
15. GÜNGÖR, B.R., Power Systems, Harcourt Brace Jovanovich, 1988.



ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Sivas ili Divriği ilçesinde doğan NİHAT KÖSEDAĞI ilk ve ortaöğrenimini Divriği'de tamamladı. 1987 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi'nden 1991 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 1991 yılında aynı üniversitede Elektrik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. Halen özel bir şirkette mühendis olarak çalışmaktadır.