

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Doğru Akım İle Enerji İletimi

Yüksek Lisans Tezi

Celal Kocatepe

1992

52
5

Elk.

YILDIZ UNIVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU

DOGRU AKIM İLE
ENERJİ İLETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK MUH. CELAL KOCATEPE

İSTANBUL 1992

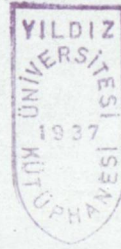
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot	: R 152 225
Alındığı Yer	: Fen Bil. Ens.
Tarih	: 17.4.95
Fatura	:
Fiyatı	: 30.000.-
Ayniyat No	: 1-5
Kayıt No	: 51081
UDC	:
Ek	:

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU

DOGRU AKIM İLE ENERJİ İLETİMİ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK MUH. CELAL KOCATEPE

İSTANBUL 1992

ÖNSÖZ

Tez çalışmamı yöneten ve kıymetli yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof.Dr.Hüseyin Çakır'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca, değerli mesai saatlerini bana ayırarak yardımcı olan sayın hocam Doç.Dr.Selim Ay'a teşekkürlerimi sunarım.

Celal KOCATEPE

Ocak-1992

Ö Z E T

Elektrik enerjisinin ilk olarak üretimi, iletimi ve kullanımı doğru akım ile olmuştur.

Alternatif akım ise doğru akıma göre bazı avantajları sebebiyle günümüze kadar üretim, iletim ve dağıtımda doğru akıma tercih edilmiştir.

Günümüzde, iletilen gücün ve mesafenin büyük değerlere ulaşması sebebiyle alternatif akım ile iletimde bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca denizaltı enerji iletiminde de alternatif akım ile iletimin bir takım dezavantajları olmaktadır.

Bazı hallerde, doğru akım ile enerji iletimi daha ekonomik olduğu gibi bazende tek çözüm yolu olmaktadır (Örneğin, frekansları farklı iki sistem arasında asenkron bağlantının yapılması).

Son yıllarda, gelişen teknoloji ile doğru akım ile enerji iletimi yeniden bir seçenek olmaya başlamıştır.

Bu çalışmada, doğru akım ile enerji iletim sistemi teorik esas, tasarım ve işletme açısından ayrı ayrı incelenmiş ve geleneksel sistemle (alternatif akım) çeşitli yönlerden karşılaştırmaları yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER

27

Sayfa

ÖZET

28

SUMMARY

29

1.BÖLÜM

GİRİŞ

31

1.1.Genel Giriş

1

1.2.Doğru Akım ile Enerji İletimi

2

1.2.1.Tarihçesi

2

1.2.2.Giriş

2

2.BÖLÜM

ALTERNATİF AKIM ile DOĞRU AKIMIN GENEL

43

KARŞILAŞTIRILMASI

43

2.1.Alternatif Akım ile İletim Sistemindeki

43

Zorluklar

5

2.2.Doğru Akımın Alternatif Akım Sistemine

44

Üstün Olduğu Noktalar

8

2.3.Doğru Akım İletim Sistemindeki Zorluklar

10

3.BÖLÜM

DOĞRU AKIM ile ENERJİ İLETİMİNİN İNCELENMESİ

47

3.1.Genel

12

3.2.Doğru Akım İletim Hatları

14

3.2.1.İletim Şekilleri

14

3.2.1.1.Tek kutuplu iletim

14

3.2.1.2.Çift Kutuplu İletim

15

3.2.1.3.Eş Kutuplu İletim

16

3.2.2.Ekonomik Hat Gerilimi

16

3.2.3.Boyutlandırma

18

3.2.4.Yalıtım

21

3.2.5.Elektrik Etkileri

21

3.2.5.1.Korona Etkileri

22

3.2.5.2.İletken ve Toprak

22

Hattındaki Alan Şiddeti

22

3.2.5.3.Radyo Engelleme

25

3.2.5.4.Radyo Parazitleri için

26

Alınan Önlemler

26

3.2.6.Hat Kayıpları	27
3.3.Çevirici İstasyonları	27
3.3.1.Şönt Kapasitörler	28
3.3.2.Doğru Akım Düzleme Reaktörleri	29
3.3.3.Çevirici Valfler	29
3.3.4.Alternatif Akım Filtreleri	31
3.3.5.Doğru Akım Filtreleri	35
3.3.6.Reaktif Güç İhtiyacı	35
3.3.7.Çevirici İstasyon Kayıpları	39
3.4.Parafudrlar	40
3.4.1.Tekrar Mühürlenemeyen Parafudrlar	40
3.4.2.Tekrar Mühürlenebilen Parafudrlar	41
3.5.Direkler ve Toprak Hattı	42
3.5.1.Direkler	42
3.5.2.Toprak Hattı	43
3.6.Toprak Dönüşü	44
3.6.1.Deniz Elektroduları	45
3.6.2.Toprak Elektroduları	45
3.7.Doğru Akım Kablo Sistemleri ve Kablo Tipleri	47
3.8.Devre Eşdeğerleri	49
3.8.1.Doğrultucu Eşdeğeri	49
3.8.2.Evirici Eşdeğeri	51
3.8.3.Komple Eşdeğeri	51
3.8.4.Örnek	53
3.9.Asenkron Bağ	54
3.10.Güç Akış Yönünün Değiştirilmesi	55
3.11.Doğru Akım İletim Sistemlerinin Kararlılık ve Kullanılabilirliği	56
3.11.1.Kararlılık	56
3.11.2.Kullanılabilirlik	56
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	63

1. B Ö L Ü M

1. G İ R İ Ş

1.1. GENEL GİRİŞ

İnsanoğlunun, şüphesiz en önemli buluşlarından olan elektriğin ve daha sonra da ampulün bulunması, elektrik enerjisinin yaşamımıza temel ihtiyaçlardan biri olarak girmesine neden olmuştur. Kısa süre sonra güç ve ısı kaynağı olarak da kullanılmaya başlamıştır. Uygulama alanının genişliğine, temizliği ve donanım sadeliği de eklenince elektrik enerjisi, konutlarda endüstride ve ticaretle, kısaca insanoğlunun yaşamında yaygın bir biçimde kullanılır olmuştur.

1879'da ilk elektrik lambasının bulunması ve elektrik enerjisinin aydınlatma maksadıyla yaygınlaşması, güç santrallerinin kurulmasına neden olmuştur.

1882'de 220/110 V.luk üç iletkenli doğru akım sistemi kurularak ilk olarak üretim ve iletim doğru akım ile yapılmıştır. Genellikle bu tip santraller ortalama 2 km. çaplı küçük bir alan içindeki aydınlatma ihtiyacını karşılamıştır.

Daha sonra alternatif akım teknolojisinin geliştirilmesiyle 1890'larda indüksiyon makinelerinin ve güçlü transformatörlerin ortaya çıkışıyla, üretim, iletim ve alıcılar için farklı gerilimlerin kullanılma imkanı elde edilmiş oldu. Böylece alternatif akım ile, önceleri elektrik enerjisi teminin ekonomik olmadığı düşünülen alanlara yüksek gerilim ile düşük kayıplı olarak, büyük güçlerin iletimi mümkün olunca, bu sistem, çalışma alanına girmiş oldu.

O zamandan bu yana elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması ve iletim teknolojisinin gelişmesiyle çok yüksek gerilimlerle (800 kV.), yüksek güçlerin (1000 MW'ın çok üstündeki güçlerin 1500 km. gibi) uzun mesafelere

iletilmeleri mümkün olmuştur.

Alternatif akımda, gerilim ayarlama imkanının kolay, generatör ve motorların doğru akımdakine göre daha ucuz olması sebebiyle, alternatif akım uygulamaları günümüze kadar gelmiş ve halen kullanılmaktadır. Bununla birlikte, 1954'ten bu yana yüksek gerilim doğru akım (YGDA) ile enerji iletimi benimsenmiş, 14000 MW'dan daha büyük güçlerin projeleri ve planlamaları yapılmış bulunmaktadır.

✓ 1.2. Doğru Akım ile Enerji İletimi

1.2.1. Tarihçesi

İlk uygulamaları anahtarlarda cıva buharlı tekniğin uygulamasıyla gerçekleştirilmiş olan yüksek gerilimli doğru akım enerji iletimi, ticari olarak ilk defa 1954'te İsveç'te Gotland adasına 96 km.lik mesafeye 150 kV. gerilim ile yapılmıştır.

YGDA sistemlerinin yaygınlaşması, son 15-20 yılda olmuştur. Dünyada uygulanan YGDA sistemlerinin sayısı giderek artmaktadır. Halen işletilmekte olan bazı doğru akımla iletim sistemlerinin listesi Tablo 1'de verilmiştir. Tablo'daki havai hatlı doğru akım sistemlerinin hemen hepsi çift kutuplu (bipolar) iletim hattına sahiptir.

Halen dünyada bu sistem ile en büyük çapta enerji iletimi Brezilya'daki (Itaipu Santrali ile Sao-Paolo arasındaki) ITAIPU sistemidir.

1.2.2. Giriş

Bilindiği gibi elektrik enerjisinin ilk iletim sistemi doğru akım ile yapılan iletim sistemidir.

Enerji iletiminde doğru akım veya alternatif akımın seçimi, iletimin teknik ve ekonomik özelliklerinin araştırılması sonucunda belirlenmektedir. Seçimi belirleyen

eski elan ekonomisi olmakta, istek güvenilirliği de önemli bir konudur. YGHA hatları, büyük ölçüde bir grup, çok uzak mesafelere iletilmesi gerektiğinde alternatif alan ile yapılan iletime göre daha ekonomik olmaktadır. Bugün 1800 km'ye kadar YGHA ile enerji iletimi

Bulunduğu Bölge	Ülke	İletim Mesafesi		Gerilim kV	Taşıma Gücü MW	İnşa Yılı
		Hat Km	Kablo Km.			
Manş	İng.-Fran.	0.	65.	100.	160.	1961
Volga-Don	Sovyetler B.	470.	0.	400.	720.	1965
Konti-Scan-1	Dan.-İsveç	95.	85.	250.	250.	1965
Sakuma	Japonya	0.	0.	2×125.	300.	1965
	Y.Zelanda	570.	39.	250.	600.	1965
Sardunya	İtalya	292.	121.	200.	200.	1967
Vancouver	Kanada	41.	33.	260.	312.	1969
Gothland-1	İsveç	0.	96.	150.	30.	1970
Pasifik Bağ.	ABD	1362.	0.	400.	1440.	1970
Rel Nehri	Kanada	0.	0.	2×80.	320.	1972
Nelson Nehri	Kanada	895.	0.	300.	1080.	1973
Nelson Nehri	Kanada	0.	0.	450.	1620.	1976
Kingnorth	İngiltere	82.	82.	266.	640.	1975
Cabora Bassa	Mozambik	1414.	0.	400.	1440.	1977
Inga-Shaba	Zaire	1700.	0.	500.	1120.	1977
Skagerrak	Norveç-Dan.	113.	127.	200.	500.	1977
Square-Butt	ABD	730.	0.	250.	250.	1977
Cabora Bassa	Mozambik	1414.	0.	533.	1920.	1979
CU	ABD	710.	0.	400.	1000.	1980
Itaipu-S.Pao.	Brezilya	2×830.	0.	600.	6300.	1983
Gothland-2	İsveç	0.	96.	150.	130.	1983
Konti-San-2	Dan.-İsveç	95.	85.	285.	300.	1965
Utah S. Cal.	ABD	800.	0.	500.	3200.	1983
Highg. Verm.	ABD-Kanada	0.	0.	120.	200.	1985
Manş	İng.-Fran.	0.	70.	270.	2000.	1986
Rihand Delhi	Hindistan	900.	0.	500.	1500.	1987

Tablo 1. Doğru Akım ile Enerji İletim Sistemlerinden Bazıları

asıl etken ekonomiklik olmakta, sistem güvenilirliği de önemli ölçüde etkilemektedir. YGDA hatları, büyük değerlerde bir gücün, çok uzak mesafelere iletilmesi gerektiğinde alternatif akım ile yapılan ilettime göre daha ekonomik olmaktadır (Bugün 1800 km.ye kadar YGDA ile enerji iletimi mümkün olmaktadır). Eger şartların zorlamasıyla iletimin hava hattı yerine kablolu olarak yapılması gerekiyorsa, bu durumda doğru akım hattının alternatif akım hattına göre ekonomik açıdan üstünlük sağladığı mesafe 50-100 km civarına inmektedir (Örneğin, 750 MW için kritik uzunluk havai hat sisteminde 500-600 km, kablolu sistemde 50 km civarındadır).

Boğaz atlamalarında veya adalara enerji iletiminde bağlantı alternatif akım kabloları ile yapıldığında, oluşan büyük kapasitif yükün kompanzasyonu gerekmektedir. Aynı durum alternatif akımlı çok uzun iletim hatlarında da meydana gelmektedir. Doğru akımın tercih edilmesi halinde bu mahzur ortadan kalkmaktadır.

Ayrıca farklı iki frekanslı alternatif akım sistemi doğru akım sistemi ile birbirine bağlanabilmekte ve güç akışı sağlanabilmektedir. Bugün kullanılan doğru akım ile iletim sisteminin uygulama alanları, genel olarak:

1. Uzun mesafelere havai hatlar ile güç iletimi,
 2. Büyük alternatif akım şebekeleri arası senkron ve asenkron bağlantı yapılarak güç iletimi,
 3. Su altından adalara, denizlerdeki petrol veya doğal gaz platformlarından veyahut, boğaz atlamaları suretiyle yapılan güç iletimi
- şeklinde dir.

2. B Ö L Ü M

ALTERNATİF AKIM İLE DOĞRU AKIMIN GENEL KARŞILAŞTIRILMASI

2.1. Alternatif Akım ile İletim Sistemindeki Zorluklar

1. Alternatif akım ile iletimde verimli güç akışı ilave düzenler (örneğin: kondansatörler, bobinler, faz kaydırıcıları,...) ile sağlanabilmektedir. Bu ise, hattın uzunluğunun artması halinde gerekmektedir. Hat uzunluğunun artması maliyeti de arttırdığından alternatif akım iletim hattı ile yapılan iletim, doğru akım hattına göre yapılan iletimden daha pahalı olmaktadır.

Alternatif akım ile iletimde uzunluğun artmasıyla gerilim ve akımların dengelenmesi için gereken "döndürme" tekniği doğru akım ile iletim sisteminde gerekmemektedir.

2. Alternatif akım iletim sisteminde endüktans probleminden dolayı stabilite (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 : Hattın sonu gerilimi [V]

δ : V_1 ile V_2 arasındaki açı (güç açısı)

X : Hattın reaktansı [Ω]

olmak üzere, iletilebilen maximum güç:

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X}$$

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

dir. Çok uzun hatlarda hattın reaktansı artacağından

iletilecek güç azalır, en önemlisi kararlılık açısından $\delta=30^\circ$ den fazla istenmemektedir. Bu da yaklaşık olarak iletilebilecek maksimum gücün ancak yarısının güvenli bir biçimde iletilebileceğini gösterir.

Doğru akımla enerji iletim hattında reaktans ve güç açısı sınırlamaları bulunmadığından aynı kesitteki iletkenlerle daha fazla güç iletilebilmektedir.

3. Alternatif akım iletim sisteminde gerilimin frekansına ve kablodaki izolasyon maddesinin dielektrik sabitine bağlı olarak bir takım kayıplar oluşur.

