

3.00 TL ENERJİ İLETİMİ Ders Notları

Doç. Dr. Aşen BASA ARSOY

Kocaeli Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Elektrik Mühendisliği Bölümü

Bu notlar Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nce verilen 'Enerji İletimi' adlı ders için hazırlanmıştır. Verilen notlarda yazılım hataları kaçınılmazdır. Bu hataların düzeltilmesi ve eksik kısımların tamamlanması derste yapılacaktır.

Aşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013

Amaç

- Elektrik enerji iletim sistemi elemanlarının modellenmesi, Akım-Gerilim bağıntılarının çıkarılması ve sürekli durumda sistem analizi yapmaktır.

Aşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013

İçerik

- Enerji İletim Sistemlerine Genel Bakış
- Elektriksel Temel Kavramlar
- İletim hattı Parametreleri, Hat Empedans ve Admittans Elemanlarının Hesaplanması (Hat direnci endüktansı ve kapasitansı)
- İletim Hatlarının Modellenmesi, Akım-Gerilim Bağıntılarının Çıkarılması, Fazör Diyagramı Çizilmesi, Gerilim Regülasyonu ve Verim İfadelerinin Çıkarılması
 - Kısa Hatlar
 - Orta Uzun Hatlar
 - Uzun Hatlar
 - Kayıpsız Hatlar, Doğal Yükleme Kavramı
- Sürekli Durumda Teorik Max. Güç
- İletim Hatlarında Reaktif Güç Kompansasyonu
- Transformator Modellenmesi, Akım-Gerilim Bağıntılarının Çıkarılması
- Generatör Modellenmesi, Akım- Gerilim Bağıntılarının Çıkarılması
- Enerji İletim Sistemlerinde Akım-Gerilim ve Güç Hesaplamaları
- Per-Unit (Birim Değer) Kavramı ve Önemi

Aşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013

Kaynak Kitaplar

- H. Çakır, "Enerji İletimi", Yıldız Üniversitesi,
- U. Arifoğlu, "Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi",
- İ. Güney, S. Ay, "Çözümlü Enerji İletim Hatları Problemleri", 1994.
- J.D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, "Power Systems Analysis and Design", 2012
- N. Mohan, "A First Course on Power Systems", 2012
- H. Saadat, "Power System Analysis", McGraw Hill, Inc, 1999
- William D. Stevenson, Jr. "Elements of Power System Analysis", 1985.
- S.A. Nasar, "Electric Power Systems", 1990

Aşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013

ELEKTRİK MÜH.
3. SİME
2. DÖNEM
28.02.19

— ENERJİ İLETİMİ —

(AŞEN HOCA

Değerlendirme

- Yarı Yıl İçi Çalışması %50
 - Yıl İçi Sınavı %80
 - Ödev %20
- Yıl Sonu Sınavı %50

Önemli not

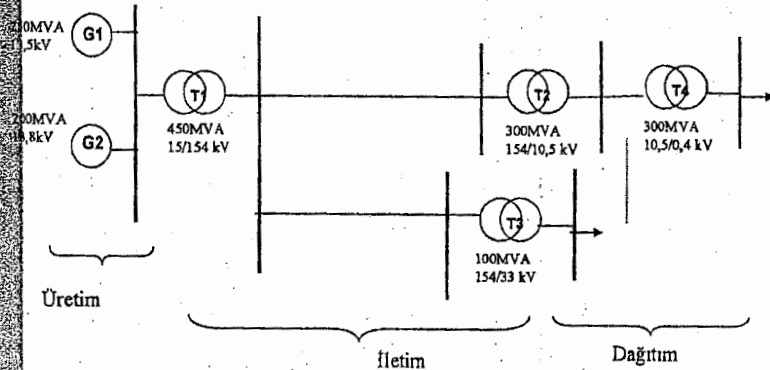
- Bu notlar Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nce verilen 'Enerji İletimi' adlı ders için hazırlanmıştır.
- Verilen notlarda yazılım hataları kaçınılmazdır. Bu hataların düzeltilmesi ve eksik kısımların tamamlanması derste yapılacaktır.

