

# Çok Yüksek Gerilimlerde Enerji İletiminin Teknik ve Ekonomik Yanları

Yazan : **Rudolf**

**KAHNT**

Çeviren:

**Sevinç Uğur TAHAOGIAJ**

**PETKİM**

## Ö Z E T

*Bu makalede, 380 kV un üstündeki gerilimlerde enerji iletiminin özel sorunları tartışılmaktadır. DA ve AA enerji iletimi arasında yapılan bir ekonomik karşılaştırmaya ek olarak, AA da gerilim seçilmesi, hava hatlarının tasarlanması ve yalıtım sorunlarına da değinilmektedir.*

## S V M M A R Y

*Special problems pertaining to power transmission at voltages exceeding 380 kV are discussed. in addition to a comparison between AC and DC systems on an economic basis, questions of AC transmission such as voltage selection, planning of transmission lines and problems of insulation are considered.*

## 1. GİRİŞ

Enerjinin büyük ölçüde iletilmesi, ekonomik ve teknik nedenlerden, yüksek gerilimlerin kullanılmasını gerektirir. Bu, özellikle, enerjinin çok uzak mesafelere iletiildiği —yani hidroelektrik güç merkezlerinin yük merkezlerinden çok uzakta olduğu— durum için uygun olur. Bununla birlikte, enerji isteminin büyümesi de, daha yakın mesafeler için bile, enerji sistemlerinde çok yüksek gerilimlerin kullanılmasını gerektirir. Bunun bir nedeni, üretilen enerjinin tümünün bir yerde yoğunlaşmasından dolayı büyük enerji üretim merkezlerinden çıkan enerjinin yük merkezlerine ekonomik şekilde iletilmesi zorunludur. Bugün bile 1000 MWa kadar olan türbo-generatör gurupları çalışmaktadır; ileride birkaç bin MW luk güçleri bir tek güç merkezinden iletmek zorunda kalınmış olacaktır (1). Bir başka neden olarak da kısa devre düzeyindeki yükselme gösterilebilir. Kısa-devre zorlamaları, mevcut enerji sistemleri uygun şekilde bölümlere ayrılmak ve sonra bu bölümler daha yüksek gerilimli hatlarla tekrar birbirine bağlanmak suretiyle, ekonomik bakımdan

(\*) Siemens'in «Extra-High-Voltage AÇ Transmission» başlıklı yayınından çevrilmiştir

katlanılır şuurular içinde tutulabilir. Son olarak, enterkonekte çalışma nedeniyle, daha yüksek enerji iletim yeteneği olan hatlar gerekli olabilir. Bu hatlar yalnızca iştirakçilerin kendi enerji üretim merkezlerinin ekonomik çalışmasına olanak vermekle kalmaz, ayrıca gerekli yedek kapasiteyi de sağlar. Bir enterkonekte işletmede, iletilecek enerji o güne kadar kullanılan bir gerilime sahip ek hatlarla arttırılabılır de, belirli limitlerin üstünde, daha yüksek bir gerilimin kullanılması elverişli olabilir.

Enerjinin büyük miktarlarda iletilmesi için 220 kV ve 380 kV luk gerilimler, nisbeten kısa mesafelerde bile, artık elverişli olmayacaktır; onun için daha yüksek iletim gerilimlerinin işin içine sokulması artık zorunludur. Nüfus yoğunluğu büyük olan bölgelerdeki güzergah sorunları da, mevcut güzergah şeridini en iyi şekilde kullanabilmek için yine daha yüksek gerilimleri gerektirebilir. Örneğin, 700 kV luk bir tek hava hattıyla iletilebilen enerji, yaklaşık olarak 380 kV luk üç hat veya 220 kV luk 12 hattı gerektirir.

500 kV luk enerji iletim sistemleri bugün, SSCB de ve ABD de işletilmektedir. Kanadada da, 700 kV luk bir enerji iletim sistemi 1965 yılında işletmeye konulmuştur. 500 kV ve 700 kV



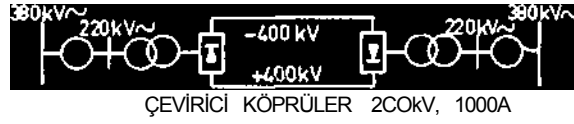
luk ek sistemler Güney ve Kuzey Amerika, Avustralya, Kuzey Afrika, SSCB, Fransa ve Japonyada tasarlanmaktadır. ÇYG enerji iletiminin önemle artacağını gösteren her türlü belirti ortadadır. Eninde sonunda, 380 kV un üstündeki iletim gerilimleri diğer ülkelerde de gözönüne alınmak zorunda kalınacaktır (2,3).

## 2. AA ENERJİ İLETİMİNİN DA ENERJİ İLETİMİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Teknik bakımdan hem AA, hem DA ile ÇYG enerji iletilebilir. Onun içki, diğer unsurlar alınacak kararı zorunlu kılmıyorsa, bağımsız bir tek tasan için akım türünün seçimi yalnızca bir ekonomiklik sorunu olacaktır.

enerji iletim sisteminin tesis masraflarını göstermektedir, iletilecek enerjiye bağlı olarak, DA in AA a bakarak ekomik üstünlük gösterdiği uzaklıklar, sırasıyla, 900 km ve 1200 km den başlamaktadır. SSCB ve ABD de 1000 MW ve 2000 MW için yapılan çalışmalar 1000 km nin üstünde uzaklıklar vermiştir (5,6). Kablo kullanıldığında durum farklı olmaktadır. Yeraltı kabloları için ekonomik sınır 100-200 km. dolayındadır.

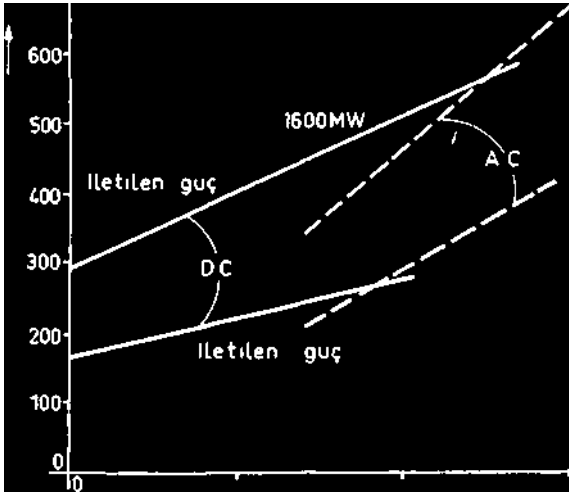
Enerjinin hava hatlarıyla iletilmesinde DA kullanılması yalnızca çok uzak mesafeler için ekonomik üstünlük sağlamaktadır. Bununla birlikte, güzergah sorunu ileride ÇYG kablolarının kullanılmasını zorunlu kılabilir. Bundan dolayı kısa mesafeler için bile — büyük şehirlerin beslenmesi durumunda — DA enerji ile-



«OOMW DA İLETİM 380-380kV

500

1000 1500km  
->iletim uzaklığı



Malotuş 700-| 10°DM

uzaklıklar için daima DA enerji iletimi gözönüne alınmalıdır.