Bu kayıplar, yalıtkan madde içindeki dipollerin elektrik alanı doğrultusuna yönelmeleri sırasında moleküllerin birbirine sürtünmeleriyle oluşur, bunlara dipol kaybı denir.

Katı yalıtkan maddenin dielektrik sabitleri farklı parçacıklardan oluşmasından dielektrik histerisiz kayıpları meydana gelmektedir.

Doğru akım ile iletim kablolarında dielektrik kayıpları ve yükleme akımları olmadığından aynı kesitteki alternatif akım iletim kablolarına göre daha fazla güç iletilebilmektedir.

4. Alternatif akım iletim sisteminde, ideal bir iletim hattı hatta gerilim düşmesinin olmadığı ve güç iletimin sıfır derecelik güç açısıyla yapıldığı duruma karşılık düşmektedir.

İdeal bir iletim hattı, hattın sonunda karakteristik empedans (Z_0) değeri ile yüklü olması halidir.

Z : Hattın Empedansı, $[\Omega]$

Y : Hattın Admitansı, $[1/\Omega]$

olmak üzere karakteristik (naturel) empedans,

$$Z_0 = \sqrt{Z/Y} \quad [\Omega]$$

olarak tarif edilir. Hattın tabii gücü ise,

$$P_n = \frac{U^2}{Z_0} \quad [W]$$

dır. Burada U (Volt olarak), fazlararası gerilim değeridir.

Tablo 2'de çeşitli hat gerilim değerlerine karşılık gelen tabii güçler verilmiştir.

Fazlararası Gerilim (kV)	Tabii Güç (MW)
10	0,27
20	1,07
30	2,40
110	32
150	60
220	130
400	170 (1)
400	660 (2)

Tablo 2. Bazı Fazlararası Gerilime Karşılık Düşen Tabii Güçler

(1) Dalga direnci 280 Ω olan ikili demet iletken.

(2) Dalga direnci 240 Ω olan dörtlü demet iletken.

Tablo 2'den de görüldüğü gibi her geçen gün ihtiyaç duyulan enerji artışı göz önüne alınacak olursa büyük güçlerin iletimi için alternatif akım sistemindeki tabii güçler pek büyük değerde olmamaktadır.

Tabii gücü arttırmak için denklemden de görüldüğü gibi U gerilimi arttırılabilir veya Z_0 , karakteristik empedansı

azaltılabilir. Fakat karakteristik empedans hattın boyutlarından oldukça bağımsızdır ve genellikle sabit bir değer olarak 375 Ω alınır. Gerilimin arttırılması ise, korona olayı ve uzun iletim hatlarındaki kapasite sebebiyle bazı sorunlar ortaya çıkarmaktadır.

Alternatif akım sisteminde yüksek gerilim hatlarında daima tabii gücü iletmek mümkün değildir. Eğer iletilen güç tabii güçten daha küçükse, gerilim yükselmesi olur ve ilave selflere ihtiyaç duyulur. iletilen gücün tabii güçten büyük olması halinde gerilim azalması görülür ve ilave kapasiteler gerekir.

2.2. Doğru Akımın Alternatif Akım Sistemine Üstün Olduğu Noktalar

1. Frekansları farklı iki alternatif akım sistemi birbirine ancak doğru akım iletim sistemi ile ekonomik ve güvenilir bir şekilde bağlanabilir ve iki taraflı olarak kontrol edilebilir. Asenkron bağ adı verilen bu sistem günümüzde kullanılmaktadır.

2. Doğru akım enerji iletim hatları için, daha basit daha küçük boyutlu ve hafif direk kullanımı gerekmektedir. Genellikle yüksek gerilim doğru akım sistemleri alternatif akım sistemlerine göre yaklaşık % 25 daha az arazi şeridi kaplarlar.

3. Doğru akım enerji iletiminde, tristörlerin tetikleme açıları değiştirilmek suretiyle iletilen gücün, yönü ve büyüklüğü değiştirilebilmektedir.

4. Doğru akım iletim sistemi için kullanılan çift kutuplu (bipolar) veya eş kutuplu (homopolar) iletim sistemlerinde iletkenin birinin arızalanması durumunda güç iletimi diğer iletkeniden veya toprak dönüşünden sağlanabilir.

Dengeli üç fazlı alternatif akım sisteminde ise fazlardan birinde arıza olursa enerji iletimi tümüyle sağlanamamaktadır.

5. Alternatif akım iletim sisteminde maliyetin büyük kısmı iletkenler üzerinde olmaktadır.

Doğru akımla enerji iletiminde havai hatlarla veya denizaltı kablosu ile yapılan iletim, reaktif güç akışının ve kabuk etkisinin olmaması sebebiyle daha ucuza mal olmaktadır. Aynı iletim kapasitesine sahip iki sistem için doğru akım sistemi alternatif akım sisteminden yaklaşık % 33 daha ucuza mal olur. Kullanılacak izolator ve hırdavat malzemelerinde de ortalama olarak aynı oran korunur.

Enerji iletim yoğunluğu alternatif akım sistemindekinden yaklaşık dört kat fazladır.

6. Doğru akım iletim hatlarında bir kısa devre arızası halinde geçen akım yüksek hızlı kontrol sayesinde küçük değerlerde (örneğin nominal akımın iki veya üç katında) sınırlandırılabilir. Böylece doğru akım sistemi, alternatif akım sistemi tarafından beslenen kısa devre akımlarının ihmal edilebilir seviyelere indirilmesine yardım etmiş olur.

7. Doğru akım iletim sisteminde aynı uzaklık ve aynı verim değeri için daha düşük gerilim ile iletim yapılabilmektedir. Örneğin, 100 km.lik bir hatta, hat veriminin % 90 olması durumunda doğru akım enerji iletim hattında $U=24,3$ kV. luk gerilim gerekirken, alternatif akım enerji iletim hattında ise $U=43$ kV.luk gerilim değerine ihtiyaç vardır.

Alternatif akım iletim sisteminde izolasyon malzemesi, hem daha yüksek gerilim ve hem de gerilimin maksimum değeri ile zorlandığından daha fazla izolasyon malzemesi kullanılması gerekmektedir.



8. Aynı kesit ve aynı gerilimde (alternatif akımın tepe değerine eşit bir gerilimde) korona kaybı, alternatif akım iletim hatlarınıninkinden çok daha azdır. Bu güç kaybı açısından değil, radyo ve televizyon yayınlarını engellemesi bakımından önemlidir.

Alternatif akımda korona kayıplarını azaltmak için demet veya halka iletken kullanma zorunluluğu vardır, doğru akım iletim hatlarında ise normal kablolarla iletim yapılabilir.

2.3. Doğru Akım iletim Sistemindeki Zorluklar

1. Doğru akım ile iletim sisteminde kesiciler önemlidir. Alternatif akımda akım periyodik olarak sıfırdan geçtiğinden kesicilerin çalışması nisbeten basit olup kesme işlemi akım sıfırdan geçerken yapılabilir. Doğru akımda ise akım sıfırdan geçmediğinden kesiciler için özel donanımlar gerekmektedir.

2. Alternatif akım enerji iletim sisteminde, talep edilen gücün artması halinde şebekenin, güç iletimi için dallanması ve koruma sistemi kolaylıkla yapılabilir.

Doğru akım iletim sisteminde ise, böyle bir ek bağlantı, güç akışının kontrolü, arızanın farkedilmesi, koruyucu aletlerdeki yetersizlikler nedeniyle oldukça zordur.

Genellikle iki uçlu sistemler kullanılmakta olup, kontrolü ve koruma sistemi daha karmaşık olan çok terminalli sistemlerin üzerinde araştırmalar yapılmaktadır.

3. Doğru akım iletim hatları civarında elektrik alan şiddeti, havanın delinme geriliminden daha yüksektir ve bu hatların civarında iyonizasyona sebep olur. İyonlar rüzgarın da etkisiyle 1 km. den fazla uzaklaşabilirler. Alternatif akım hatlarında ise periyodun artı ve eksi

alternanslarında alanlar ters olduğundan iyonlar uzaklaşamaz.

Yapılan ölçümlerde 500 kV.luk alternatif akım iletim hatlarının altındaki toprak düzeyinde alan şiddeti 9 kV/mm iken aynı gerilim değerindeki doğru akım iletim hatları için bu değer 30 kV/mm olarak tesbit edilmiştir.

4. Doğru akım ile iletim sisteminde doğrultucu ve evirici istasyonlarının ilk yapım maliyetleri, çevirici valfleri, filtre düzenleri, soğutma ve kontrol düzenlerinin kullanılması nedeniyle yüksektir.

5. Topraklanmış doğru akım iletim sistemleri topraklama yerinden itibaren 30-40 km. yarıçaplı bir daire içinde, yeraltı su boruları ve yeraltı kablolarında elektrolitik hasara sebep olmaktadır. Topraklanmış doğru akım denizaltı kabloları ise denizci pusulasında hatalara neden olur.

6. Doğru akım ile iletim sisteminde kullanılan çeviricilerin açma ve kapama sırasında ürettiği yüksek frekanslı gerilimler, radyo ve televizyon yayınlarını etkilemektedir. Bunu önlemek için koruyucu ve ayırıcılarda metal topraklama gerekmektedir.

Üretilen bu yüksek frekanslı gerilimlerin alternatif akım sistemlerini etkilemesini önlemek için filtre devrelerinin yapımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yine doğrultucu ve eviricilerin, yüksek değerlerde reaktif güce ihtiyaç duydukları bilinmektedir.

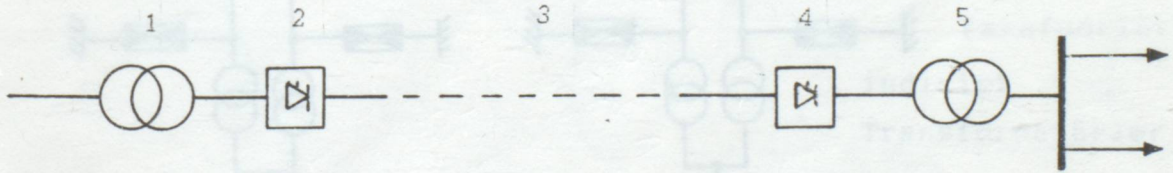
3. B Ö L Ü M

DOĞRU AKIM İLE ENERJİ İLETİMİNİN İNCELENMESİ

3.1. Genel

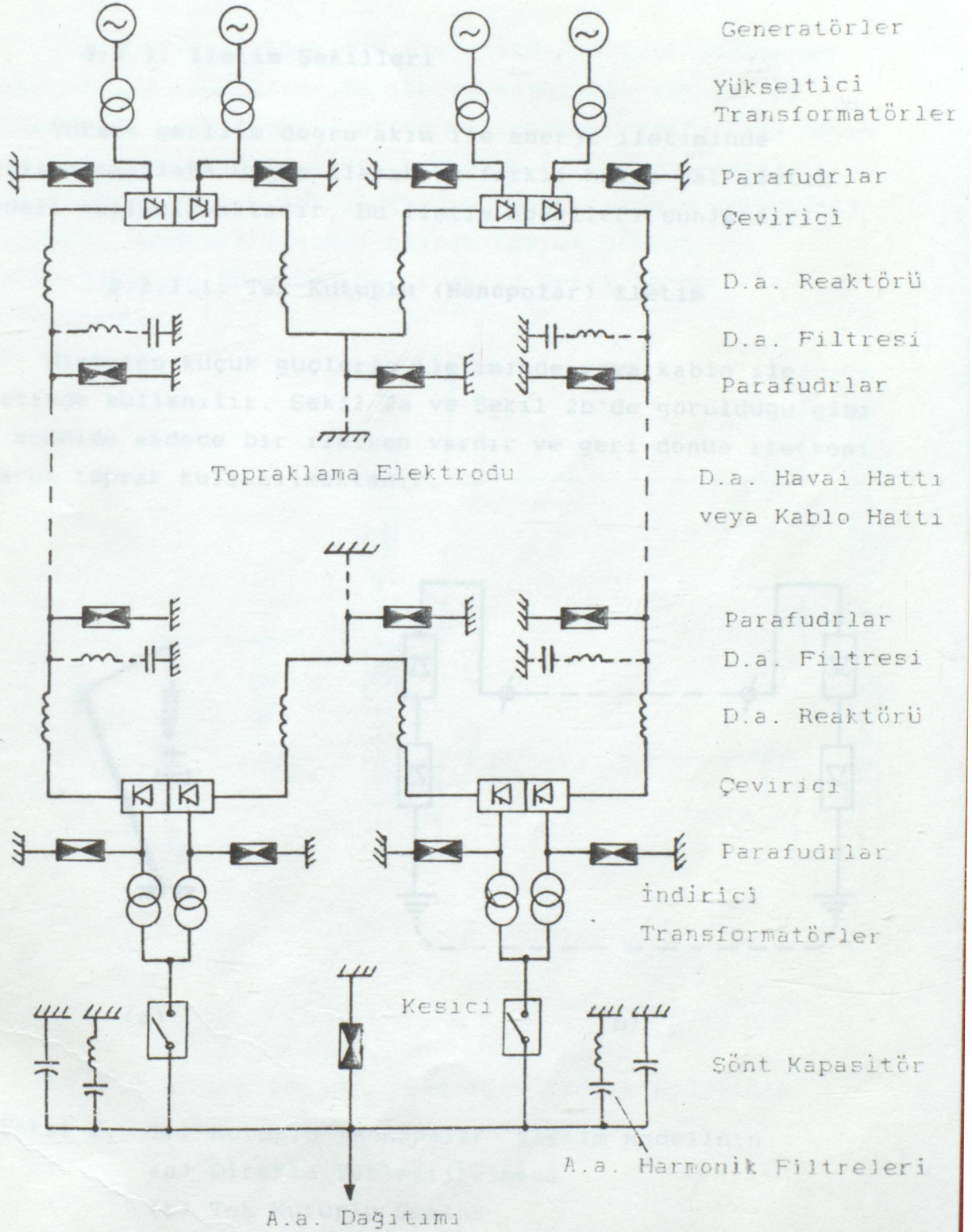
Yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletimi havai hat veya kablo sisteminin iki ucunda çevirici istasyonlarından meydana gelmektedir. Hattın başında (gönderici uçta) doğrultucular ve hattın sonunda (alıcı uçta) eviriciler bulunmaktadır.

Prensip olarak, üretilen alternatif gerilim, transformatörlerle yükseltildikten sonra doğrultucularla doğrultulur ve hatlarla iletilir. Hattın sonunda eviricilerle alternatif akıma dönüştürüldükten sonra transformatörlerle gerilim düşürülerek dağıtımı yapılır. Şekil 1a'da tek kutuplu şeması ve Şekil 1b'de genel görünüşü verilmektedir.