Giriş

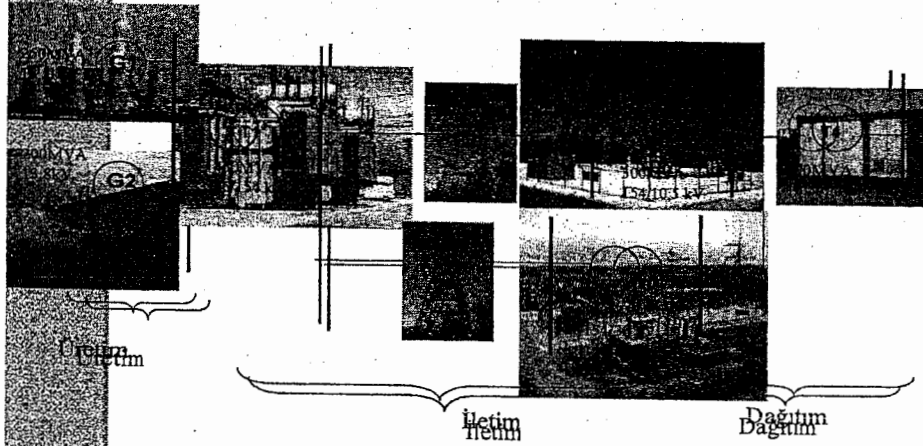
Elektrik enerjisini ilk kullanımı küçük güçlerde aydınlatma amaçlı olmuştur. Gelişen teknoloji ve artan endüstriyel sektörle birlikte elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç artmıştır. Daha yüksek güçlerde elektrik enerjisi üretimi, ancak birincil enerji kaynaklarına (kömür, su gibi) yakın, fakat tüketim merkezlerinden uzak yerlerde mümkün olmuştur. Üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine bağlantı iletim sistemleri ile sağlanmaktadır. Türkiye'de büyük güçlü üretim birimleri doğuda, yoğun enerji kullanımı ise batıda olmuştur. Sonuç olarak; birbirlerinden coğrafi olarak uzakta bulunan üretim birimlerinden tüketim noktalarına elektrik enerjisinin iletimi iletim sistemleri sayesinde sağlanmaktadır.

Elektrik Enerji/Güç Sistemi

Elektrik enerji sistemi ya da güç sistemi üç birimden oluşur. Üretim sistemleri, iletim sistemleri ve dağıtım sistemleri



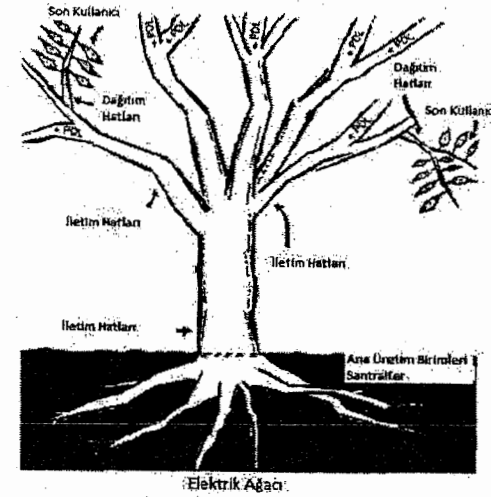
Elektrik Enerji/Güç Sistemi (Görse)l



Ayşen BAŞA ARSOY, Enerji İletimi 2013

9

İletim sistemi bir ağacın gövdesi gibidir.



Ayşen BAŞA ARSOY, Enerji İletimi 2013

10

Türkiye Enerji Üretim Profili

Elektik Enerji Üretimi (milyon kWh)

1970	2000	2003	2010
8,623	128,5	140,6	211,207

Toplam kurulu güç (MW)

2002	2005	2010
31758	38819	49524

Ayşen BAŞA ARSOY, Enerji İletimi 2013

11

2001 – 2010 Yılları Türkiye Elektrik Sistemi Puant Güç ve Enerji Talebi

	PUANT GÜÇ TALEBİ (MW)	ARTIŞ (%)	ENERJİ TALEBİ (GWh)	ARTIŞ (%)
2001	19612	1,1	126871	-1,1
2002	21006	7,1	132553	4,5
2003	21729	3,4	141151	6,5
2004	23485	8,1	150018	6,3
2005	25174	7,2	160794	7,2
2006	27594	9,6	174637	8,6
2007	29249	6,0	190000	8,8
2008	30517	4,3	198085	4,2
2009	29870	-2,1	194079	-2,0
2010	33392	11,8	210434	8,4