DA enerji iletiminin teknik bakımdan AA a sayısız üstünlükleri vardır. Bunlar arasında, kararlılık probleminin bulunmaması ve kısa devre güçlerinin iletilmemesi sayılabilir. Bu bakımdan DA in gelecekteki bir uygulama alanı olarak, büyük şebekelerin birbirlerine bağlanması gösterilebilir, işlemekte olan hattan beslenme noktalan almanın AA dakinden daha masraflı ve bugüne kadar DA kesiciler için bir ekonomik yapının bulunamamış olması ise sakinliği yanlarıdır.

### 3. GERİLİMİN SEÇİLMESİ

Enerji sağlayan sistemler tasarımılanırken daha yüksek sistem geriliminin ve kullanılacak gerilim kademelerinin seçiminin büyük önemi vardır. Özellikle enerji tüketiminin artması nedeniyle, bu daha yüksek gerilim sisteminin, bundan önceki bir gerilime sahip sisteme bağlı olarak, yeteri kadar büyük bir enerji iletim gücüne sahip olması gerekir. Bir ÇYG sisteminin ekonomik olarak geliştirilmesi için yaklaşık 1 : 2 oranındaki bir gerilim kademesi uygun olur. Örneğin, Kuzey Amerikada, geniş bir 230 kV luk sistemin bulunduğu bölgeler için sonraki kademe 500 kV ve 345 kV luk sistemin bulunduğu bölgeler için de 700 kV tur.

Başka bir orandaki — örneğin 1: 3 oranındaki — kademeler, genellikle ilk işleme devresinin uzun sürmesi nedeniyle, çok kere ekonomik olmayan yüksek 'toplam maloluşlara götürür. Bir kural olarak, önce 1: 2 oranında bir gerilim kademesini almak ve sonra eski kademe-yi bırakmak daha iyi olur.

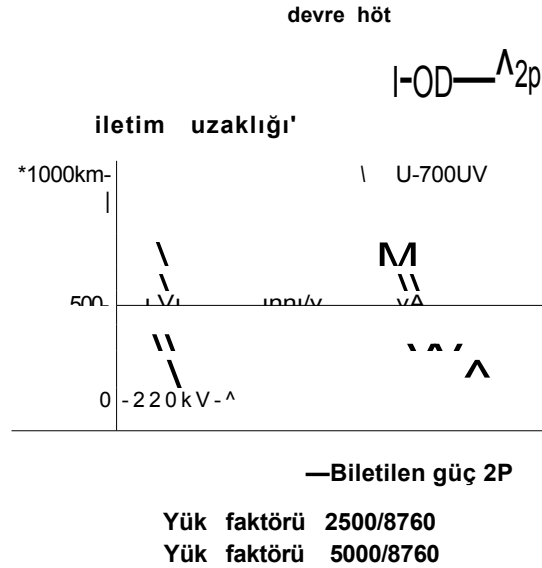
Yeni bir gerilim ortaya çıktığı zaman, uluslararası enterkonekte işletmenin gerekleri de gözönüne alınarak bir enterkonekte işletmenin gerekleri hatırlanmalıdır. Farklı gerilim düzeyleri irtibat trafolarının kullanılmasını gerektirdiği zaman, bu durum güç trafosunun limitlerine artış verir; diğer yandan, aynı gerilim düzeyindeki yedek enerji, sisteme katılan enerji yardımıyla daha kolaylıkla sağlanabilir. Uluslararası işbirliğinin bir sonucu olarak herhangi bir özel durum için bir ÇYG seçimi artık daha kolaydır. IEC, gelecekteki ÇYG için bir Standard yapma çabası içindedir. Bu amaçla aşağıdaki değerler önerilmiştir :

380 kV dan 400/420 kV, 500/525 kV a

700 kV dan 750/765 kV a

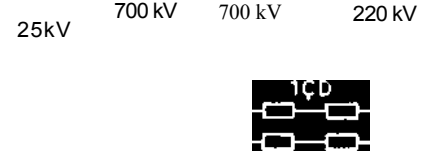
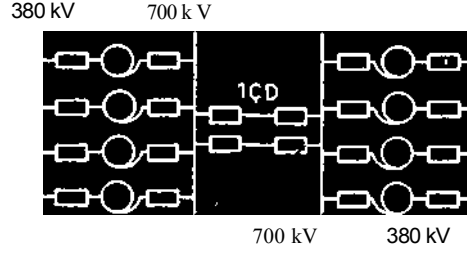
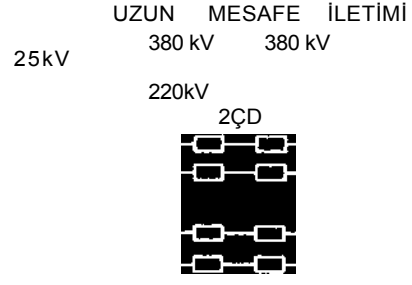
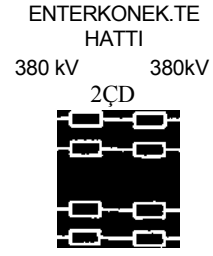
(Anma gerilimi/maksimum sistem gerilimi)

Şekil 2, iletilen enerji ve iletim uzaklığına bağlı olarak 220, 380 ve 700 kV için ekonomik gerilim kademelerini göstermektedir. Bunlar, çift devreli bir hat ile enerji iletimi için tipik değerlerdir, örneğin, yaklaşık 180 km den başlayıp daha yukarı mesafelere 1000 MW lık bir gücün iletilmesi için 380 kV luk bir gerilim elverişlidir. 2000 MW için 380 kV un kullanılması ise bütün mesafeler için ekonomiktir. Ancak 4000 MW için, 600 km den başlayarak, 700 kV luk bir gerilim kullanmak yerinde olur.