1. Yükseltici Transformatör
2. Doğrultucu İstasyonu
3. İletim Hattı
4. Evirici İstasyonu
5. İndirci Transformatör

Şekil 1a. Tek Kutuplu Şema



Sekil 1b. Çift Kutuplu Bir İletim Hattının Elemanları ve Genel Görünüşü

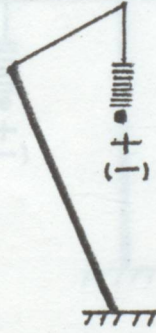
3.2. Doğru Akım İletim Hatları

3.2.1. İletim Şekilleri

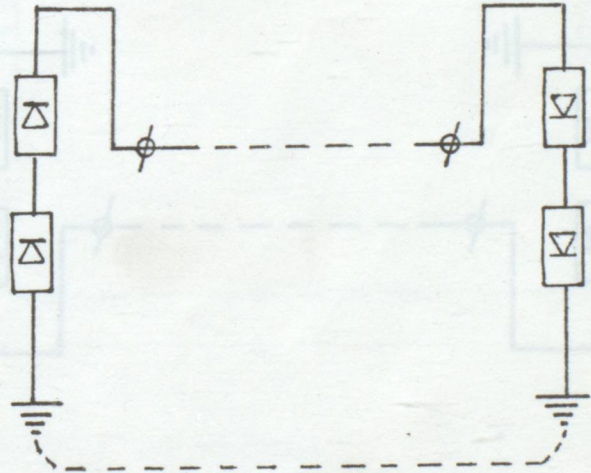
Yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletiminde çeşitli amaçlara uygun olarak üç farklı havai hat iletim modeli kullanılmaktadır. Bu iletim modelleri şunlardır:

3.2.1.1. Tek Kutuplu (Monopolar) İletim

Nisbeten küçük güçlerin iletiminde veya kablo ile iletimde kullanılır. Şekil 2a ve Şekil 2b'de görüldüğü gibi bu modelde sadece bir iletken vardır ve geri dönüş iletkeni olarak toprak kullanılmaktadır.



(a)



(b)

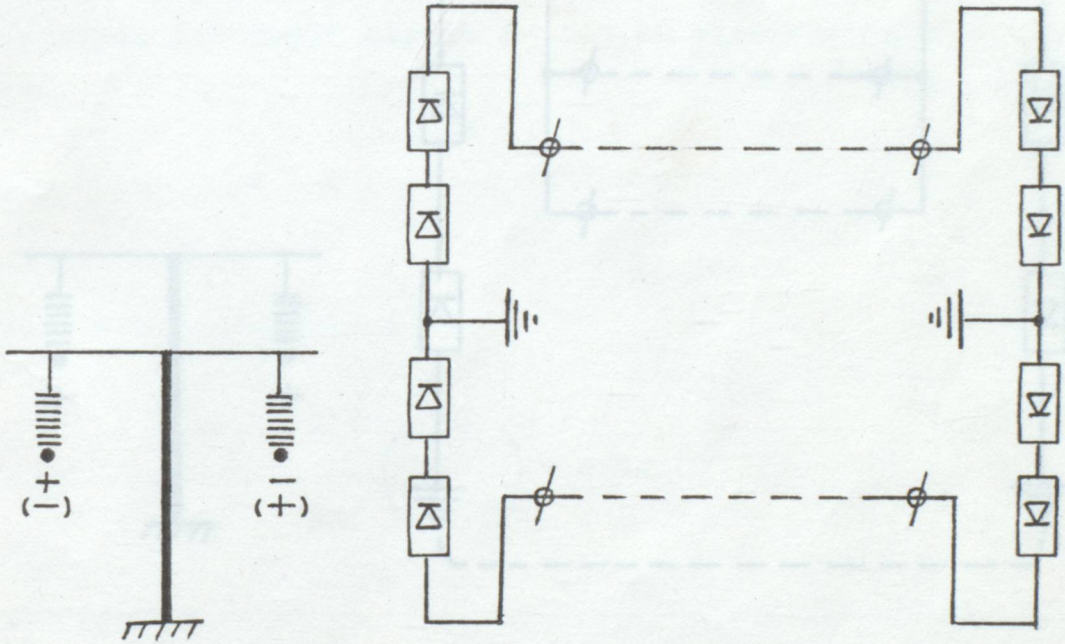
Sekil 2. Tek Kutuplu (Monopolar) İletim Modelinin

(a) Direkte Yerleştirilmesi

(b) Tek Kutuplu Şeması

3.2.1.2. Çift Kutuplu (Bipolar) İletim

Havai hat direklerinin dizaynında mekanik yönden en uygun iletim modelidir. Bu iletim modelinde farklı iki kutba (+ ve -) ait iki iletken kullanılmaktadır. Geri dönüş iletkeni gerekmemekte olup, herhangi bir kutbun toprak hatası olması (veya tek iletkenin kapasitesinin yetmemesi) durumunda yardımcı iletken olarak toprak dönüşü kullanılabilir. Bu model Şekil 3a ve Şekil 3b'de görülmektedir.



Şekil 3. Çift Kutuplu (Bipolar) İletim Modelinin (a) Direkte Yerleştirilmesi (b) Tek Kutuplu Şeması

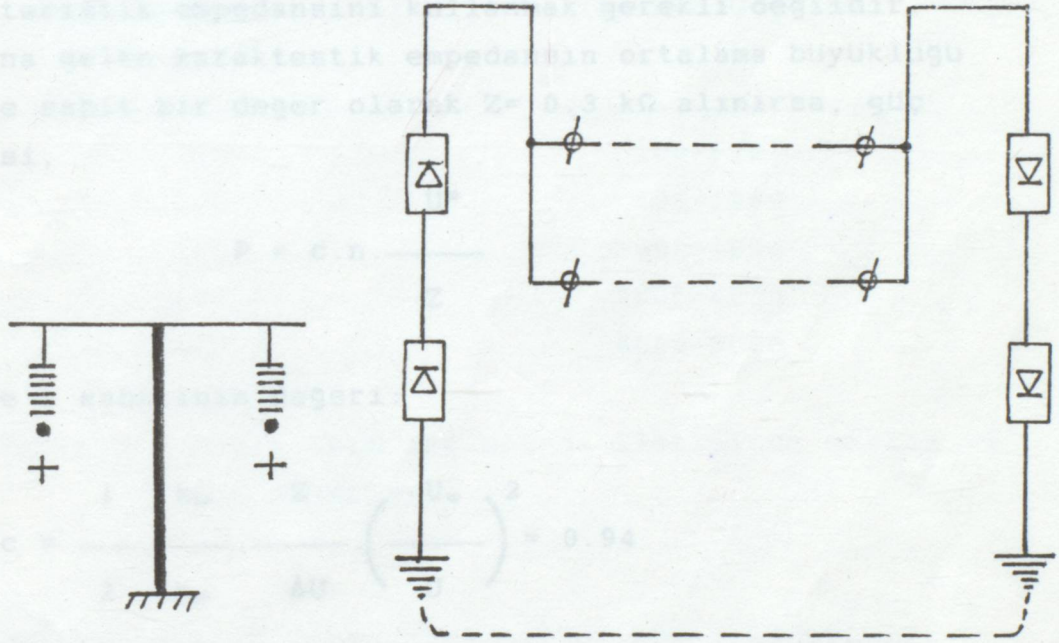
Şekil 3. Çift Kutuplu (Bipolar) İletim Modelinin
(a) Direkte Yerleştirilmesi
(b) Tek Kutuplu Şeması

3.2.1.3. Enerji Hattı Çevirici

Enerji hatları, bir fazın pozitif (+) kutbuna ait bir iletken, bir toprak dönüşü (grounding) simgesiyle toprağa bağlanmıştır. Altta, bir fazın negatif (-) kutbuna ait bir iletken, bir toprak dönüşü (grounding) simgesiyle toprağa bağlanmıştır. İletkenler, bir toprak dönüşü (grounding) simgesiyle birbirine bağlanmıştır.

3.2.1.3. Eş Kutuplu (Homopolar) İletim

Korona kayıplarını azaltmak ve (çift kutuplu iletim modelindeki gibi) direk dizaynının uygunluğu bakımından aynı polariteli iki (veya daha fazla) iletken kullanılarak yapılan iletim modelidir. Şekil 4a ve Şekil 4b'de görüldüğü gibi dönüş iletkeni olarak toprak kullanılmıştır.



(a)

(b)

Şekil 4. Eş Kutuplu (Homopolar) İletim Modelinin

(a) Direkte Yerleştirilmesi

(b) Tek Kutuplu Şeması

3.2.2. Ekonomik Hat Gerilimi

Gerilim seviyesi bir takım optimizasyonlar sonucu belirlenmektedir. Örneğin, iletilen güç, çevirici

istasyonların maliyetleri, hat maliyetleri, toplam kayıp maliyetleri göz önüne alınmaktadır. Burada yaklaşık bir değer vermesi açısından alternatif ve doğru akım hatları ile ilgili olarak ekonomik gerilim şöyle bir düşünceyle verilebilir:

A.a. sistemlerinde iletim gücü P, genellikle doğal güce karşılık gelir. Karakteristik empedans ekonomik hesaplamalar için pratikte uygun büyüklüktedir. Bu değer doğru akım için de kullanılabilir. Var olan hattın karakteristik empedansını kullanmak gerekli değildir. Meydana gelen karakteristik empedansın ortalama büyüklüğü yerine sabit bir değer olarak $Z = 0.3 \text{ k}\Omega$ alınırsa, güç ifadesi,

$$P = c.n. \frac{U^2}{Z}$$

dir ve c sabitinin değeri:

$$c = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_u}{k_p} \cdot \frac{Z}{\Delta U} \cdot \left(\frac{U_0}{U} \right)^2 = 0.94$$

dür. Burada

n: Kutup sayısı

Z: Karakteristik empedans [Ω]

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

k_p : Birim güç başına maliyeti [TL/kW]

U_0 : Referans gerilimi [kV]

U : Hat gerilimi [kV]

ΔU : Gerilim düşümü [V/km]

nü ifade eder, c değeri yaklaşık 1 alınarak ekonomik güç hemen hemen doğal güce eşit kabul edilebilir. Yukarıdaki güç ifadesinden ekonomik gerilim:

Tek kutuplu D.a. hattı için	$U_{(kV)} = 17 \cdot \sqrt{P_{(MW)}}$
İki kutuplu D.a. hattı için	$U_{(kV)} = 12 \cdot \sqrt{P_{(MW)}}$
Üç fazlı A.a. hattı için	$\sqrt{3} \cdot U_{(kV)} = 17 \cdot \sqrt{P_{(MW)}}$

şeklinde ifade edilebilir. Yüksek gerilim doğru akım sistemlerinde ulaşılan gerilim ve taşınan güç değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

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

Tablo 3. Doğru akım ile enerji iletiminde gerilim ve güç değerleri

Yüksek gerilim doğru akım sisteminde standart bir gerilim yoktur. ± 50 kV ile ± 600 kV arasında bir düzineden fazla gerilim seviyesi kullanılmaktadır.

İletilen güç, çift kutup başına (bipolar) 30 MW ile 3150 MW arasında değişmektedir.

3.2.3. Boyutlandırma

Havai iletim hatlarının boyutlandırılması herşeyden önce bir maliyet sorunudur. Aynı izolasyon özelliklerinde kutup veya faz başına farklı iletken kesitli iletim hatları için direklerin dikilmesi, istimlak bedelleri v.b. maliyetler belirlenecek olursa, bu maliyetlerin kutup sayısı (n) ve kutup başına iletken kesiti (q) ile orantılı

olduğu görülür.

Diğer taraftan eğer kesit aynı kalırken, izolasyon özellikleri değiştirilirse, belirli bir gerilim sınırına kadar izolasyon özellikleri ve kutup sayısı ile orantılı bir ifade bulunacaktır. İzolasyon özellikleri daha önce bahsedildiği gibi toprağa göre nominal iletken gerilimi (U) ile ilişkili ise, iletim hattı uzunluğunun kilometresi başına toplam maliyet:

$$K_0 + n.k_U.U + n.k_q.q$$

olarak ifade edilebilir. Demet iletkenler kullanıldığında, q her kutup için toplam kesittir. k_q (birim kesit, birim uzunluktaki iletken maliyeti, TL/M.mm².kutup) demetteki iletkenlerin sayısıyla nispeten az bir şekilde artmaktadır ve ihmal edilebilir. Hattın bir kilometresi için bir yıl boyunca oluşan kayıplar,

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

şeklinde olur. Burada, q iletken kesiti ve J akım yoğunluğu şeklindedir.

Burada P, planlanan hat için nominal güç, [kW]

T_p , kayıpların oluştuğu zaman, [sn]

ve ρ , iletken özgül direncidir [Ω .mm²/km]

Bu son ifade kilowattsaat başına birim fiyat ile çarpıldığı zaman, kayıpların yıllık maliyetini verir. Yıllık kayıpların kullanılması, faiz ve amortisman dahil edilmeden aynı zamanda sermaye faktöründe hattın ana maliyetlerini de dahil etmek için uygundur. Bir kilometre için kayıp-maliyetleri :

$$\Delta U = \frac{(P/U)^2 \cdot \rho}{k_P \cdot n \cdot q}$$

olarak ifade edilebilir. Bu ifade ile hattın kilometresi başına toplam maliyeti veren ifadenin son terimi $n \cdot k_Q \cdot q$ 'nın optimizasyonu sonucu:

$$n \cdot q = \sqrt{\frac{k_P}{k_Q}} \cdot \frac{P}{U} \cdot \rho$$

$$J = \frac{P}{n \cdot q \cdot U} = \sqrt{\frac{k_Q}{k_P \cdot \rho}}$$

$$\Delta U = J \cdot \rho = \sqrt{\frac{k_Q}{k_P}} \cdot \rho$$

elde edilir. Burada, q iletken kesiti ve J akım yoğunluğu bazen gerçek değerler olarak belirtilir, bazen de eşdeğer bakır iletim hattı olarak seçilir. Kilometre başına omik gerilim düşümü ΔU , aşağıda tercih edilen,

$$k_Q = 20 \text{ US } \$/\text{kV.km.kutup}$$

$$k_Q = 4 \text{ US } \$/\text{km.mm}^2.\text{kutup}$$

$$k_P = 200 \text{ US } \$/\text{kW}$$

$$\rho = 0,032 \text{ k}\Omega.\text{mm}^2/\text{km} \text{ (Alüminyum)}$$

değerleri ile km başına omik gerilim düşümü,

$$\Delta U = 25,3 \text{ V/km}$$

elde edilir. Gerilimde korona kayıpları ve radyo

Maliyet oranı k_q/k_p 'nin karekökü yukarıda ΔU denkleminde ortaya çıktığı için bölgesel maliyet seviyelerindeki farklar önemsizdir. Yani ekonomik gerilim düşümü genellikle 25 V/km değeri ile sınırlıdır. Artık gücün iletimine yönlendirilmiş bir iletim hattı için gerilim düşümü $\sqrt{2} \times 25 = 35 \text{ V/km}$ olarak alınarak küçük kayıp maliyetleri hesaplanabilir.

3.2.4. Yalıtım

YGDA projelerinde tipik değerler aşırı gerilim için 1,5-1,7 p.u (per-unit) ve aşırı akım için 2 p.u. olarak alınmaktadır. Bu değerler ise doğru akım ile iletim hatlarındaki maliyeti düşürmektedir. D.a. hatlarında kirlilik açısından a.a. hatlarına göre daha hassas olunması gerekmektedir. Atlama uzaklığı ise d.a. hatları için daha uzundur. Tipik değer olarak 2,5-2,8 cm/kV. bilinmektedir.

3.2.5. Elektrik Etkileri

Kapladıkları arazi şeridinin daha dar olması nedeniyle, yüksek gerilim doğru akım sistemlerinin enerji iletim yoğunluğu, a.a. sistemlerine göre daha yüksektir. Enerji yoğunluğunu arttıran bir başka neden de hattan reaktif güç akmaması ve A.a. sistemlerde görülen kabuk etkisinin olmamasıdır. D.a. ile a.a. iletim sistemleri arasında enerji iletim yoğunluğu oranı yaklaşık 4 tür.