Ayşen BAŞA ARSOY, Enerji İletimi 2013

12

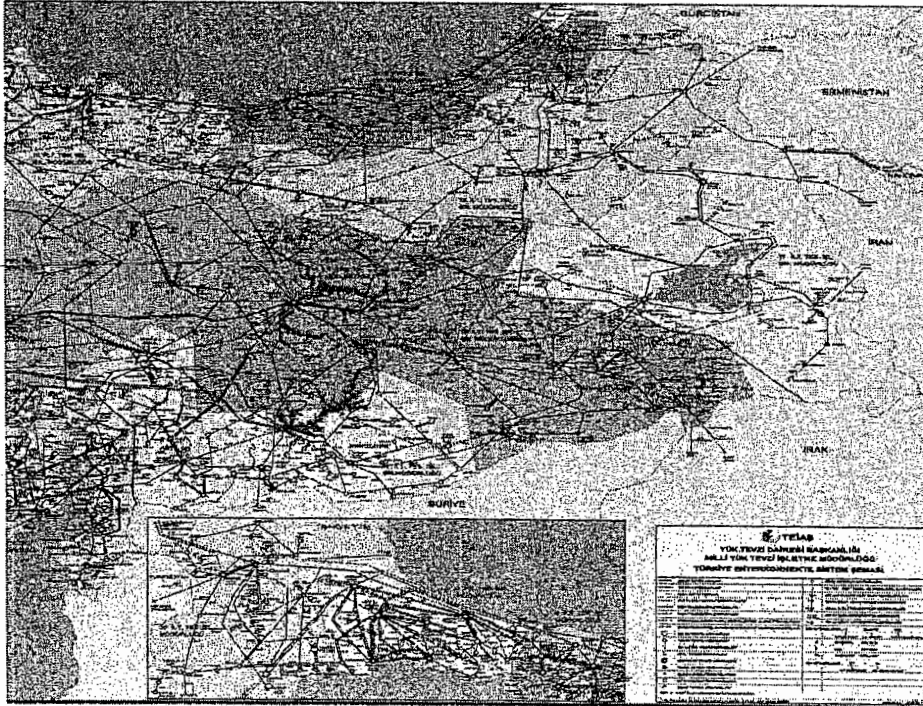
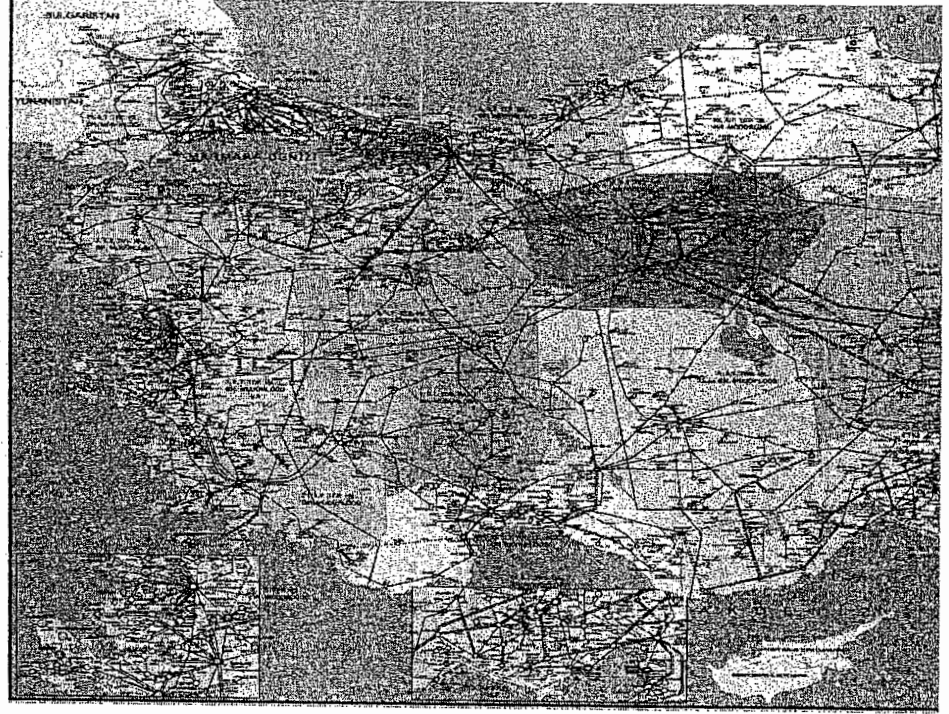
2010 Yılı Kurulu Güç Dağılımı

		KURULU GÜÇ MW	TOPLAM GÜÇ MW	Kuruluşlara Dağılım (%)
EÜAŞ SANTRALLARI	TERMİK	8.690,9	20.368,8	41,1
	HİDROLİK	11.677,9		
EÜAŞ'A BAĞLI ORTAKLIK SANTRALLARI	TERMİK	3.834,0	3.834,0	7,7
İŞLETME HAKKI DEVREDİLEN SANTRALLAR	TERMİK	620,0	650,1	1,3
	HİDROLİK	30,1		
MOBİL SANTRALLAR	TERMİK	262,7	262,7	0,6
YAP İŞLET SANTRALLARI	TERMİK	6.101,8	6.101,8	12,3
YAP İŞLET DEVRET SANTRALLARI	TERMİK	1.449,6	2.439,4	4,9
	HİDROLİK	972,4		
	RÜZGAR	17,4		
SERBEST ÜRETİM ŞİRKET SANTRALLARI	TERMİK	8.721,7	12.724,2	25,7
	HİDROLİK	2.606,7		
	JEOTER	94,2		
	RÜZGAR	1.301,6		
OTOPRODÜKTÖR SANTRALLAR	TERMİK	2.597,7	3.143,1	6,3
	HİDROLİK	544,2		
	RÜZGAR	1,2		
TÜRKİYE TOPLAM KURULU GÜÇ	TERMİK	32.278,5	49.524,1	100,0
	HİDROLİK	15.831,2		
	JEOTER	94,2		
	RÜZGAR	1.326,2		