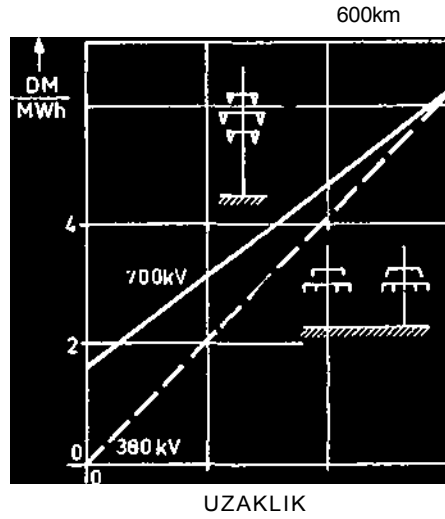
Şekil 2. 220, 380 ve 700 kV da ekonomik iletim bölgeleri. İletim, ekonomik kesitli çift devre hatlarla ve her bir durum için gerekli kompanzasyon sağlanmış olarak yapılmaktadır.

Şekil 3, 4000 MW lık bir gücün iletimi üzerine yapılan ayrıntılı bir incelemenin sonucunu göstermektedir (7). Burada iki durum gözönüne alınmıştır: Birincisi, 380 kV luk iki büyük sistemin bir hatla bağlanması ve ikincisi, büyük bir güç merkezinden bir yük merkezine enerji ileten bir dallı-iletim hattı. Bu gücü iletebilmek için 380 kV da iki tane çift devreli hat gerekirken, 700 kV da yalnızca bir çift devreli hat yeterlidir. Bu hatların optimum şekilde tasarlanmasıyla, yaklaşık olarak 600 km ve yukarısı uzaklıklarda bir üst gerilim, bağlantı hattı için ekonomik olur; ancak, 200 km den bile başlasa, aynı gerilim bir dallı iletim hattı için ekonomik olmaz. Eldeki güzergahın genişliğine bağ olarak da, oldukça kısa mesafeler için bile 700 kV luk gerilim seçilebilir. Onun için, varılacak sonuçlar enerji iletim koşullarına bağlıdır ve örneğin, yük faktörüyle etkilenir.



İLETİM

İLETİM



500km

200

400

200

Şekil 3. 4000 MW lık bir AA iletim sistemi için iletim maliyetleri (ÇD = çift devre). (Yıllık yük faktörü 4000/8760, Kayıp gideri 40 DM/MWh, Sermaye gideri % 12).

#### 4. HAVA HATLARI VE SİSTEM MASI

Bir ÇYG hava hattının tasarlanmasında iletken seçimi en önemli etkidir, iletkenin elektriksel bakımdan tasarlanması ve boyutlandırılmasında, hem ekonomik kesit ve hem de korona emredici unsurlardır.

Ayrıntılı incelemeler, yük faktörü ve enerjinin maloluş değerine bağlı olarak, doğal yüklerde (dalga empedansı yüklerinde) yüklenmiş çelik-aluminyum iletkenler için ekonomik akım yoğunluğunun 0,6-0,8 A/mm<sup>2</sup> olduğunu göstermiştir. Buna göre ekonomik kesit alanları için yaklaşık değerler:

380 kV hatlarda 1200 mm\*

**TASARLA-** 500 kV hatlarda 1600

700 kV hatlarda 2200 mm<sup>2</sup>

olmaktadır. Enterkonekte hatları için bu ekonomik kesitler, yük faktörlerinin oldukça düşük olması nedeniyle daha küçük olabilir. Yayınlanmış verilerde hatların tasarlanmasında öngörülen kesit alanları, 500 kV için 1500-2400 mm<sup>2</sup> ve 700 kV için 2400-2800 mm<sup>2</sup> dir.

Korona kayıpları ve koronanın neden olduğu radyo girişimleri, iletkenin yüzeyindeki maksimum gerilim gradyanına bağlıdır. Radyo girişimiyle ilgili uyulması zorunlu gerekler, nüfus yoğunluğu büyük bölgelerden geçildiğinde, çok sıkıdır. Maksimum iletken gradyanı, iletkenin kesitine ve demet düzenine bağlı olarak, 15-18

kV/cm yi geçmemelidir (8,9,10). Bu büyüklüklerle korona kayıpları ekonomik bakımdan önemsiz bir duruma gelir. Çok yüksek gerilimlerde korona problemleri genellikle, demet iletkenlerin kullanılmasıyla çözülmüştür. Bu yolla, aynı zamanda, pek çok teknik üstünlük de sağlanmıştır. Uygulamada ve tasarlamada, örgülü iletkenlerle yapılan aşağıdaki demet iletken düzenlerinin yeterli olduğu ortaya çıkarılmıştır.

380 kV için: Genellikle ikili demet; ayrıca üçlü ve dördü demetler.

500 kV için: İkili ve üçlü demetler.

700 kV için: Dördü demet.

Ekonomiklik yönünden bir demetteki üç veya dört iletken, aynı toplam kesite sahip bir tek iletkene hemen hemen eşdeğerdir. Onun için iletkenin seçimi iletkenin yüzündeki gerilim gradyanı, enerji iletim koşulları ve bazı durumlarda da, ileride gerilimin daha yüksek bir gerilime çevrilebilmeği olanaklarına dayanır.

Yükün sürekli artışı nedeniyle, bir YG sistemi tasarısı uzun süreli bir tasarlamayı gerektirir. Yeni hatları önce, oldukça uzun bir sürede daha alçak bir gerilimde işletmek çokça ekonomik olur. Pek çok durumlarda hava hattı kafes direklerini daha yüksek bir gerilim için tasarlamakla beraber başlangıçta demetteki iletken ve zincirdeki izolatör sayısını azaltarak hattın donanımını yapmak elverişli bulunmuştur. Bir çift devreli hattın başlangıçta birinci devresini çekip daha sonra da, uygun bir zamanda, ikinci devresini çekmek ve daha yüksek bir gerilime dönüştürmek olanağı vardır. Böylece sistemin yetenekleri yükün artışına uygun olarak arttırılmış olur. Direklere başlangıçta daha alçak gerilimli çift devreli bir hat da çekilebilir, ileride demetteki iletken sayısı ve zincirdeki izolatör sayısının uygunluğu sağlanarak hattın daha yüksek gerilimli tek devreli bir hatta dönüştürülmesi olanaklı olur. özel durumlarda kafes direk temellerinin daha yüksek gerilimdeki gerilmeler için tasarlanması bile tam anlamıyla elverişlidir. Direğin diğer kısımları da başlangıçta herhangi bir gerilim için tasarlanabilir ve sonra daha yüksek bir gerilim için değiştirilebilir.