Doğru akım iletim hatlarında çevre koşullarının ve korona etkilerinin göz önüne alınması gerekmektedir. İletkenlerin çevresinde korona ile bileşke saha yükü ve iletken ile toprak seviyesindeki elektrostatik alan artar.

3.2.5.1. Korona Etkileri

Doğru gerilimde korona kayıpları ve radyo engellemeleri uzun deneylerle araştırılmıştır.

Doğru gerilimde iletken etrafında aynı polariteli iyonların ayrılması için zamanları olmasına karşılık, alternatif akımda iyonlar geri çekilirler. Doğru gerilim ile böylece iletken etrafında derhal yük alanı meydana gelir. Alternatif akımda olmayan bu alan korona olayının etkilerinde farklı fiziksel durumlara yolaşmaktadır.

3.2.5.2. Iletken ve Toprak Hattındaki Alan Şiddeti

iletken yarıçapı r olmak üzere, yarıçapı R olan bir daire üzerinde üniform dağılmış m sayıda iletkenler destesi ile bunun civarından merkezî uzaklığı s de yerleştirilmiş olan iletkenler arasındaki maksimum alan şiddeti şöyle verilir:

$$E_{max} = \left[1 + (m-1) \cdot \frac{r}{R} \right] \cdot E = \left[1 + (m-1) \cdot \frac{2 \cdot r}{s} \cdot \text{Sin} \cdot \frac{\pi}{m} \right] \cdot E$$

A: İki iletken arasındaki mesafe

H: Ortalama iletken yüksekliği

s' : Bir iletken için geometrik ortalama mesafe

değeri olmak üzere:

$$s' = \frac{s}{\pi} \cdot \sqrt{m-1} \cdot \frac{\prod_{x=1}^{m-1} \text{Sin} \frac{x \cdot \pi}{m}}{\text{Sin} \frac{\pi}{m}}$$

olarak alınırsa iki iletken arasındaki nominal alan şiddeti

$$E = \frac{2.H}{r} + (m-1) \cdot \frac{2.H}{s'} + k \cdot \frac{m}{2} \cdot \ln [1 + (2H/A)^2] - \varphi \cdot \lambda$$

olarak ifade edilir.

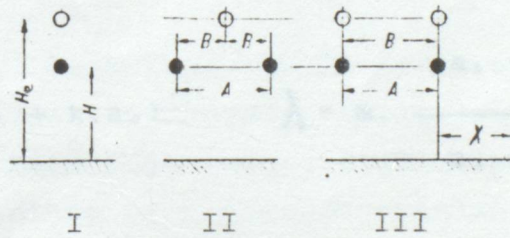
Bu denklemde k değerleri şöyledir

İki kutuplu iletim hattı için $k = -1$

Tek kutuplu iletim hattı için $k = 0$

Eş kutuplu iletim hattı için $k = 1$

φ ve λ değerlerinde ise toprak telinin Şekil 5'de gösterildiği haller için dört sabitten yararlanılmaktadır.



I Toprak Hatlı Bir Kutuplu Hat

II Bir Toprak Hatlı İki Kutuplu Hat

III İki Toprak Hatlı İki Kutuplu Hat

Şekil 5. İletken civarındaki alan şiddetinin hesaplanması için, toprak hatlı doğru akım iletim hattı şekilleri

E_e olarak ifade edilebilir.

$$a_1 = \ln \frac{H_e + H}{H_e - H} \quad a_2 = \frac{1}{2} \ln \frac{B^2 + (H_e + H)^2}{B^2 + (H_e - H)^2}$$

3.2.5.1. Radyo Engellenmesi (Girisim)

Frekanslar $2.H_e$ tiğinden, $2.H$ den yüksek frekanslarda $a_3 = \ln \frac{2.H_e}{r_e} + (m_e - 1) \ln \frac{S_e'}{S_e}$ na neden olur.

$$a_4 = \frac{m_e}{2} \ln [1 + (2.H_e/A)^2]$$

Toprak hatsız bütün durumlarda $\lambda = 0$ alınmalıdır.

Tek ve eş kutuplu (Şekil I ve III durumlarındaki) iletim hatları için:

$$\gamma = \frac{m_e}{n_e} (a_1 + k.a_2) \quad \lambda = m_e \frac{a_3 + k.a_4}{a_1 + k.a_2}$$

Buradan γ ve λ olarak E_{max} ve E_{min} kV/m olarak hesaplanabilir.

Eş kutuplu (II durumundaki) iletim hatları için

$$\gamma = m_e.a_2 \quad \lambda = 2.m_e \frac{a_2}{a_3} \quad \text{ile hesaplanır.}$$

Buradan, toprak yolundaki nominal alan şiddeti

$$E_e = \frac{r}{r_e} \cdot \lambda \cdot E \text{ olarak ifade edilebilir.}$$

3.2.5.3. Radyo Engellemesi (Girişimi)

Tristörlerin tetiklenmesi, köprülerden yüksek frekansta elektromagnetik dalga yayılmasına neden olur. Cihazlardaki boş kapasitanslarda biriken yükün değişimi, sistemde yüksek frekanslı salınımlar meydana getirir.

Radyo girişimi, Şekil 5'de gösterildiği gibi en dış yatay mesafe $x=30$ m.de, bant genişliği $\Delta f=9$ kHz olan bir alan için ve 1 MHz'lik faz frekansında ölçülmüştür. Alternatif akım hatlarındaki girişim ölçme cihazlarına benzer ölçü aletleri ile ölçmeler yapılır.

Pozitif polariteli bir iletken için temel değer yaklaşık

$$F_o = 25 + 10 \cdot \log m + 20 \cdot \log r + 1,5 \cdot (E_{max} - E_o) \quad [dB]$$

Burada, r , cm olarak E_{max} ve E_o kV/cm olarak denkleme girer. E_o referans alan şiddetidir, deniz seviyesinde 22 kV/cm alınır ve hava yoğunluğuna bağlı olarak azalır.

Bir negatif iletken için girişim ortalama olarak 20 dB'in altındadır ve ihmal edilebilir.

Temel değer tesbiti için, düşünülenden farklı durumlar da F_o 'a şu değerler ilave edilir.

$$\text{Frekans } f[\text{MHz}] \geq 0,5 \text{ MHz} \dots\dots\dots F_1 = 20 \cdot \log \frac{2}{1+f^2} \quad [dB]$$

$$\text{Bant genişliği } \Delta f[\text{kHz}] \dots\dots\dots F_2 = 20 \cdot \log \frac{\Delta f}{9} \quad [dB]$$

$$\text{Mesafe } X \text{ [m]} \geq 30\text{m} \dots\dots\dots F_s = 20 \cdot \log \frac{H^2 + 30^2}{H^2 + X^2} \text{ [dB]}$$

Eğer bir noktada a, b, c, ... iletkenlerinden girişim $F_a, F_b, F_c, \dots$ ise ve F_a diğerlerinden daha büyük ise, birleşik girişim seviyesi,

$F = F_a + 10 \cdot \log(1 + 10^{-0.1(F_a - F_b)} + 10^{-0.1(F_a - F_c)} + \dots)$ ile hesaplanabilir.

İki kutuplu pozitif iletkenli iletim hattı ile negatif iletken üzerindeki toprak hattı beraberce girişim seviyesini belirler, temel değer, P nominal güç olmak üzere

$$F_o = 5(1 + \log \frac{P}{n}) + 1,5 (E_{max} - E_o) \text{ [dB] dir.}$$

3.2.5.4. Radyo Parazitleri için Alınan Önlemler

Frekans aralığı 0,1-1 MHz.lik radyo haberleşmesine karışmalar şu yolla azaltılabilir:

- Tesis yerinin bir vadi olarak seçilmesi
- Manevra istasyonunun izolasyon tipinin radyo parazitlerini önleyecek şekilde seçilmesi
- Tristör köprülerinin yerinin elektromagnetik radyasyonu engelleyecek şekilde tasarlanması
- Çevirici manevra istasyonundaki iletkenlerin boyları ve yüksekliklerini sınırlamak, topraklama iletkenlerinin manevra istasyonu dışında tesis edilmesi, bağlantılarda yer kabloları döşenmesi.

Bu önlemler tesis tasarlanırken düşünülmelidir. Sonradan yapılması gereksiz ek masraflar oluşturabilir.

Radio paraziti seviyesi kolaylıkla istasyonda 300 m uzaklıkta 1 V/m'de 50 dB altına getirilebilir. İstasyon civarında çok düşük seviyede radyo haberleşme işaretleri alınıyorsa radyo parazitinin önlenmesi için katot reaktörleri ve söndürücülerin kullanımı, iletkenler ve toprak arasında R-C devreleri, çıkış iletkenlerinde filtreler kullanılması veya çevirici bölgesinin perdelenmesi fayda sağlamaktadır.

3.2.6. Hat Kayıpları

Yüksek gerilim doğru akım iletim hattındaki hat kayıplarında etkili olan, iletken direnci kaybı ve korona kayıplarıdır. Deri etkisi (skin-effect) olayı olmadığından alternatif akıma göre akım yoğunluğu daha yüksek tutulur (Alüminyum iletkenler için akım yoğunluğu $0,75 \text{ A/mm}^2$ ile $0,90 \text{ A/mm}^2$ arasındadır).

Alternatif akım sisteminin doğru akım iletim sistemine enerji iletim yoğunluğu açısından oranı yaklaşık dördüttür. Bir örnek olarak, İzlanda-İngiltere denizaltı kablo hattı için kayıplar:

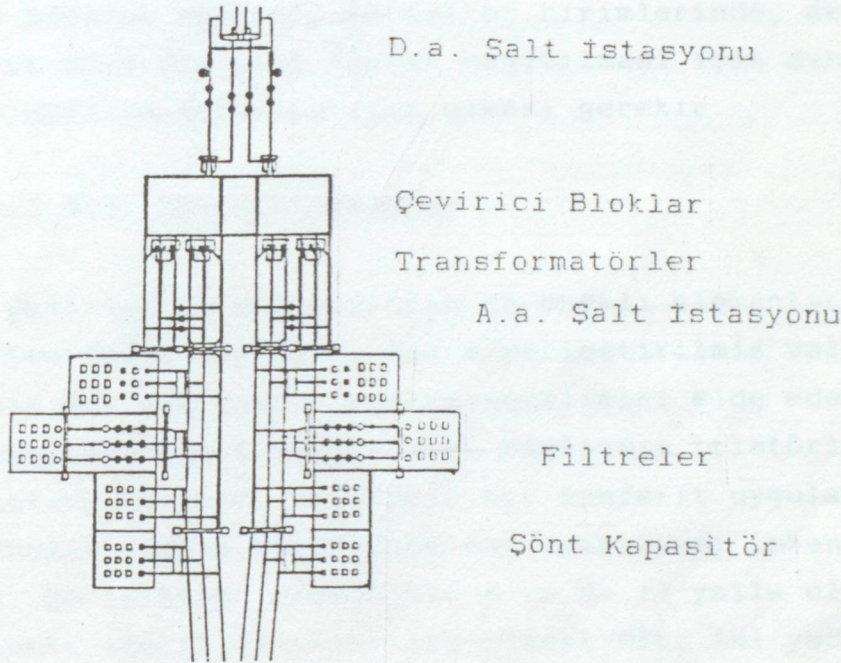
Kablo kayıpları	% 3,5-% 5,1
İstasyon başına doğrultucu/inverter istasyon kayıpları	% 0,6-% 0,7
Havai Hat iletim hat kayıpları	% 3-% 6
Böylece hattaki toplam kayıplar iletilen gücün % 7,7 ile % 12,5'u arasındadır.	

3.3. Çevirici İstasyonları

Bir çevirici istasyonundaki ana elemanlar ve bir istasyon tertibatı Şekil 6'da görülmektedir. Doğru akım barası bir yanda, alternatif akım barası bir yandadır. Doğru akım tarafında, düzleştirme reaktörü, parafudr, gerilim bölücüler, akım ölçü aletleri ve kesiciler

bulunur. Alternatif akım tarafında, filtreler, transformatörler ve kesiciler vardır.

Çevirici transformatörleri ve düzleştirme reaktörleri bina duvarına yakın olarak yerleştirilmiş olup soğutma sisteminin vantilatörleri tabanda bulunmaktadır.



Şekil 6. Bir Çevirici İstasyonundaki Ana Elemanlar ve Tertibi

Çevirici İstasyonunun başlıca elemanlarını inceleyelim

3.3.1. Şönt Kapasitörler

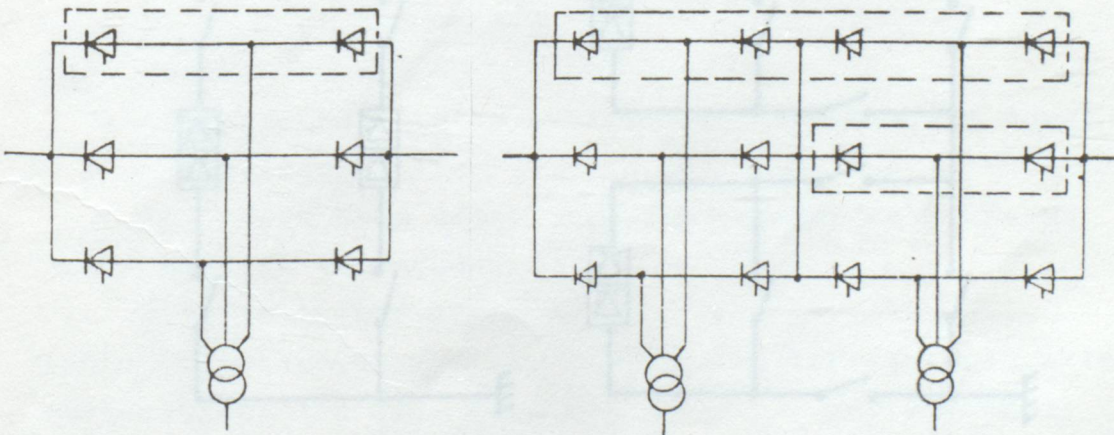
Çevirici İstasyonları, normal çalışmada aktif gücün % 50-% 60'ı kadar reaktif güce ihtiyaç duyarlar. Bu reaktif gücün karşılanması için genellikle en düşük maliyetli olan statik kondansatörler kullanılır ve şönt olarak bağlanır.

3.3.2. 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 kapasitör olup doğru akım hattıyla toprak arasına bağlanır. Kapasitör birimlerinde, gerilimin birimler arasında eşit olarak dağıtılması için dahili yada harici gerilim bölücülerinin olması gerekir.