Kaynalc Kapasite Projeksiyonu 2011-TEİAŞ

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013

13



Türkiye İletim Sistemi

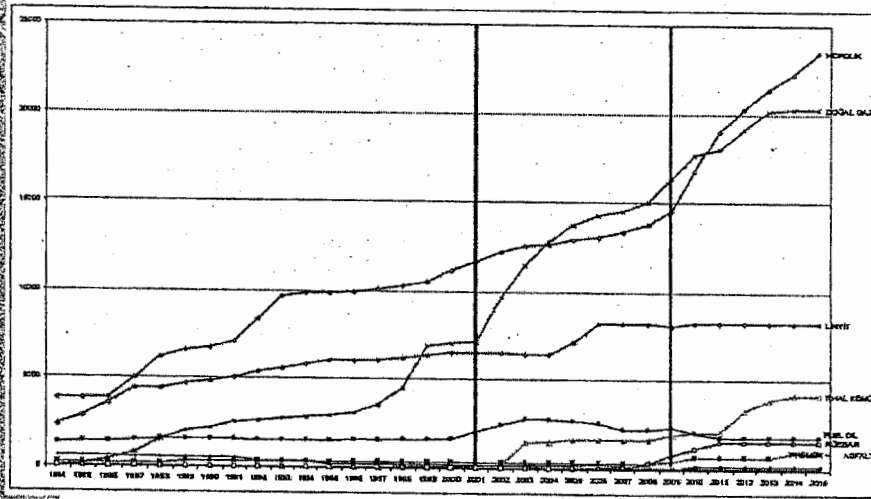
- 77 adet 380 kV, 2 adet 220 kV, 513 adet 154 kV, 14 adet 66 kV gerilim seviyesinde olmak üzere 606 adet trafo merkezi, toplam gücü 99.852 MVA.
- 15.559,2 km 380 kV, 84,5 km 220 kV, 32.607,8 km 154 kV, 508,5 km 66 kV gerilim seviyesinde olmak üzere toplam 48.760,0 km havai hat ve 28,6 km 380 kV, 179,3 km 154 kV, 3,2 km 66 kV yer altı kablo hattı.

Kaynalc TEİAŞ Faaliyet Raporu 2010

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013

16

Türkiye Toplam Kurulu Gücünün Kaynaklara Göre Yıllar İtibariyle Gelişimi



Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013 17

Santral Örnekleri

Santral Adı:	Toplam Kurulu Güç (MW)
Atatürk (Urfa)	2405 (hidrolik)
Karakaya (Diyarbakır)	1800 (hidrolik)
Keban (Elazığ)	1330 (hidrolik)
Afşin (Kahramanmaraş)	1360 (liniyit)
Ambarlı (İstanbul)	1350 (doğalgaz)
Bursa	1432 (doğalgaz)
Balıkesir RES	142 (Rüzgar)
Soma RES	140

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013 18

Gerilim Seviyeleri

Türkiye'de iletim sistemi gerilim değerleri 380, 154 ve 66 kV iken iletim sistemi içindeki dağıtım seviyesi gerilim değerleri 34.5, 33, 31.5, 15.8, 10.5, ve 6,3kV gerilimdir. (Şebeke Yön., 2009)

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013 19

Tablo 10: Türkiye Elektrik İletim Sistemindeki Transformatör Sayısı ve Güçlerinin Primer Gerilimlerine Göre Dağılımı

(2008 Yılı Değerleri)							
380 kV		154 kV		66 kV ve aşağı		TOPLAM	
ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)
174	33220	1010	55584	57	672	1241	89476

(2009 Yılı Değerleri)							
380 kV		154 kV		66 kV ve aşağı		TOPLAM	
ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)
184	35020	1034	58015	54	637	1272	93672

(2010 Yılı Değerleri)							
380 kV		154 kV		66 kV ve aşağı		TOPLAM	
ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)	ADET	GÜÇ (MVA)
197	37870	1067 (2 adetli 220 KV'lık)	61365	53	617	1317	99852

Kaynak: Kapasite Projeksiyonu 2009,2010,2011-TEİAŞ

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013 20

Tablo 11: Türkiye Elektrik İletim Sistemi Enerji Nakil Hat Uzunlukları

(2008 Yılı Değerleri)

380 kV	220 kV	154 kV	66 kV	TOPLAM
14420.2	84.5	31653.9	508.5	46687.1

154 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 162.9 km
380 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 12.8 km

(2009 Yılı Değerleri)

380 kV	220 kV	154 kV	66 kV	TOPLAM
14022.9	84.5	31931.7	508.5	47147.6

154 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 170.9 km
380 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 22.3 km
66 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 3.2 km

(2010 Yılı Değerleri)

380 kV	220 kV	154 kV	66 kV	TOPLAM
16559.2	84.5	32607.8	508.5	49760.0

154 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 179.3 km
380 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 28.6 km
66 kV yer altı güç kablosu uzunluğu 3.2 km

Kaynak: Kapasite Projeksiyonu 2009,2010,2011-TEİAŞ

İlgili Kanun ve Yönetmelikler

www.epdk.gov.tr

- Enerji Piyasa Kanunu
 - Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği
 - Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği
 - Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yön.
 - Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yön.
 - Elektrik Enerjisi Talep Tahminleri Hakkında Yön.
 - Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği
 - Elektrik Piyasası Aydınlatma Yönetmeliği
 - "....."

İletimde neden Yüksek Gerilim?