Her iki ucunda trafo bulunan yüksek gerilimli yeni bir hat, daha alçak bir gerilim düzeyindeki yüksek gerilim hatlarıyla paralel olarak bağlanacağı zaman, yeni hattın istenilen büyüklükte bir yükü üstüne alabilmesini sağlamak için çokça ek tedbirler alınması gerekir. Bu durumda iyi bir yöntem, iki gerilim düzeyi arasında faz açısı kontrolü yapabilen ve «Kuadratur Trafo» demlen trafoların kullanılmasıdır.

Bu trafolarla, ana gerilime göre fazı 30\*—60\* arasında değişebilen bir tamlayan gerilim devreye katılabilir. Bu trafonun sargılarının, daha sonra yalnızca faz regülasyonu için kullanılmak üzere, bağlantıları yeniden yapılabilecek şekilde düzenlenmiş olması istenilir.

## 5. YALITIM SORUNLARI

Çok yüksek gerilimlerdeki toplam maloluş bedelleri yalıtım tarafından, doğal olarak, alçak gerilimlerdekinden daha geniş şekilde etkilenir. Bu nedenle, güvenlik için yapılacak harcamaların ekonomiklikle dengeli durumda olması gerekir. Transformatörlerin, şönt reaktörlerin v.b. iç yalıtımları için kullanılan yağlı kâğıt, aslında, alçak gerilimlerde olduğu gibi çok yüksek gerilimlerde de aynı şekilde davranır. Ama bu, dış yalıtım —yani havadaki güvenlik uzaklığı— için böyle değildir. Gökürültülü fırtınalar sırasındaki atmosferik boşalımın neden olduğu dalgalara benzer dik alımlı dalgalardan yararlanarak yüzeysel atlama gerilimi ile yüzeysel atlama uzaklığı arasında —hattâ geniş hava aralıklarında bile— doğrusala yakın bir bağıntı elde edilir. Diğer yandan hava aralığının 50-60 Hz frekanslı gerilimler için bağıl elektriksel dayanımı, yaklaşık 2 m lik bir uzaklığa karşılık olan bir yüzeysel atlama değerine kadar düşer. Yalan bir geçmişteki incelemeler, dalga alın süresi 100-300 mikrosaniye olan açma-kapama aşın gerilimleriyle de benzer koşullar elde edildiğini göstermiştir.

Yüzeysel otlama uzaklığı			
.m			
T <sup>8</sup>	1000	2000	kV 3000
		*-%50 delinme gerilimi	
Açma-kopoma aşırı gerilimi i			
Ts=DO-300/JS			
		Darbe gerilimi 1.2/50pS	
		fÇubuk-Topraklı plâka	
		çubuk-Topraklı nokta	

Şekil 4. Çeşitli elektrod düzenleri için delinme gerilimi. Darbe gerilimleri 1,2/50 [j,s ve açma-kapama aşın gerilimleri için eşdeğer dalga Ts ≈ 100-300 ^s dir.



Şekil 4 de, 1,2/50 mikrosaniyelik standard darbe dalgası ile eşdeğer açma —kapama aşın gerilim dalgasındaki (dalga alın süresi  $T_s = 100—300$  mikrosaniye) % 50 delinme gerilimlerine karşılık olan yüzeysel atlama uzaklıkları, çubuk-topraklı çubuk ve çubuk-topraklı plaka elektrod düzenlemeleri için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu eğriler, bir takım yayınlanmış test sonuçlarının ortalama değerlerini göstermektedir (11). Elverişsiz koşullardaki limit eğrilere göre, havadaki güvenlik uzaklığının açma-kapama aşırı gerilimlerindeki yaklaşık 1000 kV a kadar olan elektriksel dayanımı, darbe gerilimlerindeki dayanımının % 70 i kadardır. 1000 kV dan sonra bu oran, artan gerilimle gittikçe daha kötüleşir. Yüzeysel atlama uzaklığının artmasıyla, açma-kapama dalgalan delinme geriliminde hemen hemen bir artış meydana gelmez. Bu durum, uygulamada karşılaşılan havadaki bütün yalıtım düzenlerine temelde uygun düşer.

Çok yüksek gerilim sistemleri, parafudrlar yardımıyla atmosferik aşın gerilimlere karşı kapsamlı şekilde korunmuştur. Parafudrlar zorlanmaları zararsız bir değere —koruma düzeyine— kadar düşürür. Onun için yalıtım düzeyi, atmosferik aşırı gerilimler tarafından değil toprak arızalan ve açma-kapama işlemleri —yani açma-kapama aşırı gerilimleri— nedeniyle enerji sisteminde ortaya çıkacak iç etkenli aşın gerilimler tarafından belirlenir. Bu, havadaki güvenlik uzaklıklarının elektriksel dayanımını arttırmakla beraber, ÇYG sistemlerinin açma-kapama aşırı gerilimlerine karşı yalıtılmasına çok önemli bir nedendir. Bu yüzden, bir ekonomik boyutlamayı olanaklı kılmak için, açma-kapama aşırı gerilimlerini sınırlayan tedbirlerin alınmasında, yukanda belirtilenlerin tümü de gereklidir. 500 kV ve 700 kV luk sistemlerde aşın gerilim katsayısı 2 ye kadar düşürülebilmiş olacaktır. Ancak, 1000 kV gibi daha yüksek gerilimlerde daha da ciddi sınırlamalar gerekir.

Uygulamada, bir toprak arızası nedeniyle yükün atılması üzerine uzun bir hattın sonunda doğacak gerilim zorlanmaları çok önemlidir. Bu yüzden ortaya çıkacak büyük aşın gerilimler, uzun hatların sonlarına doğrudan doğruya bağlanacak şönt reaktörler yardımıyla etkili bir şekilde smirlanabilir. Bu reaktörler, Ferranti Etkisi sonucu diğer unsurlar arasında doğan gerilim yükselmelerinin etkisini zararsız duruma getirir ve geçici aşın gerilimleri düşürür. Gerilimi sabit tutmak amacıyla reaktörler olağan işletmeye tahsis edilirse, büyük aşırı gerilimler ortaya çıkmazdan önce, bunların tekrar etkili duruma geçebilmesinin sağlanması gerekir. Bu kendi kendine harekete geçen hızlı devreye girmelerle yapılabilir. Örneğin, ark aralıkları üze-

rinden kendi kendine gecikmesiz yeniden devreye girmeler önerilmiştir (12). Bir başka düşünce de, sürekli olarak enerjilendirilmiş, kontrol edilebilir, doğrusal olmayan karakteristikli şönt reaktörler kullanmaktır. Bu yöntem, yüksüz durumda ve yükün atılması durumunda tam etkili olmaktadır (13).