3.3.3. Çevirici Valfler

Çevirici istasyonlarının en önemli elemanları uç fazlı tam dalga köprüleri içine yerleştirilmiş valflerdir. Ekonomik bir doğru akım iletim gerilimini elde edebilmek için valflerde, çok sayıda seri bağlanmış tristörler kullanılır. Böylece, valflerin her münferit uygulama için en ekonomik iletim gerilimine bağlanabilmesi imkanı elde edilir. Çeviriciler genellikle 6 ya da 12 yollu olarak düzenlenir (Şekil 7). Fiziksel olarak bir, iki yada dört valf bir tek yapıda birleştirilebilir.



a) 6 yollu çevirici

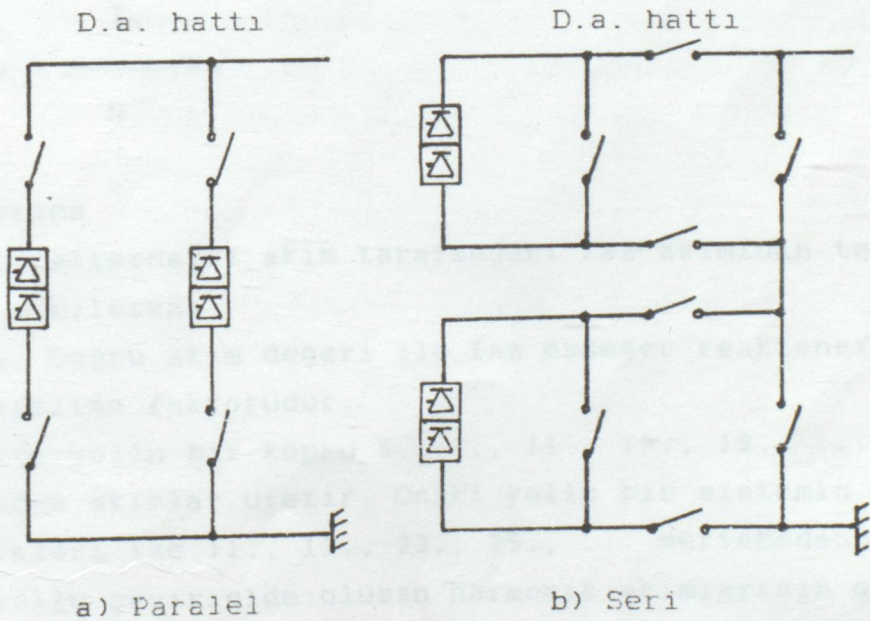
b) 12 yollu çevirici

Şekil 7. Çevirici

Bir 12 yollu çevirici iki adet 6 yollu çeviricinin seri bağlanmasından meydana gelmiştir. Köprülerin herbiri bir 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 çevirici 12 yollu çeviriciye dönüştürülür.

Terminal çift kutuplu bir hattı beslediğinde (Şekil 1.b) her kutup diğerinden bağımsız olarak çalıştırılabilecek 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 çeviricinin seri veya paralel bağlanmasıyla (ve bağımsız işletilmesinin sağlanmasıyla) kutbun, çekeceği güç arttırılabilir (Şekil 8).

(Örneğin: Pasifik hattında, 18 yollu iki sistem kullanılarak ± 400 kV.luk doğru gerilim hattı ile iletim yapılmıştır).



Şekil 8. Çeviricilerin Bağlanmaları

3.3.4. Alternatif Akım Filtreleri

A.a. şebekede çeşitli mertebede ortaya çıkan harmonik akımları, kullanılan çeşitli büyüklüklerde şönt filtreler tarafından kısa devre edilmeleriyle önlenabilir. Bölgesel rezonans dolayısıyla, konverter istasyonlarından çok daha uzak mesafelerde bir takım harmonikler meydana gelir ki, bunlar önceden bilinemez, sadece ortaya çıktıkları alanlarda kuvvetlenirler.

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.

n yollu bir çeviricinin alternatif akım tarafında meydana getirdiği akım harmoniklerinin mertebesi

$$N=k.n\pm1 \quad k=1,2,3, \dots$$

N. harmoniğin etkin değeri

$$I_N = \frac{I_1}{N} \cdot k_N$$

dir. Burada

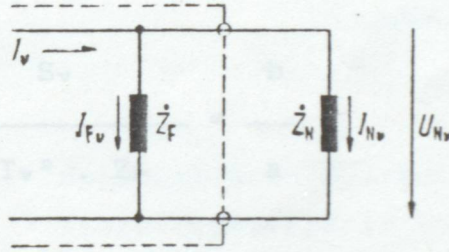
I_1 : Alternatif akım tarafındaki faz akımının temel bileşeni

k_N : Doğru akım değeri ile faz eşdeğer reaktansına bağlı azaltma faktörüdür.

Altı yollu bir köprü 5., 7., 11., 13., 19., ... mertebeden akımlar üretir. Oniki yollu bir sistemin akım harmonikleri ise 11., 13., 23., 25., ... mertebededir. Oniki yollu çeviricide oluşan harmonik akımlarının genliği ve sayısı altı yollu çeviricinininkinden daha azdır. Özellikle doğru akım tarafındaki gerilimin altıncı bileşeni

ve alternatif akım tarafındaki akımın beşinci ile yedinci bileşenlerinin olmaması istasyonlarda filtre ebadının küçülmesine ve maliyetlerinin düşmesine neden olur.

Konverterler doğru akım tarafında da gerilim, harmoniklerine sebep olmaktadır. İstenmeyen akımların oluşmasını önlemek için bir seri terkip bağlanır. Şayet gerekirse etkisi hat tarafında bir şönt filtre ile arttırılabilir. Şekil 9, filtre akımı I_{FV} ile şebeke akımı I_{NV} arasında paylaşılmış I_V konverter akımını ve şebeke, filtre ve konverterce ortak üretilmiş U_{NV} gerilimini göstermektedir.



Şekil 9. Şebeke empedansı Z_N ve filtre empedansı Z_F

belirli hat U arasındaki bir konverterden akan I_V harmonik akımının dağılımı

$$I_{NV} = \frac{Z_F}{Z_N + Z_F} I_V$$

$$I_{FV} = \frac{Z_N}{Z_N + Z_F} I_V$$

Filtredeki harmonik akımı için

$$\frac{I_{FV}}{I_v} = \frac{Z_N}{|\dot{Z}_N + \dot{Z}_F|} = b$$

Şebeke ve filtredeki harmonik gerilimi için

$$\frac{U_{NV}}{I_v \cdot Z_F} = b$$

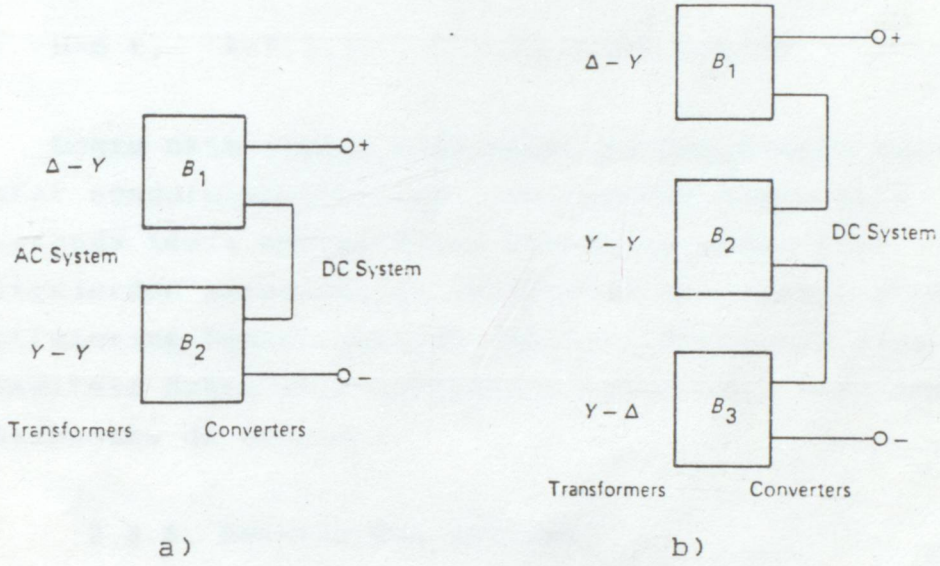
Şebekedeki harmonik görünen gücü S_v için

$$\frac{S_v}{I_v^2 \cdot Z_F} = \frac{b}{a}$$

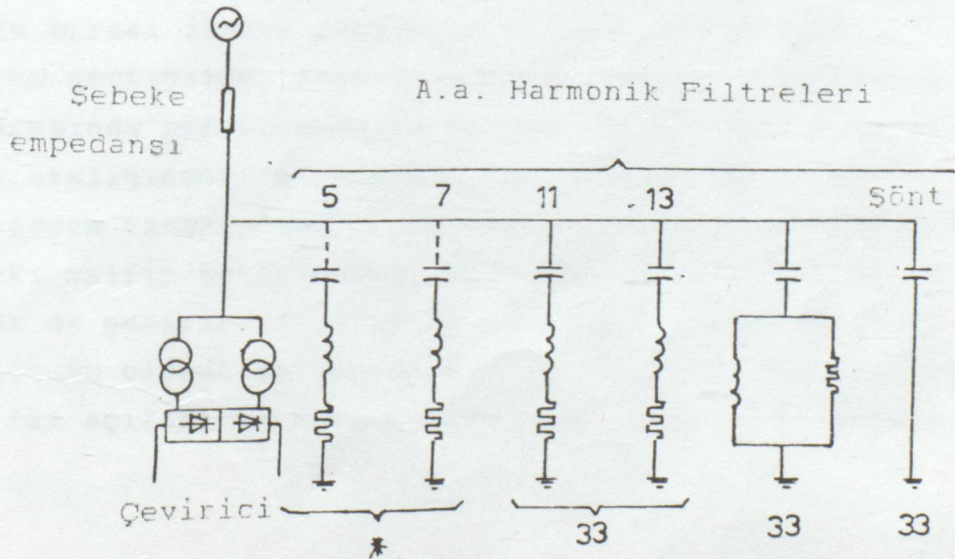
Bağıntılar özel durumlar için araştırılmaktadır, fakat bugün istasyon maliyetlerinin temel unsurunu temsil eden filtrelerin ekonomik olarak düzenlenmesinin yapılması ve belirli hat uzunluğu kombinasyonlarından kaçınmayı mümkün kılacak temel bilgi eksikliği vardır.

Ana frekansın 5, 7, 11 ve 13'ün katlarındaki frekanslarda bulunan akım bileşenleri için ayrı ayrı özel filtreler kurulur. Daha yüksek dereceli bileşenler için sürümlü filtreler kullanılır. 12 yollu bir çeviricide, 6 yollu çeviricilerden biri yıldız-yıldız bağlı transformatöre, diğeri ise yıldız-üçgen bağlı transformatöre bağlanmak suretiyle alternatif akım tarafında 5., 7., 17., 19.,... harmonikler devreden çekilerek etkileri ortadan kaldırılır (Şekil 10). 11. ve 13. harmoniklerin her biri için ayarlanmış filtreler gerekir. 6 yollu çeviricide 5. ve 7. harmonikler

için, ayarlanmış filtreler gerekir. Şekil 11'de bir alternatif akım sisteminde filtrelerin normal olarak düzenlenmesi görülmektedir.



Şekil 10. Harmoniklerin Önlenmesinde Transformatörlerin Bağlantı Şekli
a) 12 Yollu Çevirici İçin
b) 18 Yollu Çevirici İçin



Şekil 11. Alternatif akım harmonikleri için filtre düzenlemesi

3.3.5. Doğru Akım Filtreleri

n yollu bir çeviricinin doğru akım tarafında meydana getirdiği akım harmoniklerinin mertebesi

$$N=n.k, \quad k=1,2,3,\dots \quad \text{ile ifade edilir.}$$

Doğru akım iletim hattındaki harmoniklerin kuvvetli olarak söndürülebilmesinde, çeviricinin doğru akım tarafında tesis edilen düşük empedansa sahip şönt filtrelerden yararlanılır. Filtreler alternatif akım filtrelerine benzer şekilde yapılır. Gerekli filtre kapasitesi doğru akım iletiminin kablo veya hava hattı ile yapılmasına da bağlıdır.

3.3.6. Reaktif Güç İhtiyacı

Çeviricilerde çalışma esnasında gecikme açısı (α) ve sönüm açısı (δ)'ya bağlı olarak faz gerilimi ile çevirici arasında faz farkı meydana gelir. Her α değerinde yalnızca iki valf iletimde kalmakta ve her biri periyodun $1/3$ 'ünde iletimde kalırken diğer zamanda kesimde tutulmaktadır. Valfin birisi iletim periyodunu bitirip bir diğeri iletime geçtiğinde, transformatorün sekonder tarafında iki faz arasında bir kısa devre meydana gelir. Çok kısa bir zaman aralığındaki bu olaya komütasyon ve bu zamana komütasyon zamanı denir. Komütasyon (açısı) nedeniyle bir sonraki valfin tetiklenmesi geciktirilirken akan akımın kesimi de gecikir. Akımlar ve gerilimler arasında doğrultucu olarak çalışmada θ_r , evirici olarak çalışmada θ_i gibi faz açıları meydana gelir. Şekil 12a'da 6 yollu köprü

Ünitesi, 12b'de $\alpha=20^\circ$ için dalga şekilleri, 12c ve 12d'de komutasyon anındaki söz konusu açılar gösterilmektedir. Bu açıların meydana getirdiği güç faktörleri yaklaşık olarak:

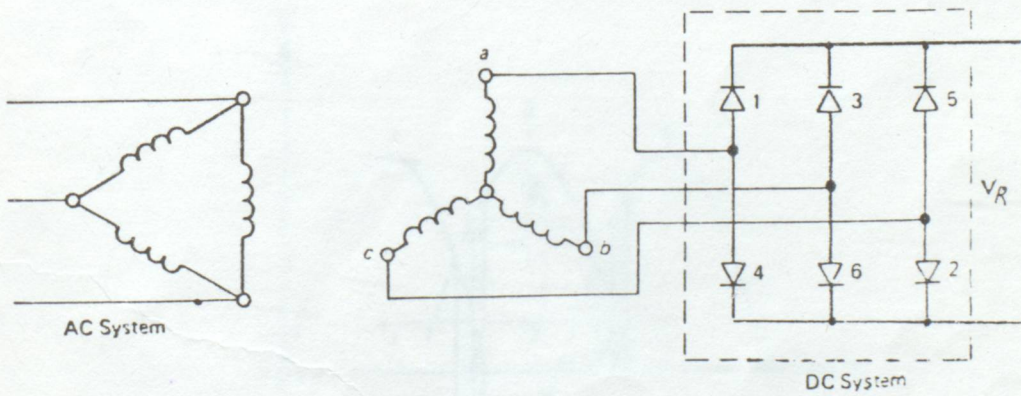
Doğrultucu için

$$\cos \theta_r = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)] \quad \text{geri}$$

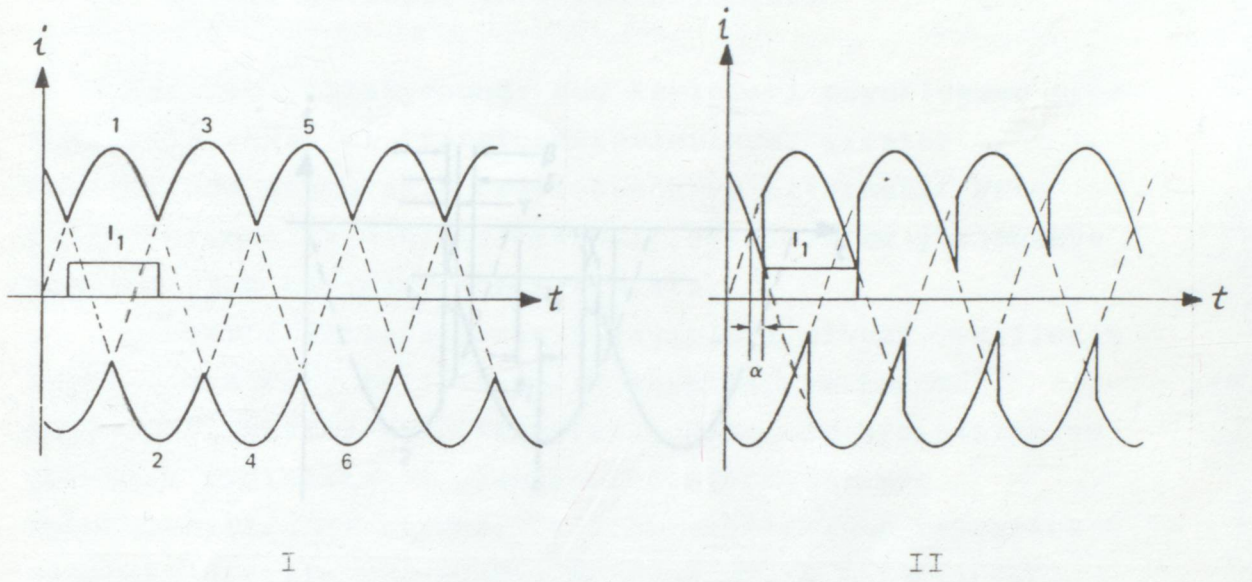
Evirici için

$$\cos \theta_i = \frac{1}{2} [\cos \beta + \cos \delta] \quad \text{ileri}$$

ifadeleri ile hesaplanabilir. Burada $\beta = \delta + \gamma$ dır.