İletim sistemi gerilimi yüksek gerilimdir. Bunun nedenini şöyle açıklayabiliriz. Hattın empedansı ve üzerinden akan akım dolayısı ile $\Delta V=ZI$ gerilim düşümü ve $\Delta P=RI^2$ güç kaybı vardır. Bu gerilim düşümü ve güç kaybının küçük tutulması istenir. Bunun için ya empedans bileşenlerinden direnci ya da akımı küçültmek gerekir. $R=\rho L/A$ olduğuna göre hattın kesitini büyütürsek direnç değerini küçülebiliriz. Hat kesitini büyütme hem hattı ağırlaştıracağından hem de maliyeti arttıracığından iyi bir yaklaşım olmaz. Bunun için akımı küçültmeliyiz. Akımı azaltırken aynı gücü iletebilmek için $(P=VI)$ gerilimi yükseltmeliyiz. Bu nedenle kayıpları en aza indirgeyerek aynı miktardaki gücü iletebilmek için iletim sistem gerilimleri yüksek tutulur.

Doğru ve Alternatif Akımla İletim

Elektrik enerjisi iletimi doğru ya da alternatif akımda yapılabilir. Doğru akımda iki iletkenli hatla iletim yapılırken alternatif akımda tek ya da üç faz olarak enerji iletilmektedir. Tek fazda bir faz bir de nötr dönüş hattı varken üç fazda aynı genlikte gerilimler arasında 120 derece faz farkı olan üç iletkenle enerji iletilir. Tek faza göre üç fazlı sistemlerde daha fazla güç iletebilmekte ve aynı miktardaki güç daha az iletkenle taşınmakta, bu da daha az kayıplarla güç iletimi sağlamaktadır. Bağlantı şekline göre üç faz ve bir nötr hattı vardır ki bu normal işletme koşullarında sıfır akım taşır ve faz iletkenine göre ince kesitlidir.

Doğru ve Alternatif Akımla İletim

Doğru akım ve Alternatif akımla iletimin karşılaştırılması

- $R_{dc} < R_{ac}$ $\Delta V_{dc} < \Delta V_{ac}$ $\Delta P_{dc} < \Delta P_{ac}$
- DC'de kesitten daha fazla yararlanılır ve kayıplar daha azdır.
- DC'de farklı frekanslı şebekeler birbirine bağlanabilir
- DC'de akım ve güç kontrolü daha kolay yapılmaktadır.
- DC sistemler frekans değişiminden etkilenmezler
- DC'de korona olayı daha azdır
- Evirici ve çeviricilerin reaktif güç gereksinimi duyması, harmoniklere yol açması ve bu nedenle filtre ve kompanzator gereksinimi duyması ana maliyeti artırır.
- 500km altındaki hat uzunluklarında, AC iletimin maliyeti DC iletiminkinden daha düşüktür. Bu nedenle AC iletim tercih edilir.
 - 1951'de 100km ± 100 kV Rusya'da
 - 1970'de 1362km ± 400 kV Pasifik hattı kurulmuştur.
- 100'e yakın yüksek gerilimde doğru akım iletimi yapılmaktadır. Türkiye iletim sisteminde DC iletim yoktur.

Gelecekteki Güç Sistemleri

Yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar, güneş pilleri) ve enerji depolama sistemlerinin kullanılabilirliği arttıkça, küçük güçlü üretim birimleri yaygınlaştıkça elektrik enerjisinin daha küçük gerilim seviyelerinde yerel olarak üretilip tüketilmesi söz konusu olacaktır. Bu dağıtılmış üretim kapsamında değerlendirilmektedir. Bu konuda araştırmalar devam etmektedir.

Fazör

- Alternatif akım güç sistemlerinde, normal işletme koşullarında, akım ve gerilimin dalga şekli genellikle saf sinüzoidal ve frekansı sabit kabul edilir. Bu kabul ile akım ve gerilim büyüklüklerini zamana bağlı ifade etmek yerine fazörlerle gösteririz.
- Elektriksel büyüklüklerden akım ya da gerilim fazörleri, sabit frekansta iki parametre ile temsil edilir;

İşaretin genliği ve faz açısı

Gerilim Fazörü

- Gerilimin ani değeri $v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v)$ ise, fazör hali farklı gösterimlerle aşağıdaki şekildedir.

$$\bar{V} = V \angle \theta_v$$

Kutupsal Gösterim

$$\bar{V} = V e^{j\theta_v}$$

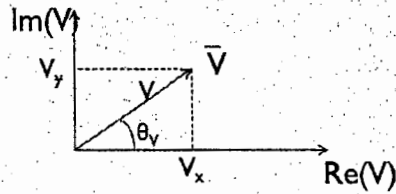
Üstel Gösterim

$$\bar{V} = V(\cos \theta_v + j \sin \theta_v)$$

Kartezyen Gösterim

Burada ,gerilimin ani değerleri $v(t)$, fazörel büyüklükleri \bar{V} , V
Etkin (Efektif, rms) değeri $V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ ve faz açısı θ_v 'dir

Gerilim Fazörü



$$\bar{V} = V \angle \theta_v$$

$$\bar{V} = V e^{j\theta_v}$$

$$\bar{V} = V(\cos\theta_v + j\sin\theta_v)$$

Akım Fazörü

- Aynı şekilde akımın ani değeri $i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$ ise, fazör hali

$$\bar{I} = I \angle \theta_i$$

Kutupsal Gösterim

$$\bar{I} = I e^{j\theta_i}$$

Üstel Gösterim

$$\bar{I} = I(\cos\theta_i + j\sin\theta_i)$$

Kartezyen Gösterim

Burada ,gerilimin ani değerleri $i(t)$, fazörel büyüklükleri \bar{I}, I , Etkin (Efektif, rms) değeri $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ ve faz açısı θ_i 'dir