Uzun iletim hatlarının açma-kapaması sırasında meydana gelen aşırı gerilimler de aynı sorun ortaya çıkarır. «Geçici düzelsiz» kesiciler kullanılarak «hattın yere düşmesi» sorununun üstesinden gelinmiştir. Hatların üzerine yapılan açma-kapamalarda, önceden devreye giren dirençler yardımıyla aşın gerilimlerin sınırlandırılması için gereken yapılabilir. Bu, özellikle yüklü durumdaki hatlar üzerine kapama yapıldığı zaman —yani bir arıza üzerine yapılan kapamadan sonraki tekrar kapamada— önemlidir. Açma-kapama aşırı gerilimlerini sınırlamak için başka bir yol da parafudr kullanmaktır. ÇYG sistemlerinde yalnızca atmosferik aşın gerilimleri değil açma-kapama aşın gerilimlerini de azaltmada parafudrlar kullanılabilir. Bu yöntem, parafudrların tasarımındaki gelişmeler —özellikle modern parafudrların uzun süreli boşalma kapasitesi— nedeniyle ümitli görünmektedir. Aşırı gerilimleri sınırlamak için yukanda belirtilen yöntemleri uygulamada kullanmak ise bir ekonomiklik sorunu olmaktadır.

Sistemin sıfır noktasını topraklama yöntemini de, büyük ölçüde, yalıtım boyutlandırması etkiler. Bir ÇYG sistemindeki bütün transformatörlerin sıfır noktalarının, topraklama katsayısının küçük olmasını sağlamak amacıyla, doğrudan doğruya topraklanması gereği temelde istenilen bir husus olarak ortaya çıkar. Aynı husus, hatlara doğrudan doğruya bağlanan şönt reaktörler için de öyledir. Bu gibi şönt reaktörler için, bir toprak arızasında meydana gelen gerilim yükselmesine tepki gösterdiklerinden, pozitif simetrik bileşen reaktansına oranla daha düşük bir sıfır simetrik bileşen reaktansı istenilir.

Gerilim zorlanmalarına ek olarak, sistemin işletme gerilimi yükseldikçe iklimsel etkiler ve atmosferik kirlenmeler yüzünden yalıtım dayanımında meydana gelen zayıflama, dış etkenli yalıtım bakımından gittikçe artan bir önem kazanmaktadır. Yalıtım dayanımının, yukanda belirtilen azaltılmış güvenlik katsayısıyla bile, işletme geriliminin üstündeki olağan gerilim yükselmeleri için yeterli olması gerekir.

## 6. ENERJİ SAĞLAMA GÜVENLİĞİ

Bir enerji iletim sisteminin tasarlanmasında işletme güvenliğinin de çok büyük bir önemi vardır. Çok yüksek gerilimler, genellikle, çok bu-

yük miktardaki enerjilerin iletimi için ve yükselen işletme gerilimiyle gittikçe daha ciddi duruma gelen bir arızanın doğuracağı sorunlar bakımından kullanılır. Yedek tesisler yardımıyla enerji sağlama güvenliğini arttırmak masraflı olduğundan, yedek güç sorununun inceden inceleme gözden geçirilmesi gerekir.

Bir ÇYG sisteminin tasarlanması sırasındaki temel sorunlardan birisi, başlangıçta yalnız bir hattın mı yoksa çok sayıda hattın mı inşa edilmesi gerektiğidir. Enerji iletilme gücü yeterli daha alçak bir gerilim düzeyindeki paralel hatlar elverişli olmadığı zaman, tesislerin genişletilmesi çalışmalarının daha birinci aşamasında bile birkaç hat daha inşa etmek gerekli olabilir. Aksi durumda —yani tek hat durumunda— arızalar geniş bir bölgeye enerji sağlama olanağının ortadan kalkmasına neden olabilir.

Enerji sağlama güvenliğiyle çok yakından ilgili noktalardan birisi de hat arızalarında güvenlik uzaklığı sorunudur. Sıfır noktası topraklanmış sistemlerde tek fazda ark meydana getiren toprak arızaları çok önemli olduğundan, yüksek hızlı tekrar kapayıcı kullanılması en etkili yöntemdir. Eğer çalışan yalnız bir hat varsa, kararlılık nedenleriyle, genellikle yalnız tek fazlı tekrar kapama uygulanmalıdır. Ancak çok yüksek gerilimlerde hattın boyu, hattın meydana getirdiği kapasite nedeniyle doğan bileşke akım yüzünden, tek fazlı tekrar kapayıcının yarar sağlayabildiği bir maksimum uzunlukla sınırlıdır. Onun için, örneğin, hat üzerinde ara salt merkezleri kurulması gerekebilir. Bileşke akımların etkilerinin özel cihazlarla karşılanması da ayrıca önerilmiştir. Paralel hatlar durumunda kararlılık koşulları daha elverişlidir. Hat arızaları için, bir bileşke akım sorunu ortaya çıkarmayan üç fazlı kendi kendine tekrar kapama uygulanabilir.

Trafo ve salt merkezi arızaları için yedek teçhizat kullanılabilir. Ancak bu durumda, örneğin trafolar arızalandığı zaman, yedek trafonun kendi kendine devreye girmesi şeklindeki anında bir yedekleme masrafının mı yerinde olacağı, yoksa arızalı trafonun sağlamıyla değiştirilmesi için gerekli zamanın mı kabul edilebilir olduğunun gözönüne alınması gerekir.