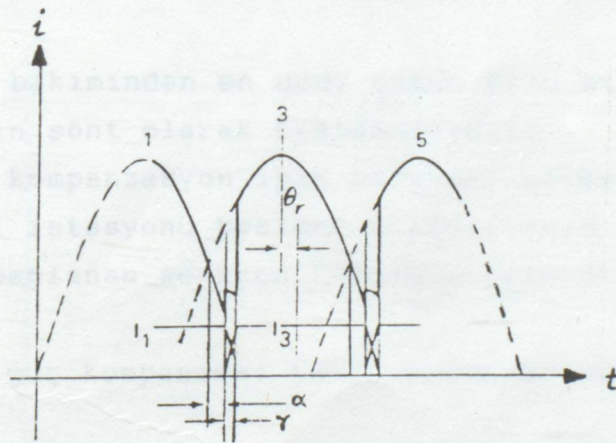
Sekil 12a. 6 Yollu Çevirici Ünitesi



I. $\alpha = 0^\circ$ için dalga şekli

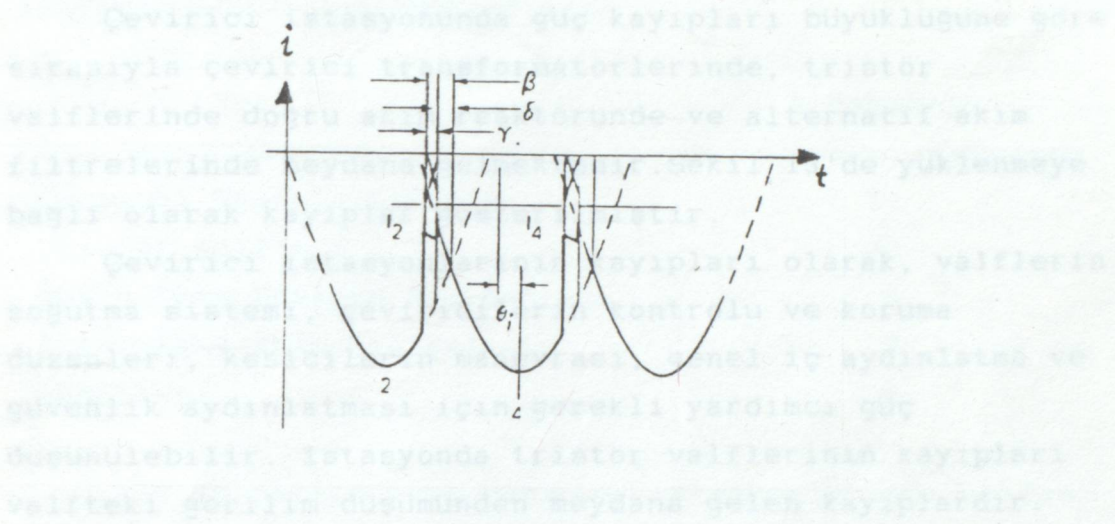
II. $\alpha = 20^\circ$ için dalga şekli

Sekil 12b. Üç Fazlı Köprü Doğrultucunun Dalga Şekilleri



Sekil 12c. Doğrultucu İçin Komütasyon Anı.

3.3.7. Çevirici İstasyon Kayıpları



Sekil 12d. Evirici İçin Komütasyon Anı.

Normal çalışmada bir YGDA çevirici istasyonunun reaktif güç ihtiyacı genellikle iletilen aktif gücün % 50 - % 60'ı kadardır.

Reaktif güç gereksinimi statik kapasitörler, senkron kompanzatörler veya duruma göre ikisinin bileşiminden temin edilebilir.

Maliyet bakımından en ucuz çözüm yolu statik kapasitörlerin şont olarak bağlanmasıdır.

Senkron kompanzasyon için bölgesel alternatörlerden veya çevirici istasyonu besleme trafolarının üçüncü sargılarına bağlanan senkron kompanzatörlerden yararlanılır.

Reaktif güç kompanzesi tasarımında şu hususlara dikkat edilmelidir:

- Alternatif akım bara geriliminin regülasyonu
- Alternatif akım bara geriliminin bozulması
- Yüksek gerilim doğru akım kontrol sisteminin kararlılığı ve hızı
- Ani yük azalmalarında gerilim artışı.

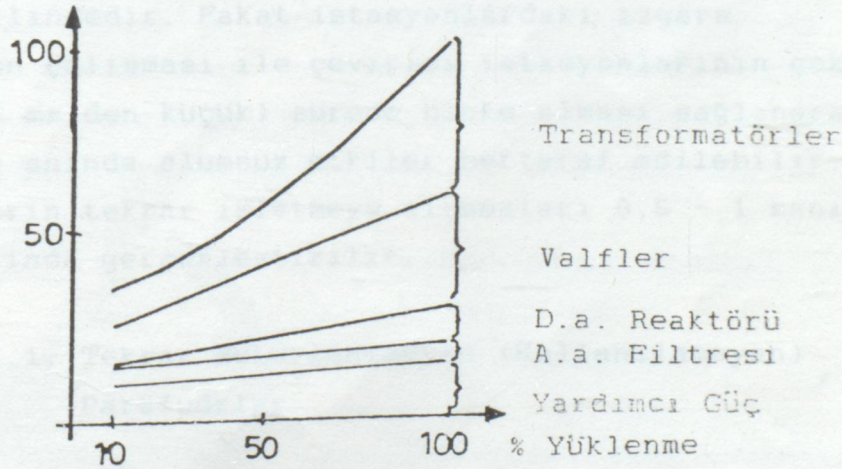
3.3.7. Çevirici İstasyon Kayıpları

Çevirici istasyonunda güç kayıpları büyüklüğüne göre sırasıyla çevirici transformatörlerinde, tristör valflerinde doğru akım reaktöründe ve alternatif akım filtrelerinde meydana gelmektedir. Şekil 13'de yüklenmeye bağlı olarak kayıplar gösterilmiştir.

Çevirici istasyonlarının kayıpları olarak, valflerin soğutma sistemi, çeviricilerin kontrolü ve koruma düzenleri, kesicilerin manevrası, genel iç aydınlatma ve güvenlik aydınlatması için gerekli yardımcı güç düşünülebilir. İstasyonda tristör valflerinin kayıpları valfteki gerilim düşümünden meydana gelen kayıplardır.

Çevirici istasyonlarındaki kayıplar, genellikle iletilen gücün % 1 - % 1,5'u arasındadır. Şekil 13'de de görüldüğü gibi bu güçlerin yaklaşık % 50'si çevirici transformatörlerinde meydana gelmektedir.

Kayıplar [MW]



Sekil 13. Çevirici İstasyonunda Yüklenmeye Bağlı Olarak Kayıpların Dağılımı

İzlanda-İngiltere denizaltı yüksek gerilim doğru akım enerji iletiminde ± 400 kV.luk çevirici istasyonundaki kayıplar şöyle dağılmaktadır:

Yer	% Kayıplar
Çevirici Transformatörleri	51
Tristör Valfleri	32
Doğru Akım Düzleme Reaktörleri	6
Alternatif Akım Filtreleri	7
Diğerleri	4

iletim hattında ve çevirici istasyonlarında meydana gelen toplam iletim kayıpları ancak 250 km.nin üzerindeki mesafeler için alternatif akımdakinden daha az olmaktadır.

3.4. Parafudrlar

Doğru akım tarafında, aşırı gerilimden koruma için basit parafudrlar kullanılır. Bu parafudrlar tabiidir ki, polariteden bağımsız olarak çalışmaları gerekir. Bir parafudrun çalışması, daima sonuçta bir kısa devreye yol açması şeklindedir. Fakat istasyonlardaki ızgara kontrolunun çalışması ile çevirici istasyonlarının çok kısa (örneğin 5 ms.den küçük) sürede bloke olması sağlanarak bu kısa devre anında olumsuz etkiler bertaraf edilebilir. Çeviricilerin tekrar işletmeye alınmaları 0,5 - 1 saniye zaman zarfında gerçekleştirilir.

3.4.1. Tekrar Mühürlenemeyen (Kullanılamayan) Parafudrlar

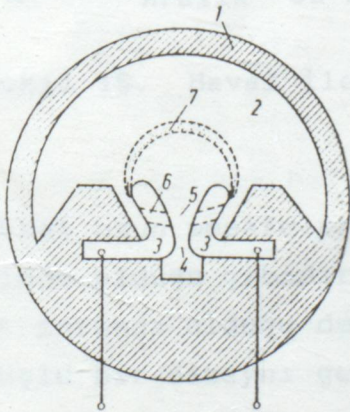
Bu parafudrlarda, takip akımı denilen kısa devre akımı, parafudrun gerilim bağımlı direnci ile sınırlandırılır. Fakat, takip akımının alternatif akım moduna zıt olarak tabii sıfır geçişine sahip olmamasından,

söndürülmesi çevirici istasyonlarda ızgara kontrolü vasıtasıyla yapılmalıdır. Bu işlem, içinden tutucu akımı akan bir non-lineer direnç uçlarındaki gerilim ile başlatılabilmektedir. Bir parafudr tarafından tutulabilen enerji doğal olarak sınırlandırılmıştır. Bahsettiğimiz bu tür basit parafudrlar bazı durumlarda hala uygulama alanı bulabilmektedirler.

3.4.2. Tekrar Mühürlenebilen (Kullanılabilen) Parafudrlar

Parafudr dizaynında aktif (magnetik üflemlili) ark boşluklarının kullanılması, parafudr geriliminin artmasına sebep olur. Kendi kendine tekrar mühürlenebilen bir parafudrun ark boşluğunun yapısı Şekil 14'te gösterilmiştir. Şekilde ark (7), elektrodlar arasındaki noktada (4) tutuşturulmuş ve ark odasına (2), magnetik üfleleyici ile sürdürülmüştür.

Ark, adım noktalarına yaklaşık olarak vardığı zaman sıcak ve iyonize olmuş gaz, elektrodlar (3) ve levha tabanı (1) arasındaki kanal (6) yolu üzerinden elektrod sahasına varacaktır. Böylece 5 noktasında yeni bir ark olacak ve eskisi söndürülecektir. Arkın tam boy ve tam gerilime erişmesiyle tekrarlanan yeniden tutuşma önlenir. Azalan parafudr akımı belli bir değerin altına düştüğünde yeniden tutuşmalar sona erecek ve ark boşluğa üflenecektir.



1. İzolasyon maddesi
2. Ark odası
3. Elektrodlar
4. Ark noktası
5. Tekrar çakma noktası
6. Kanal
7. Ark

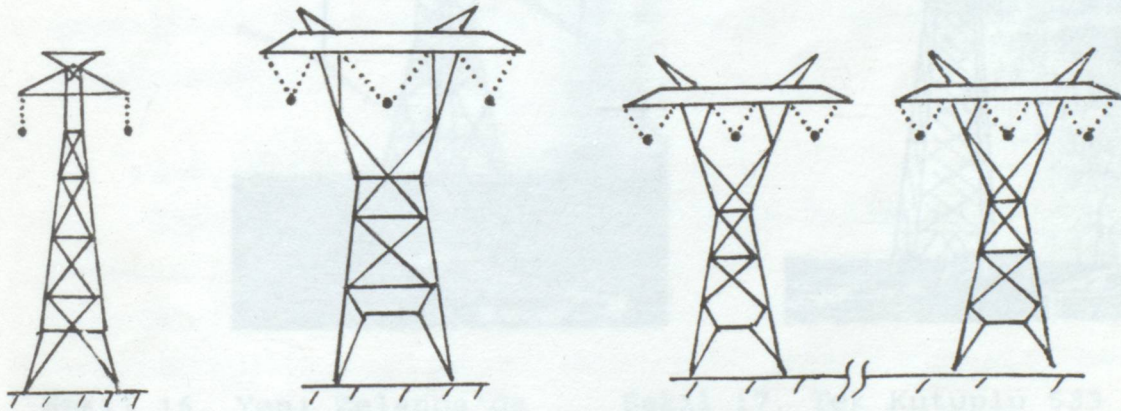
Şekil 14. Doğru Akım Parafudrunun Ark Boşluğu

3.5. Direkler ve Toprak Hattı

3.5.1. Direkler

Direkler, (yüksek gerilim doğru akım iletim hatlarında) daha az iletken kullanılması sebebiyle alternatif akım hatlarını taşıyan direklere nazaran daha hafif olup daha ince yapıdadırlar. Bir kıyaslama açısından ortalama 2000 MW iletim kapasitesine sahip üç iletim tipi Şekil 15'te görülmektedir.

Korozyon sebebiyle, Avrupa'da doğru akım iletim hatlarında geri dönüş iletkeni olarak toprak kullanılmamaktadır. Çift kutuplu iletim modeli veya akım geri dönüşü için bir iletken çekilmektedir.



± 500 kV (D.a.) 765 kV. (A.a.)

Aralık 70 m.

Aralık 88 m.

2 x 500 kV. (A.a.)

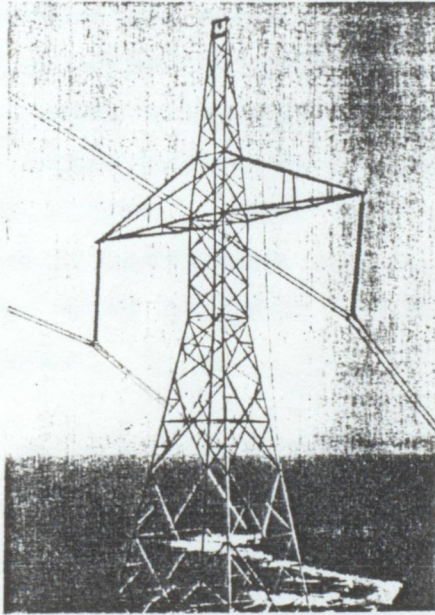
Aralık 100 m

Şekil 15. Havai iletim Hatlarındaki Bazı Yapılar

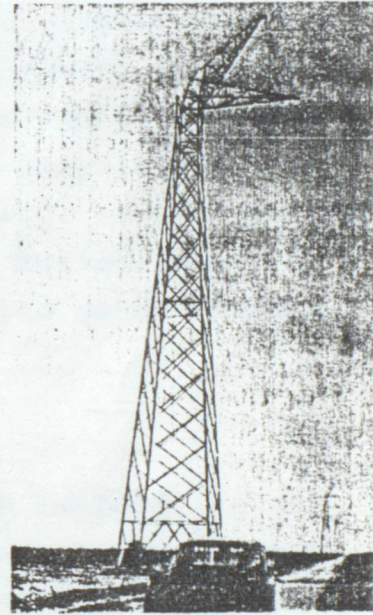
Fakat uzun mesafeler için model alternatif akım hatlarında olduğu gibidir. İletken kırılmalarının dikkate alınmak zorunda olduğu durumlarda az sayıda iletken olsa bile güçlü bir dizaynı gerektirebilir. Demet iletkenlerin kullanılması durumunda genellikle demetteki tek bir iletkenin kırılmasını göz önüne almak yeterlidir.