Empedans (Tek fazlı)



$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \frac{V \angle \theta_v}{I \angle \theta_i} = \frac{V}{I} \angle \theta_v - \theta_i = \frac{V}{I} (\cos(\theta_v - \theta_i) + j\sin(\theta_v - \theta_i))$$

$$\bar{Z} = Z(\cos\theta + j\sin\theta) = R + jX, \quad R = Z \cos\theta, \quad X = Z \sin\theta$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Empedans karmaşık (kompleks) bir büyüklüktür. Reel kısmı direnç (R) değerinden sanal kısmı ise reaktans ($X=2\pi fL$) değerinden oluşur. (Burada f: frekans, L ise elemanı endüktansı)

Güç Kavramı (Tek faz)

Bir yüke $v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v)$ sinüzoidal gerilimi uygulandığında, bu yük üzerinden akacak akım $i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$ olsun. Bu yükün çektiği ani güç, üzerine uygulanan ani gerilim ile ani akımın çarpımına eşittir.

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i)$$

Ani Güç

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_V) \cos(\omega t + \theta_I)$$

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2}(\cos(A-B) + \cos(A+B)) \quad \text{İfadesi yardımı ile}$$

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m [\cos(\theta_V - \theta_I) + \cos(2\omega t + \theta_V + \theta_I)]$$

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \{ \cos(\theta_V - \theta_I) + \cos[2(\omega t + \theta_V) - (\theta_V - \theta_I)] \}$$

$$\cos(A-B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B \quad \text{İfadesi yardımı ile}$$

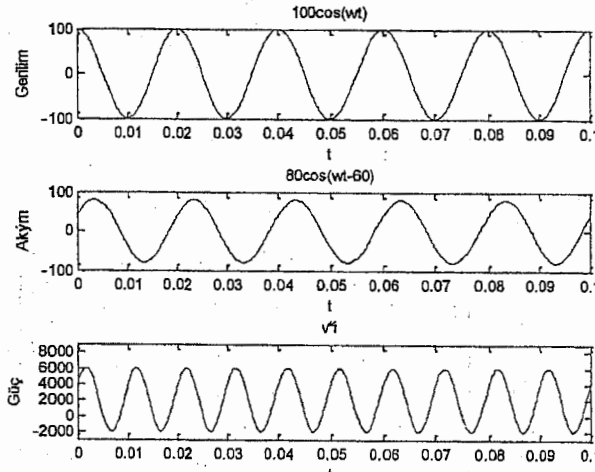
$$p(t) = \frac{1}{2} \frac{V_m}{\sqrt{2V}} \frac{I_m}{\sqrt{2I}} \{ \underbrace{\cos(\theta_V - \theta_I)}_{\theta} + \cos 2(\omega t + \theta_V) \underbrace{\cos(\theta_V - \theta_I)}_{\theta} + \sin 2(\omega t + \theta_V) \underbrace{\sin(\theta_V - \theta_I)}_{\theta} \}$$

$$p(t) = \underbrace{VI \cos \theta [1 + \cos 2(\omega t + \theta_V)]}_{P_R(t)} + \underbrace{VI \sin \theta \sin 2(\omega t + \theta_V)}_{P_X(t)}$$

Akım-Gerilim ve Güç

Şekil'de gerilimi $v(t) = 100 \cos(\omega t)$ ve akımı $i(t) = 80 \cos(\omega t - 60)$ olan bir yükün, gerilim akım ve güç değerlerinin zamana bağlı değişiminin grafikleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere akım ve gerilimin frekansı 50Hz ve periyodu 0.02s iken ani gücün frekansı 100Hz dir. Ayrıca, her bir döngüde gücün negatif olması mümkündür. Bu durum, depolanan enerjinin geri verildiği anlamındadır.

Ani güç değişimi



Güç katsayısı

$$p(t) = \underbrace{VI \cos \theta [1 + \cos 2(\omega t + \theta_V)]}_{P_R(t)} + \underbrace{VI \sin \theta \sin 2(\omega t + \theta_V)}_{P_X(t)}$$

Ani güç, yükün direnç kısmı tarafından harcanan aktif bileşen ile yükün bobin ya da kapasite tarafından harcanan reaktif bileşen olmak üzere iki bileşenden oluşur.

Burada θ gerilim ve akım arasındaki faz açılarının farkıdır. Bu açı pozitifse yani akım gerilimin gerisinde ise yük endüktif özellikte, negatifse yani akım gerilimin ilerisinde ise yük kapasitif özelliktedir denir.

Bu açının kosinüs değeri **güç katsayısı** ya da **güç faktörünü** verir.