## 7. CİHAZLARIN VE TESİSLERİN ANMA DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Trafo ve salt merkezlerinin ve tesislerin diğer kısımlarının anma akımlarının ÇYG için belirlenmesi, genellikle, hava hattının enerji iletim olanağına dayanır; bununla birlikte değişmez bir büyüklük değildir ve hattın uzunluğuna bağlıdır : Kısa hatlarda bu büyüklüğü ısısal sınırlar

lamalar belirlemekle birlikte, uzun hatlarda gerilim düşümünü gözönüne almak gerekir. Enerjinin çok uzak noktalara iletilmesi durumunda, tepkin güç ve kararlılık sorunu, bunun gerektireceği bir sınırlı zorunlu kılar. Daha çok uzun hatlarda doğal yüke, enerji iletilme gücü olarak da bakılabilir. Gerilim ayar ve kararlılık ek tedbirlerle oldukça iyileştirilebilir. Bunun sonucu olarak da, doğal yüklerin bir sınır değeri olması zorunlu kalmaz; onun yerine, iletim gücü bakımından, daha çok bir ana büyüklük olarak gözönüne alınır.

Çeşitli gerilimler için doğal yükler :

380 kV hava hattı için yaklaşık	600 MW
500 kV » » » »	1000 MW
700 kV » » » »	2000 MW
1000 kV » » » »	4000 MW

Tesislerin ve cihazların anma akımları, bir kural olarak, doğal yüklere karşılık olan akımın yaklaşık iki katı olarak belirlenir; kısa hatlar durumunda bu değeri akımın dört katı olabilir.

Trafo ve salt merkezlerinin, izin verilen maksimum trafo boyutları ve taşınma ağırlıklarının sınırları. 700 kV luk trafoların, kesinlikle, işletmeye sokulabilecek durumda —yani buşingleri dışındaki bütün kısımları birleştirilmiş olarak— bir yerden bir yere taşınması isteniyorsa, bu ancak, doğal yükleri karşılayacak üç tek fazlı trafodan oluşan bir üç fazlı grupla sağlanabilir. Bunun yanında, birkaç üç fazlı trafonun paralel bağlanması da çok gerekli olabilir. Daha büyük anma değerlerine, trafonun kullanılacağı yerde birleştirme yapılarak ulaşılabirise de ÇYG de bugüne kadar böyle bir uygulama hiç yapılmamıştır.

ÇYG hatlarına doğrudan doğruya bağlanacak şönt reaktörlerin boyutlandırılması hatların uzunluğuna bağlıdır. Eğer şönt reaktörler kesicilerle bir olağan işletmeye sokulup-çıkanlabiliyorsa, bileşke gerilimdeki değişmelere önem verilmesi gerekir.

Tesislerin ve cihazların kısa devre büyüklüklerinin belirlenmesine özel bir özen gösterilmelidir. Bir şebekenin kurulması genellikle bir hat ve iki salt merkezinin kurulmasıyla başlar. Bu durumda kısa devre düzeyi oldukça düşüktür. Enerji isteminin büyümesi yeni hatların ve ana şebekeye kısa tali hatlar üzerinden bağlanmış yeni trafo merkezlerinin kurulmasını gerektirir. Böylece kısa devre düzeyleri, yüke bağlı doğrusal artışa bakarak daha çok yükselir. Büyük güç merkezleri şebekeye doğrudan doğruya bağlandığı zaman ise birden bire artışlar meydana gelebilir.

Üç fazlı bir kısa devre sonunda ortaya çıkacak

en yüksek arıza akımlarının ÇYG sistemleri için belirtilmiş bulunan bugünkü değeri 50 kA kadardır. Bu değere karşılık olan kısa devre düzeyleri aşağıdadır:

380 kV da yaklaşık	35 GVA
500 kV da »	45 GVA
700 kV da »	60 GVA

ÇYG sistemlerindeki toprak arızası akımları, üç fazlı arıza akımlarına eşit veya daha büyük olabilir, örneğin, ingilizlerin gelecekteki 400 kV luk sistemleri için 50 kA lik üç fazlı anza akımları yanında toprak anza akımları 60 kA olarak öngörülmüştür. Maksimum toprak arızası akımlarına karşı alınan tedbirler her zaman daha yüksek bir topraklama katsayısını gerektirir. Bu nedenle de, yalıtım için oldukça yüksek masrafları zorunlu kılacak daha yüksek bir yalıtım düzeyi gerekir. Diğer yandan, büyük toprak arızası akımlarının etkilerinin karşılanması da zorunludur. Salt merkezlerinde seçici koruma ve koruyucu topraklama sistemleri için pek çok sıkı tedbirler gerekir.

## 8. TEPKİN GÜÇ

ÇYG hatları, kendi yüklerine bağlı olarak, büyük çapta tepkin gücünü de alınıp-verilmesini gerektirir. Şekil 5, herhangi bir yükteki bir değişmez gerilimde, hava hattının beher 100 km sinden akacak tepkin enerjiyi göstermektedir. Küçük yüklerde, örneğin 220 kV luk bir hat, yaklaşık 15 MVA r lık bir kapasite' tif şarj gücünü gerektirir. Diğer yandan, 700 kV luk bir hat için anma gerilimindeki şarj gücü 200 MVA r kadardır. Yüksüz bir hat için gerekli şarj gücü, hattın işletme geriliminin büyümesi nedeniyle, gerçekten oldukça yüksektir. Genellikle, bir sistemin şarj enerjisinin çok küçük bir bölümünü generatörler verir; daha büyük bölümü ise şönt reaktörlere sağlanır. Ekonomik nedenlerden, bu reaktörler, daha çok orta gerilimler —örneğin 30 kV— için tasarlanırlar ve ÇYG trafolarının üçüncü sargılarına bağlanırlar. 380 kV ve daha yukarısı gerilim düzeylerine kadar, açma-kapama aşın gerilimlerini sınırlamak amacıyla, reaktörlerin hatta doğrudan doğruya bağlanması zorunludur. Reaktörlerin anma güçleri toplamı sistemin küçük yüklerdeki koşullarına göre kararlanır. Sistem genişletileceği zaman, ilk adımda şarj enerjisinin % 100 ünün karşılanması gerekebilir de daha sonra % 75 ini karşılamak yeterli olur. ÇYG için tasarlanacak reaktörlerin vereceği tepkin güç, hatların uzunluklarına ve yalıtım koordinasyonuna bağlıdır. Şekil 6, 500 kV luk bir sistemde şarj enerjisinin tamamını karşılamak için reaktörlerin sistem içindeki dağılımının nasıl tasarlandığını göstermektedir (15). Anma güçleri toplamına göre, reaktörlerin % 40 ı doğrudan doğruya hava hattına, % 60 ı ise tra-