Şekil 16 Yeni Zelanda'da ± 250 kV.luk çift kutuplu iki hatlı direği göstermektedir.

Şekil 17 533 kV.luk tek kutuplu Cabora Bassa iletim hattı direğini göstermektedir. Yatay kol iletim hattını, bir açı ile yukarıya yönlendirilmiş kol ise, toprak hattını taşımaktadır. Tek kutuplu hat dizaynı ise alışılmış hat dizaynından oldukça farklılık göstermektedir.



Şekil 16. Yeni Zelanda'da ± 250 kV.luk çift kutuplu iki hatlı direk



Şekil 17. Tek Kutuplu 533 kV. luk Cabora Bassa iletim Hattı direği (üstteki kol toprak hattı içindir)

3.5.2. Toprak Hattı

Bir doğru akım hattındaki yıldırım çarpma ihtimali bir alternatif akım hattından daha az olmamakla beraber, topraklama hattına olan ihtiyaç bir doğru akım hattı için daha azdır.

Bunun nedeni , arıza akımını sınırlamak ve bu

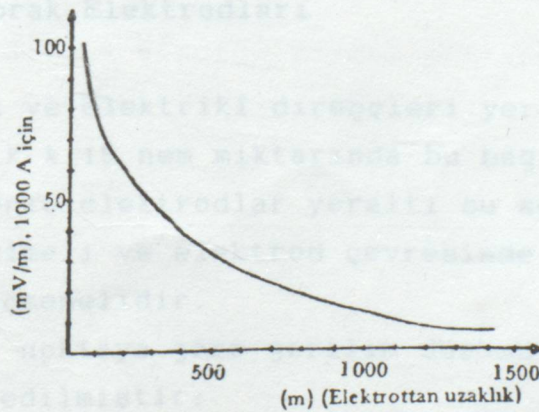
suretle izolatörlerin hasara uğraması riskini azaltmak için, doğru akım istasyonlarında zaten koruma sistemlerinin mevcut olmasıdır.

Çift kutuplu hatlarda, bir hat arızası durumunda sadece iletilen gücün yarışı arızadan etkilenir ve akan akım mekanik aletlere gerek kalmadan ızgara kontrolü ile kontrol edilir. Doğru akım toprak hatlarının bir takım ek avantajları vardır. Bunlardan biri, topraktaki harmonik akımlarını bir ölçüye kadar hafifleterek telefon parazitlerinin azalmasına neden olması, diğeri de, (toprak hattı ile direklerin birbirlerine bağlanması sonucu) ölçmelerin daha kolay yapılabilmesi ve toprak arızası durumunda istasyonlardaki işlemlerin kolaylaşmasıdır.

Sonuç olarak, doğru akım ile enerji iletiminde uzun enerji iletim hatlarında toprak hattı kullanılması gerekirken, kısa hatlarda toprak hattına gerek olmadığı görülmektedir.

3.6. Toprak (Yer) Dönüşü

Toprak dönüşü, tek kutuplu iletim hatları ile çok kutuplu iletim hatlarında sürekli olarak, çift kutuplu iletim hatlarında ise hatlardan birinde bir arıza olması halinde kullanılmaktadır. Böylece hem tesis masrafı, hem de kayıplar azaltılmaktadır. Şekil 18'de toprak dönüş yolundaki gerilimin değişimi verilmiştir.



Şekil 18. Toprak Dönüş Yolunda Gerilim Dağılımı.

Uzaktaki bir noktaya göre gerilim düşümü (U) Rusck'a göre şöyle ifade edilmiştir:

Uzaktaki bir noktaya göre gerilim düşümü (U) Rusck'a göre şöyle ifade edilmiştir:

Burada,

ρ : Toprak direnci [Ωm]

L: Toplam iletken uzunluğu [m]

a: $\sqrt{2.d.r}$

d: iletken derinliği [m]

r: Dipteki kömürün eşdeğer yarıçapı [m]

dir. Doğru akım ile enerji iletim sistemlerinde

Korozyonu önlemek için, elektrodlar çevirici istasyonundan 3-5 km uzağa yerleştirilmelidir. Bunun için yağ kablo veya havai hat kullanılabilir. Toprak geçiş kapasitesi veya büyük dalgalar için istasyonda parafüdr kullanılmalıdır.

Her iki hatta da doğru akım kaçak yoğunluğu normalde 0,1 ile 1 A/cm² arasında kalmalıdır.

3.7. Doğru Akım Kablo Sistemleri

Kabloların birim uzunluklarına karşılık gelen kapasite değerlerinin büyük oluşu ve termik sınırlamalar nedeniyle yükün, doğal yükten çok daha küçük olması, alternatif akım kablolarındaki kapasitif akımların bu kablolarla yapılabilecek iletim mesafesini düşürür. Fakat doğru akımda sürekli olarak kapasitif yüklenme akımları söz konusu olmadığından, pratik olarak doğru akım kabloları ile iletim mesafesi sınırsızdır.

Yine kapasitif yüklenme akımlarının olmayışı kablo tasarımlarını da basitleştirmektedir. Denizaltından enerji iletimi söz konusu olduğu zaman doğru akım ile enerji iletiminin ekonomikliğı daha da belirginleşmektedir.

Kablonun maliyetinde önemli bir yer tutan kalın dielektrik gömlek doğru akım kablolarında daha incedir. Bu nedenle denizaltında enerji iletiminde 50-100 km.den daha uzun mesafeler için yüksek gerilim doğru akım iletim sistemleri üstünlük göstermektedir.

50-100 km.den daha uzun alternatif akım kabloları kapasitif yüklenme akımları nedeniyle alıcı uçları açık devre bile olsa, gönderici uçtan kısa-devre olarak görünmektedirler. Bu akımlar hat uçlarına konacak reaktörlerle bir ölçüde kompanze edilebilirler. Fakat, hem yatırım maliyetlerinin artmasına ve hem de değişken yüklenme durumunda işletme sorunlarının ortaya çıkmasına neden olurlar. Doğru akım ile enerji iletim sistemlerinde kablolu iletimde genellikle uç tip kablo kullanılmaktadır:

1. Katı Tip Kablolar : Yalıtımı yüksek viskoziteli yağ ile emdirilmiş kağıt şeritlerinden oluşan bu kablolar yaklaşık 350 kV'a kadar kullanılabilir. Kullanım yerine göre, çoğu durumlarda en ekonomik kablo tipi bu olmaktadır.

2. Yağlı Tip Kablolar : Tamamen düşük viskozite yağ ile doldurulmuş olup, daima yağ basıncı altında çalışan kablolardır. Yağ basıncı, her iki uçtaki yağ deposundan sağlanmakta olup uzunluğun artmasıyla artar. Uzun denizaltı kabloları çok yüksek yağ basıncında çalışmaktadır. Bu kablo tipi için maksimum uzunluk 60 km ve gerilim 300 kV civarındadır.

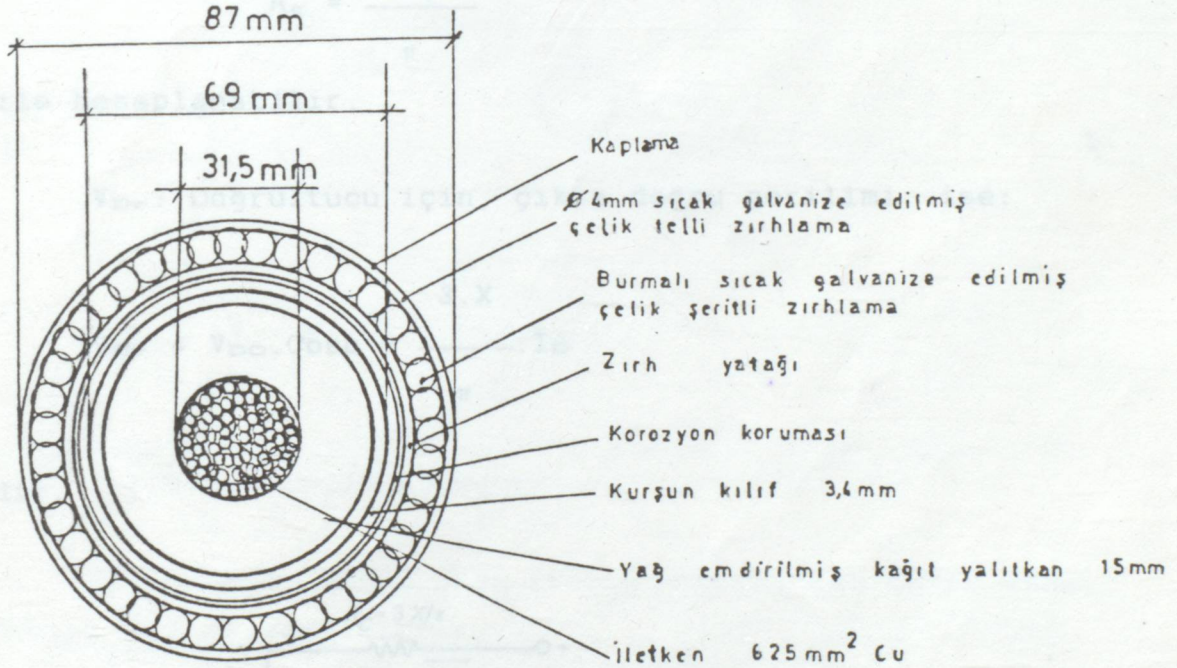
3. Gaz Basıncılı Tip Kablolar : Bu kablolarda yalıtım, önceden petrol peltesi emdirilmiş kağıt şeritlerle sağlanır iletkenin merkezi bir gaz borudur ve gaz basınçlı ortamda kullanılır (yağ emdirilmiş kablolardaki gibi aynı şekilde). Teorik olarak çok büyük uzunluklarda bir küçük gaz borusu içinden beslenebilmektedir.

Doğru akım kablolarında kağıt kullanılması için dielektrik kayıplarının olmaması gerekir. Kağıt yalıtkan kullanmanın en önemli sebebi, yoğunluğunun yüksek olmasıdır. 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 olacaktır.

İyi bir korozyon koruması için, belli bir noktada kılıfı toprağa bağlamak gerekir (Örneğin, yeraltı kablolarının eklerindeki gibi).

Polietilen kılıflara sahip olan doğru akım kablolarında böyle bağlamalar yaklaşık her üç kilometrede bir yapılır. Bu durum, metal kılıf ile zırhlı kaplama arasındaki 5-10 kV'luk aşırı gerilimi azaltmaktadır. Şekil 21'de 250 kV'luk Konti-Skan doğru akım iletim hattında kullanılan denizaltı kablosunun kesiti görülmektedir.



Şekil 21. 250 kV'luk Denizaltı Kablosunun Kesiti.

3.8. Devre Eşdeğerleri

3.8.1. Doğrultucu Eşdeğeri

Bir çeviricinin doğrultucu olarak çalışması, basit olarak Şekil 22'deki gibi modellenenilmektedir.

Burada,

V_{D0} : Tetikleme açısı (α) sıfır derece iken, köprü doğrultucunun hat gerilimi

I_D : Doğrultucu çıkışındaki doğru akım değeri

R_c : Komütasyon sebebiyle oluşan gerilim düşümünü

modelde temsil eden direnç olup transformatörün

kaçak reaktansı (X)'e bağlıdır ve değeri:

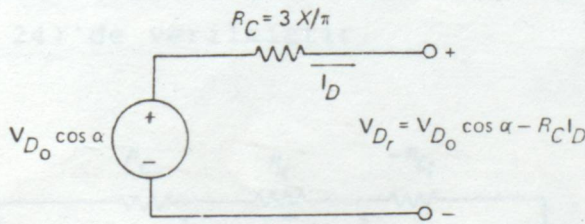
$$R_c = \frac{3.X}{\pi}$$

ile hesaplanabilir.

V_{Dr} : Doğrultucu için, çıkış doğru gerilimi ise:

$$V_{Dr} = V_{D0} \cdot \cos \alpha - \frac{3.X}{\pi} \cdot I_D$$

dir.



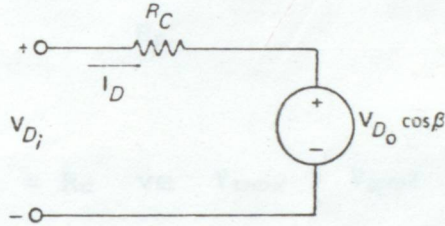
Sekil 22. Doğrultucu Eşdeğeri.

3.8.2. Evirici Eşdeğeri

Bir çeviricinin $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ aralığında çalışması hali evirici olarak çalışmaya karşılık gelir. Evirici uçlarındaki gerilim

$$V_{Di} = V_{Do} \cdot \cos \delta - R_c \cdot I_D = V_{Do} \cdot \cos \beta + R_c \cdot I_D$$

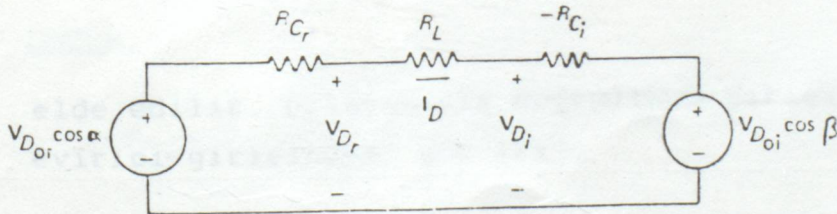
ile ifade edilir. Eviriciye ait basit model Şekil 23'de gösterilmiştir.



Şekil 23. Evirici Eşdeğeri

3.8.3. Komple Eşdeğeri

Tek kutuplu doğru akım iletim hattına ait devre modeli (Şekil 24)'de verilmiştir.



Şekil 24. Komple Eşdeğeri

Genellikle doğrultucular, (pratikte $\alpha=10^\circ-20^\circ$ arasında) sabit tetikleme açısı ile, eviriciler ise sabit sönüm açısı (δ) ile çalışmaktadır.

$$\begin{aligned} V_{Dr} &= V_{Dor} \cdot \cos \alpha - I_D \cdot R_{cr} \\ V_{Di} &= V_{Doi} \cdot \cos \delta - I_D \cdot R_{ci} \quad \text{alınarak} \end{aligned}$$

R_L , hat direnci olmak üzere sistemdeki doğru akım için

$$I_D = \frac{V_{Dr} - V_{Di}}{R_L} \quad \text{yazılabilir.}$$

$$R_{cr} = R_{ci} = R_c \quad \text{ve} \quad V_{Dor} = V_{Doi} = V_{Do} \quad \text{için}$$

$$I_D = \frac{V_{Do}}{R_L} \cdot (\cos \alpha - \cos \delta)$$

elde edilir. Eviriciler sabit β açısında çalıştıklarında

$$I_D = \frac{V_{Dor} \cdot \cos \alpha - V_{Doi} \cdot \cos \beta}{R_{cr} + R_L + R_{ci}} = \frac{V_{Do}}{R_L + 2 \cdot R_c} \cdot (\cos \alpha - \cos \beta)$$

elde edilir. Dolayısıyla doğrultucu çıkışındaki güç (P_r) ve evirici girişindeki güç (P_i),

$$P_r = V_{Dr} \cdot I_D$$

$$P_i = V_{Di} \cdot I_D$$

olarak yazılabilir.