Aktif (etkin) ve Reaktif (tepkin) Güç

Ani gücün aktif bileşeninin ortalaması bize **aktif güç** ya da **etkin güç (P)** değerini verirken reaktif bileşeninin genliği de **reaktif güç** ya da **tepkin güç (Q)** değerini verir.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_R(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \{VI \cos \theta [1 + \cos(2\omega t + \theta_V)]\} dt$$

$$P = VI \cos \theta \quad [W, kW, MW]$$

$$Q = \{VI \sin \theta \sin(2\omega t + \theta_V)\}$$

$$Q = VI \sin \theta \quad [VAR, kVAR, MVAR]$$

Karmaşık Güç

Reel kısmı aktif güçten sanal kısmı reaktif güç bileşeninden oluşan güç **karmaşık güç** olarak adlandırılır. Aktif ve reaktif güçler reel sayılarken karmaşık güç karmaşık bir sayıdır.

$$\bar{S} = P + jQ \quad [VA, kVA, MVA]$$

$$\bar{V} = V \angle \theta_V, \quad \bar{I} = I \angle \theta_I$$

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^* = V \angle \theta_V \cdot I \angle -\theta_I =$$

$$VI \angle \theta_V - \theta_I = VI \angle \theta = VI e^{j\theta}$$

$$\bar{S} = VI(\cos \theta + j \sin \theta)$$

$$= \underbrace{VI \cos \theta}_P + j \underbrace{VI \sin \theta}_Q$$

$$\boxed{\bar{S} = P + jQ = \bar{V} \bar{I}^*}$$

Karmaşık ve Görünür Güç

Karmaşık gücü empedans cinsinden de ifade edebiliriz.

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^* = \bar{V} \left(\frac{\bar{V}}{\bar{Z}}\right)^* = \frac{V^2}{\bar{Z}^*}$$

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^* = \bar{Z} \bar{I} \bar{I}^* = \bar{Z} I^2 = (R + jX) I^2$$

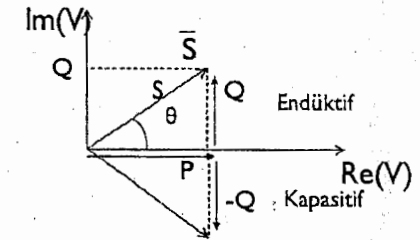
Karmaşık gücün bir genliği bir de açısı olur. Genliğine **görünür güç** adı verilir. Açısı ise gerilim ve akım faz açıları arasındaki fark açısıdır.

Enerji korunumu ilkesine göre güç dengesinden söz edebiliriz. Buna göre; kaynak tarafından sağlanan aktif güç, yük tarafından harcanan aktif güce eşittir (Kayıp ihmal edilirse). Aynı denge reaktif güç için de geçerlidir.

Güç Üçgeni

$$\bar{S} = P + jQ$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



$$P = S \cos \theta,$$

$$Q = S \sin \theta, \quad Q = P \tan \theta$$

$$\cos \theta = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Omik, Endüktif ve Kapasitif Yükler

Saf omik yükler:

- Akım ve gerilim aynı fazda olup, güç katsayısı 1'dir.
- Görünür güç aktif güce eşit, reaktif güç sıfırdır.
- Elektrik enerjisi tamamen ısı enerjisiye dönüşür.

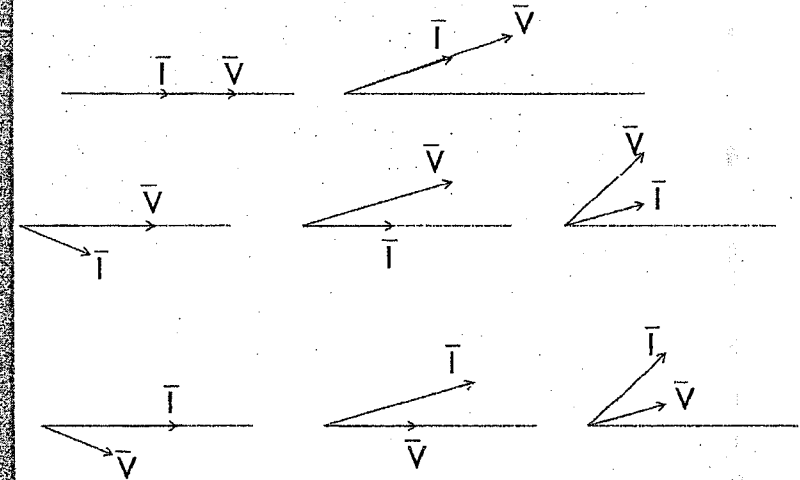
Saf endüktif yükler:

- Akım gerilimin 90 derece gerisinde olup, güç katsayısı 0'dır.
- Aktif güç sıfırdır. Elektriksel enerji başka bir enerji türüne değişmez.
- Ani güç, devre ve kaynak arasında salınım yapar. $p(t)$, pozitif değer aldığı anda enerji endüktif elemanın manyetik alanında depolanır, negatif olduğunda ise depolanan enerji geri verilir.

Saf kapasitif yükler:

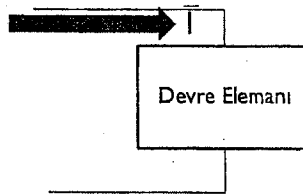
- Akım gerilimin 90 derece ilerisinde olup, güç katsayısı 0'dır.
- Aktif güç sıfırdır. Elektriksel enerji başka bir enerji türüne değişmez.
- Ani güç, devre ve kaynak arasında salınım yapar.