foların üçüncü sargılarına bağlanmıştır. Bir ÇYG şebekesinin ilk günlerinde hatlar henüz kendi doğal yüklerinde çalışmakta olduğundan, şönt reaktörler hatta doğrudan doğruya bağlanabilir. Açma-kapama koşulları daha az ağır ve gerilim kademeleri daha küçük olduğundan gerilim, orta gerilim reaktörlerinin devreye sokulup çık-

rt Var  
-200

## Şekil 5. ÇYG Hava hatlarının yükün bir fonksiyonu olarak tepkin güc istemi.

rılmasıyla kontrol edilebilir. Bununla beraber, iletilecek güç doğal yüke erişir erişmez hatta gerekli tepkin güç şarj gücüyle başabaş geleceğinden, şönt reaktörlerin bir kısmı veya tümü devreden çıkarılmalıdır. Hattın doğal yükünün üstünde güçler iletildiği zaman, hat için gerekli tepkin güç yük artışıyla birlikte çok keskin bir artış gösterir. Tepkin güç seri veya paralel bağlı kondansatör guruplarıyla sağlanmak zorunda da kalınabilir. Kondansatörler yerine büyük senkron kondenserler de kullanılabilir. Bunlar da şönt reaktörlerle değiştirilebilir ve böylece çok esnek bir kontrol sağlanabilir (16).

Tepkin güç sorunu, gerilim kontrolü sorunuyla çok yakından 700kV ilgilidir. Tepkin enerji, olarak verdiği oranda, kendi özkaynağından karşılanabilirse gerilim dar sınırlar içinde tutulabilir ve böylece hatlar ve trafolardan tepkin enerji istenilmez. ÇYG şebekelerinin gerilimleri kademe ayarlı trafolarla, şönt reaktörlerin devreye sokulup çıkarılmasıyla ve senkron kondenserler yardımıyla kontrol edilebilir. Bu kontrol ÇYG trafolarıyla yapıldığı zaman, yükte gerilim ayan yapan teçhizat, masrafları alçak gerilimlerdekinden daha çok arttırır. Bu nedenle

trafolarda gerilim kademe ayarının bulunup bulunmamasının tartışılması gerekir.

Şekil 6. Şönt reaktörlerin 500 kV hık bir sistem içinde düzenlenmesi (büyüklükler MVAr dır). Reaktörler 500 kVa doğrudan doğruya veya orta gerilime kesiciler üzerinden bağlanmıştır.

3x3 3x35 2x35 3x30

## 9. KARARLILIK

ÇYG iletim sistemlerindeki koşullar, kural olarak, kararlılık bakımından elverişsiz koşullardır. Bunun nedenlerinden birincisi, tali hatlarla bağlanmış salt merkezleri arasındaki uzun mesafeler; ikincisi, ekonomik nedenlerle kullanılan gelişmiş bir tasarıma sahip büyük türbogeneratörlerin daha küçük makinalannkinden oldukça büyük bir senkron reaktansa sahip olmalarıdır. Bu iki etken hatta bağlı makinalar arasındaki rotor sapma açısından bir artışa neden olur ve böylece, ayn bir tedbir alınmazsa büyük bir yükte, sürekli kararlılık bozulabilir.

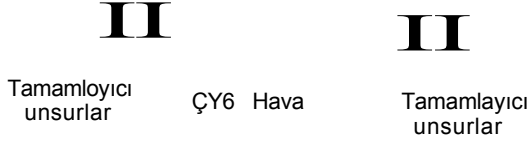
Bu tedbirlerin arasında hava hatlarında birden fazla iletkenden oluşan demet tertiplerinin kullanılması ve trafoların empedans gerilimlerinin düşürülmesi de vardır. Uygulamada, sürekli kararlılık sınırına, enerjinin verildiği ve enerjinin alındığı noktalar arasındaki açı yaklaşık 30° olduğu zaman erişilir. Onun için, doğal güç iletildiği zaman, yalnızca 500-600 km lik uzaklıklar için kararlı çalışma olabilir. Doğal gücün iM katı güçler için bu uzaklık yalnızca 250-300 km ola-

bilir. Daha büyük uzaklıklarda seri kondansatörler kullanarak kararlılık artırılabilir. Seri kondansatörlerin etkisinin hattın elektriksel boyunun kısılması veya doğal gücünün büyümesi şeklinde ortaya çıktığı söylenebilir. Verilen bir yükte kararlılığı artırmak için hattın yük açısı küçültülmelidir. Uygulamadaki bu küçültme oranı % 20-40 arasındadır. Çok büyük açılarda, ferromagnetik devrelerle ilgili olarak, aşırı gerilim ve aşırı yüklere neden olabilecek sabharmonik seyremeler riski vardır. Toplam etkili reaktansın % 50 den az bir bölümünün, bu nedenle, karşılanması gerekir (17). Hat üzerinde ara yerlere —örneğin hat uzunluğunun yarısında bir yere— konulacak senkron kondensatörler yardımıyla da kararlılık iyileştirilebilir. Kararlılık bakımından senkron kondensatörler, bir ek güç merkeziyle aynı etkiye sahiptir. Bunlar hattı iki enerji iletim sistemine bölerler ve böylece de kararlılığı korurlar.

Kısa devrelerle ilgili gerekler ve kısa devrelerden sonra sistemi olağan işleme durumuna getirmeye yarayan kendi kendine tekrar kapayıcılarla ilgili gerekler (geçici kararlılık), sürekli kararlılık gereklerinden çok daha ağırdır. Kullanılacak kendi kendine tekrar kapayıcının özelliklerinin belirtilmesi çok önemlidir. Daha önce de belirtildiği gibi, çok uzun hatlara tek fazlı tekrar kapayıcının ekonomik olarak uygulanabileceği şüphelidir. Uç fazlı tekrar kapayıcının, tek fazlı toprak arızaları için bile, gelecekte genellikle kullanılması olanağı vardır. Diğer hatlardan bağımsız bir hat için üç fazlı tekrar kapayıcı kullanılırsa kararlılık bakımından güçlükler ortaya çıkar. Bu durum özellikle, bir sistemin çalışmaya başladığı ilk günlerindeki durumuna uyar. Bu sırada generatörler, bir alçak gerilim düzeyinde ve çok sayıda seri bağlı trafodan geçerek iletilen bir enerji verir. Hatlar paralel bağlandığı zaman, hattın birisi devreden çıktığında, yine de, işlemekte olan makinalann kararlılığının oldukça iyi durumda kalmasını sağlayacak bir senkronlayan dönme momenti vardır.