3.8.4. Örnek :

Bir alternatif akımın üretim merkezi ile tüketim merkezi arasına 800 km.lik bir doğru akım iletim hattı planlanmaktadır. Tek kutuplu çift iletkenli iletim hava hattının karakteristik değerleri şunlardır:

İletkenler:

St/Al, doğru akım direnci 0,01 Ω /km

Transformatörler:

3 faz, 60 Hz, 13,8/110 kV Y/Y, 200 MVA, X=% 5,

Çeviriciler:

3 faz, 6 yollu köprü, 250 kV'luk gerilim elde edebilmek için 2 eleman seri bağlanmıştır.

- Doğrultucular sabit $\alpha=10^\circ$ açısıyla ve eviriciler sabit $\beta=20^\circ$ açısıyla çalıştıklarına göre sistemdeki doğru akım değeri (I_D)'yi hesaplayınız.
- Eviricilerin sabit $\delta=15^\circ$ açısıyla çalışmaları halinde I_D akımını hesaplayınız.
- Eviriciler sabit $\delta=15^\circ$ açısıyla çalışırken evirici tarafa verilecek gücü bulunuz.
- Eviriciler sabit $\delta=15^\circ$ açısıyla çalışırken eviriciler için gerekli reaktif gücü hesaplayınız.

ÇÖZÜM:

$$R_L = 2.800.0,01 = 16 \Omega$$

$$0,05.110^2$$

$$X = \frac{0,05.110^2}{200} = 3,03 \Omega/\text{faz}$$

$$R_c = \frac{3.X}{\pi} = 2,89 \, \Omega$$

$$V_{DO} = 1,35.V_L = 1,35.110 = 148,50 \text{ kV/Ünite}$$

$$V_{DO} = 2.148,5 = 297 \text{ kV}$$

$$a) I_D = \frac{V_{DO}}{R_L + 4.R_c} \cdot (\cos\alpha - \cos\beta) = \frac{297 \cdot (\cos 10^\circ - \cos 20^\circ)}{4 \cdot 2,89 + 16} = 0,49 \text{ kA}$$

$$b) I_D = \frac{V_{DO}}{R_L} \cdot (\cos\alpha - \cos\delta) = \frac{297 \cdot (\cos 10^\circ - \cos 15^\circ)}{16} = 0,35 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} c) P_i &= V_{Di} \cdot I_D = V_{DO} \cdot I_D \cdot \cos\theta_i \\ &= I_D \cdot V_{DO} \cdot (1/2) \cdot (\cos\beta + \cos\delta) \\ &= I_D \cdot (V_{DO} \cdot \cos\delta - R_c \cdot I_D) \\ &= 0,35 \cdot (297 \cdot \cos 15^\circ - 2,89 \cdot 0,35) = 100,05 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$d) \cos\theta_i = \frac{P_i}{I_D \cdot V_{DO}} = \frac{100,05}{0,35 \cdot 297} = 0,96$$

$$\theta_i = \arccos(0,96) = 16,2^\circ$$

$$Q_i = V_{DO} \cdot I_D \cdot \sin\theta_i = 297 \cdot 0,35 \cdot \sin 16,2^\circ$$

$$Q_i = 29,1 \text{ MVar}$$

3.9. Asenkron Bağ

Birbirinden bağımsız iki farklı frekanstaki (50 Hz ve 60 Hz gibi) alternatif akım sistemi, birbirine doğru akım

iletim sistemi ile bağlanarak sürekli güç akışı iki taraflı olarak kontrol edilebilmektedir.

Böyle bir uygulama kritik uzaklığa bakılmaksızın doğrultucu ve evirici için yapılacak yatırım maliyeti, enerji kaynaklarının verimli kullanımı dikkate alındığında çok düşmektedir.

Bu sisteme örnek olarak Brezilya ile Paraguayı bir arasındaki Itaipu sistemi verilebilir.

3.10. Güç Akış Yönünün Değiştirilmesi

Eğer gerekiyorsa enerji iletim hattında güç akış yönü değiştirilebilir. Bu durumda eviriciler, doğrultucu olarak, doğrultucular evirici olarak çalışır. Bu ise, gerilim polaritelerinin değişmesi demektir.

Doğru akım ile iletim sisteminde kontrol özellikleri şunlardır:

- 1) Sistemdeki dalgalanmaların bozucu etkisine rağmen eviricilerin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak,
- 2) iletim gücüne, akıma veya (iki alternatif akım sisteminin herbirinin) frekanslarına yeterli doğruluk ve hızda kumanda edebilmek,

- 3) Bu özellikleri minimum reaktif güç tüketimi ile yapmak.

Kontrol sisteminin normal çalışması için yukarıdaki özelliklerin yanı sıra, büyük bozucu etkenler olduğunda da normal çalışmayı sağlamalı veya en azından arıza anlaşıldığında etkileri en aza indirmelidir.

3.11. Doğru Akım İletim Sistemlerinin Kararlılık ve Kullanılabilirliği

3.11.1. Kararlılık

Sistem kararlılığı ile birlikte hatların taşıma kapasiteleri de artmaktadır. YGDA ile enerji iletimi bir sistemin kararlılığını artırmaktadır. Alternatif akım iletim sisteminde sistem kararlılığını arttırabilmek için alışılmış yöntem, yeni hatlar eklemek ve hatları mümkün olduğu kadar seri kompanze ederek baralar arasındaki açıl farkını azaltmaktır. Yeni hatların ilavesi ise yatırım maliyetlerini arttırmaktadır.

Yüksek gerilim doğru akım sistemi prensip olarak bir sistemin kararlılığını, sistemdeki güç salınımlarının genliklerini azaltarak sağlar. Sistem hızlı davranabilme özelliğine sahip olduğundan salınımları absorbe edebilme ve söndürme özelliği vardır. Böylece kararlılığı korumada en kötü durum olan ilk salınım periyodunda da kararlılık sağlanabilmektedir.

Çok terminalli sistemler kullanım bakımından daha esnektir. Dolayısıyla sistem kararlılığı üzerinde daha etkilidirler. Fakat kontrolleri daha karmaşıktır.

3.11.2. Kullanılabilirlik

Yüksek gerilim doğru akım ile enerjinin kullanılabilirliği, belirli bir süre içinde enerji iletim kapasitesidir. Toplam çalışma süresi içinde ne kadar az hizmet dışı kalmışsa, kullanılabilirliği yani işletme güvenilirliği o kadar iyidir.

Sistemin en çok bozulabilme riski tristör grupları, koruma ve kompanzasyon sistemlerindedir. Bunlar ise, hem koruyucu bakımın özelliğine ve sıklığına, hem de benimsenen yedek parça politikasına bağlı olarak azaltılabilir.

Arızalanma ihtimalleri çok düşük olmasına rağmen çevirici transformatörleri ve düzleme reaktörleri , yedek parça bulunmaması halinde en önemli problem kaynağını teşkil ederler.

Doğru akım ile iletim sistemlerinde yıllık hizmet yüzdesi yaklaşık olarak % 98 civarındadır. Hizmet dışı kalma süresi, genelde bakım için yapılan kesintilerden oluşmaktadır.

Bir iletim sisteminin işletme güvenilirliğini artırmak konusunda gözönünde tutulması gereken nokta, sistemin genellikle çift devre (bipolar) olarak çalıştırılmasıdır. İletkenlerden herhangi birisinin arıza nedeniyle devre dışı olması halinde, diğer iletken çalışmaya devam eder .Bugünkü doğru akım ile enerji iletim sistemleri, devrelerden biri arıza ile hizmet dışı kaldığı zaman, diğer devre tüm enerji iletim yükünü üzerine alabilecek şekilde planlanmaktadır. Tek devre ile aynı değerde enerji iletimi yapıldığında kayıplar yaklaşık olarak iki katına çıkmakta, fakat sistem kesintisiz olarak işletilebilmektedir.

Eş kutuplu (homopolar) enerji iletim sisteminin her zaman çift devre olarak hizmette olma yüzdesi % 99 sadece bir devresinin hizmette olma yüzdesi % 99,9 olarak verilmektedir.

Doğru akım iletim sisteminde, verimliliği etkileyen ana etken çevirici istasyonlarıdır. İletim hatlarına verimliliği daha az etkilemektedir. Teknolojik gelişmeyle doğru akım sistemlerinde çevirici istasyonlarında, civa buharlı valflerle yerine triyotrid valflerinin kullanılması ile bu verimlilik daha da artmaktadır. Yeni iletim teknolojilerinin gelişmesiyle de verimlilik daha da artacaktır.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Enerjinin tüketim bölgesine ulaşması için kullanılan doğru akım iletim sisteminde, hem doğru akım, hem de alternatif akım sistemi birlikte kullanılmakta yani, her iki sistem birbirini tamamlamaktadır. Ancak iki sistemin birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Uzun mesafelere güç iletimi için alternatif akım sisteminin kullanılması durumunda bazı sorunlar ortaya çıkmakta ve bunların giderilmesi için ilave düzenler gerekmektedir (kompanzasyon tesisleri v.s.). Dolayısıyla iletim maliyeti artmaktadır.

Alternatif akım iletim sisteminde maliyeti etkileyen en büyük etken iletim hattı olmakta ve mesafenin artmasıyla da maliyeti arttırmaktadır. Doğru akımın alternatif akıma göre ekonomik olmaya başladığı mesafe, 500 km civarındadır.

Denizaltı ve yeraltı kabloları ile enerji iletiminde doğru akım kullanımının alternatif akıma göre avantajlı olmaya başladığı mesafe ise, 50 km civarındadır.

Doğru akım iletim sisteminde, maliyeti etkileyen ana etken çevirici istasyonlarıdır. İletim hatları maliyeti daha az etkilemektedir. Teknolojik gelişmeyle doğru akım sistemindeki çevirici istasyonlarında, civa buharlı valflerin yerine tristörlü valflerin kullanımı ile bu maliyet daha da azalmıştır ve yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle de azalmaya devam edecektir.

Doğru akım ile iletimde, aynı uzaklık ve verim değeri için daha düşük gerilim kullanılabilmekte ve böylece aynı kesit değeri için daha fazla güç iletimi yapılabilir. Ayrıca hat kayıpları daha az ve yalıtım maliyeti de daha düşük olmaktadır.

Frekansları farklı iki sistem arasında asenkron bağ adı verilen bağlantının yapılabilmesi, doğru akım sistemi ile enerji iletimi açısından önemli bir avantaj olup, bazı şimdilik tek çözüm yoludur.

Doğru akım sistemi sistem kararlılığını arttırıcı rol oynamakta ve sistemdeki salınımları, hızlı cevap veren statik güç çeviricileri yardımıyla söndürebilmektedir.

Doğru akım ile enerji iletiminin geleceğinin,

- Çevirici istasyonları maliyetlerinin, alternatif akım havai hatların maliyetlerine göre düşürülmesine,

- Çevirici istasyon kayıplarının azaltılmasına ve en önemlisi,

- İki veya daha fazla terminali bulunan iletim sisteminde güç akış kontrolü ve koruma düzenlerinin daha kolay yapılabilmesi ile kullanılabilirliğinin yüksek değerlerde sağlanabilmesine bağlıdır.

Ülkemizde kullanılabilme açısından doğru akım ile iletim sistemi için şunlar söylenebilir:

- Ülkemizde genelde santrallerin doğuda, tüketim bölgelerinin ise batıda olması sebebiyle güç iletim mesafesi büyüktür (örnek olarak Keban-İstanbul arası 800 km nin üstündedir),

- Her geçen gün enerjiye olan ihtiyacın artması sebebiyle, iletilecek gücün daha da büyüyeceği aşikârdır.

Böylece doğru akım ile enerji iletiminin seçimine neden olan yüksek güç ve uzun mesafe gibi faktörler ortaya çıkmaktadır. *Fakültesi, 1980*

Dolayısıyla, doğru akım ile iletim sistemi, doğu-batı enerji iletimi konusunda şu an kullanılmakta olan 400 kV.luk alternatif akım sistemine karşı incelenmesi gereken ciddi bir alternatiftir. *enth Edition, Mc Graw-Hill Book Company, 1978*

Sonuç olarak, doğru akım sistemi bazı hallerde zorunlu olarak kullanılmakta ve bazı hallerde de alternatif akım sistemine göre ekonomik üstünlükleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak, tercih edilmeden önce mevcut ülke teknolojisinin yeterli olması, yetişmiş eleman gerektirmesi ve çok terminalli sistem yapımının karmaşık ve zor olması nedeniyle çok iyi bir araştırma gerektirmektedir.

7. İHAN, M., Orta Gerilim Şebekeleri I, I.T.O., Elektrik Fakültesi, 1980

8. BEAOK, B., Doğru Akımla Enerji İletimi, TMMOB-EMG Yayın Organı, Sayı 346, Sayfa 194-201, 8/1987

9. SÖREN, T., Yüksek Gerilim Doğru Akımla Enerji İletimi, Kaynak, Sayı 48, Sayfa 24-26, Eylül 1988

KAYNAKLAR

1. ASEA Journal, Vol.3, 1975
2. BAYRAM, M., Elektrik Santralleri ve Şebekeleri, İ.T.Ü., Elektrik Fakültesi, 1980
3. Electra (Cigre), Sayı 34, Sayfa 43-61, 1971
4. FINK, G.D.- BEATY, H.W., Standard Handbook for Electrical Engineering, Eleventh Edition, Mc Graw-Hill Book Company, 1978
5. GUNGÖR, B.R., Power Systems, Harcourt Brace Jovanovich, 1988.
6. IEEE, Transactions on Energy Conversion, Vol.4, No.3, September 1989
7. İNAN, M., Orta Gerilim Şebekeleri I, İ.T.Ü., Elektrik Fakültesi, 1980
8. ÖZAGAÇ, B., Doğru Akımla Enerji İletimi, TMMOB-EMO Yayın Organı, Sayı 346, Sayfa 194-201, 8/1987
9. SERİM, İ., Yüksek Gerilim Doğru Akımla Enerji İletimi, Kaynak, Sayı 60, Sayfa 24-34, Eylül 1990

10. SEVAIOĞLU, O., HVDC Sistemleri ve Türkiye, a.g.e., Sayfa 39-50
11. YUKSELER, H.N., Doğru Akımla Enerji İletim Olanakları ve Türkiye'de Görünüm, a.g.e., Sayfa 35-38
12. UHLMANN, E., Power Transmission by Direct Current, Berlin Heidelberg, New York Springer Verlag, 1975
13. WEEDY, E., Electric Power Systems, Second Edition, John Wiley and Sons, 1975

1967 İstanbul'da doğuluyum. İlk orta lise eğitimi İstanbul'da tamamladım. 1981 yılında girdiğim İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Enerji Bölümü'nden 1985'de mezun oldum. 1988 yılında Yıldız Üniversitesi'nde Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başladım. Aynı üniversitenin Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktayım.

ÖZGEÇMİŞ

1962 Kastamonu doğumluyum. İlk, orta tahsilimi İstanbul'da tamamladım. 1981 yılında girdiğim İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Enerji Bölümü'nden 1985'de mezun oldum. 1990 yılında Yıldız Üniversitesi'nin Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başladım. Halen aynı üniversitenin Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktayım.