Geçici kararlılık çok sayıda yollardan iyileştirilebilir. örneğin, kendi kendine tekrar kapamadan önceki ölü zaman sırasında, rotorun hareketini durdurmak amacıyla, yüksüz generatörlerin uçları arasına çok hızlı olarak bir direnç sokulmalıdır (18). Böylece makinalann hareketi geciktirilebilmiş ve sistemle senkron durumda kalması sağlanmış olur. Bu gibi dirençler oldukça büyük ek masraflar çıkaracağı gibi, büyük değerli kesme dirençleriyle ilgili bir deneme de bugün yoktur. Generatör uyarmasını kontrol etmeye yarayan yüksek hızlı cihazlar kararlılığın iyileştirilmesinde çok daha önemlidir. Uyarma ne kadar hızlı olarak değiştirilebilirse, yükün ortadan kalkmasından sonraki rotor seyremeleri de o kadar güçlü olarak sindiri-

lebilir. Kullanılmakta olan uyarma teçhizatları bu amaç için uygun değildir. Bunun yanında rotor sapma açısını kontrol eden özel regülasyonlarla ilgili modern doğrultucu uyarma teçhizatları kullanılarak kararlılık koşulları oldukça iyileştirilebilir.



Şekil 7. Bir yan-dalga iletim sisteminin şematik diyagramı.

Özellikle büyük güçler uzak mesafelere iletilirken, kararlılık sorununa bir çözüm olarak «yarı-dalga iletim sistemi» denilen bir yöntem gözönüne alınabilir. Reaktör ve kapasitör gruplarının etkisiyle hattın elektriksel boyu, hattın iki ucundaki makinaların rotorları arasındaki açılardan  $180^\circ$  den biraz daha büyük olacak şekilde artar. Böyle bir yan dalga iletim sisteminin çok önemli özellikleri vardır (19). Bu sistem, kararlılık bakımından, rotor sapma açısı yalnızca birkaç derece olan bir iletim sistemi gibi davranır. Bu yolla hem sürekli, hem geçici kararlılığın ikisi de sağlanabilir. Gerilim hemen hemen hattın her iki ucunda da aynı ve yükten bağımsızdır. Hat tam olarak kompanze edilmiştir ve dış etkenli hiçbir tepkin enerji ortaya çıkmaz. Yan-dalga iletim yöntemini geliştirmek için yine de yapılması gereken pek çok iş vardır. Bununla birlikte bu sistem, bugünkü tecrübelerle göre özellikle yüksek gerilim DA enerjilerinin elverişli olduğu uzak mesafelere enerji iletiminde, AA in ekonomik olarak kullanılmasına olanak verir.

#### KAYNAKLAR

43. National Power Survey. A Report by the Federal Power Commission. U. S. Government Printing Office. Washington, October 1964.
44. Sporn, Ph.; Nagel, T. J.; Price, W. S.: Electric Power Transmission in the USA. Looking Ahead to the Year 2000. CIGRE Report No. 412 (1964).
45. Jancke, G. : Grundsätzliche Gesichtspunkte bei der Projektierung von Höchstspannungsübertragungen. Bull. Schweiz. Elektrotechn. Ver. 55 (1964) pp. 420 to 424.
46. 400 kV-Forschungsgemeinschaft e. V., Heidelberg. High-voltage D. C. Power Transmission. Recommendation of Research in the

- Federal Republic of Germany. Report No. 20a (1966).
47. Lsykow, J. L.; Sokolov, W. N.; Rokotjan, S. S.: 750 kV-Fernübertragungen in der Sowjetunion (German translation). Arch. Energiewirtschaft. (1964) pp. 901 to 908.
48. McGregor, D. M. : Economic and Operating Suitability of Direct Current for EHV Transmission. Electr. Eng. 82 (1963) pp. 182 to 189.
49. Dorsch, H. : Aussprache zum Fachbericht: Planungsfragen in Drehstrom-Höchstspannungsnetzen. VDE-Fachber. 23 (1964) pp. 138 and 139.
50. Reichmann, J.; Leslie, J. R.: A Summary of Radio Interference Studies Applied to EHV Lines, IEEE Transactions, Power Apparatus and Systems 83 (1964) pp. 223 to 228.
51. Fleischauer, W.; Kalckhoff, G.: Funkstörung durch Corona bei 380 kV Anlagen. Siemens-Z. 32 (1958) pp. 484 to 490.
52. Bartenstein, R.; Hirsch, F.; Schafer, E.: Corona Measurements on A Four-Conductor Bundle for 700 kV Three-Phase Overhead Lines. CIGRE Report No. 426 (1966).
53. Elsner, R.: Der Einfluss der Netzvorgänge auf die Isolationsbemessung von Höchstspannungsübertragungen. Elektrotechn. Z. A 85 (1964) pp. 778 to 790.
54. Arc Connection of Reactors at 500 kV. Electr. Rev. 175 (1964) pp. 856.
55. Nelman, L. R.: Grundsätzliche Gedanken zum Aufbau eines Grossverbundnetzes und die Damit Zusammenhängenden Wissenschaftlichen Aufgaben in Russischer Sicht (German translation). Arch. Energiewirtschaft. 15 (1961) pp. 148 to 162.
56. Booth, E. S.; Clark, D.; Egginton, J. H.; Forrester, J. S.: The 400 kV Grid System for England and Wales. Proc. IEE, Paper No. 3883 S, 109 A (1963) pp. 493 to 519.
57. Brewer, W. M.; Lentz, O. A.: How SCEC EHV Grid Was Planned. Electr. World 161 (1964) pp. 41 to 43.
58. Bonfert, K.: Die Blindleistungsmaschine in der Höchstspannungsübertragung. VDE-Buchr. Bd. 1 (1963) pp. 149 to 170.
59. Jancke, G.: Planung Grosser Höchstspannungsnetze. Elektrotechn. Z. A 80 (1959) pp. 321 to 331.
60. Glavitsch, H.: Stabilität und Betriebsfrequente Spannungserhöhung in Höchstspannungsnetzen 500 bis 700 kV VDE Fachber. 23 (1964) pp. 140 to 148.
61. Hubert, F. J.; Gent, M. R.: Half-Wavelength Power Transmission Lines. IEEE Spectrum 2 (1964) pp. 87 to 92.