Omik, Endüktif ve Kapasitif Yükler



Aktif Reaktif Güç Akış Yönü

Alternatif akım devre elemanı endüktif ya da kapasitif özellikte yük ya da generatör, ya da bu özellikleri olan bir şebeke olabilir. Akım yönünü bu devre elemanına doğru yönlendirilmiş olarak referans seçelim



- $P > 0$ ise devre elemanı aktif güç çeker, tüketir
- $P < 0$ ise devre elemanı aktif güç sağlar, üretir
- $Q > 0$ ise devre elemanı reaktif güç çeker, tüketir
- $Q < 0$ ise devre elemanı reaktif güç sağlar, üretir.

Büyük güçte endüktif yük çeken endüstriyel tesisler düşük güç katsayısında güç çekmeleri, iletim hatlarının reaktif güç bileşeni ile kapasitesini doldurmasına neden olur. Bunu önlemek için endüstriyel tesisler kendi yüklerine paralel kondansatör bankları tesis ederler. Böylece güç katsayısı 1'e yaklaştırılır. Güç katsayısının ideali 1 olmasına rağmen 0,95- 0,98 arası pratikte uyulması gereken durumdur.

Dengeli Üç Fazlı Sistemler

Elektriğin üretimi, iletimi ve dağıtımı üç fazlı alternatif akım sistemleri üzerinden yapılır. Üretim merkezinde, aralarında 120 derece faz farkı bulunan aynı genlikte üç sinüzoidal gerilim üretilir. Böyle bir kaynak **dengeli kaynak** olarak adlandırılır. Üç fazı bu derste A fazı, B fazı, ve C fazı olarak kullanacağız. Bazı durumlarda R,S,T ya da L1,L2,L3 olarak ta kullanılabilir

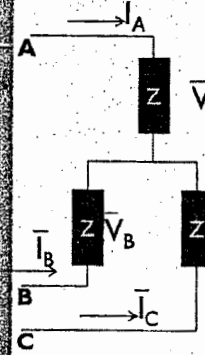
Üç fazlı bir yükün dengede olması ise her üç fazdaki empedansların birbirine eşit olması ve uçlarına dengeli bir gerilim uygulandığında birbirine eşit akımların fazlar üzerinden geçmesi anlamındadır.

Dengeli Üç Fazlı Sistemler

Bir güç sistemi yıldız bağlı generatör, ve yıldız ya da üçgen bağlı yüklerden oluşur. Generatörler nadiren üçgen bağlıdır. Bunun nedeni ise dengesiz bir durum söz konusu olduğunda, oluşan artık gerilimden üçgen boyunca akan bir akıma neden olacaktır. Ayrıca yıldız bağlı durumda daha düşük faz gerilimine maruz kalınır. Bu da yalıtım açısından önemlidir.

Dengeli kaynak gerilimleri ABC faz sırası saatin dönme yönü korunduğunda pozitif dizi gerilimleri olarak adlandırılır

Dengeli Üç Fazlı Yıldız Bağlı Yük



$$\bar{V}_A = V | 0^\circ$$

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{V}_A}{Z} = I | -\theta$$

$$\bar{V}_B = V | -120^\circ$$

$$\bar{I}_B = \frac{\bar{V}_B}{Z} = I | -120^\circ - \theta$$

$$\bar{V}_C = V | 120^\circ$$

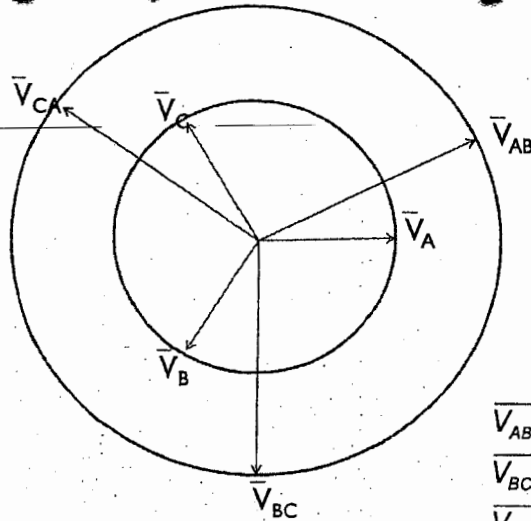
$$\bar{I}_C = \frac{\bar{V}_C}{Z} = I | 120^\circ - \theta$$

$$\bar{V}_{AB} = \bar{V}_A - \bar{V}_B = V | 0^\circ - V | -120^\circ = \sqrt{3}V | 30^\circ = \sqrt{3}\bar{V}_A | 30^\circ$$

$$\bar{V}_{BC} = \bar{V}_B - \bar{V}_C = V | -120^\circ - V | 120^\circ = \sqrt{3}V | -90^\circ = \sqrt{3}\bar{V}_B | 30^\circ$$

$$\bar{V}_{CA} = \bar{V}_C - \bar{V}_A = V | 120^\circ - V | 0^\circ = \sqrt{3}V | 150^\circ = \sqrt{3}\bar{V}_C | 30^\circ$$

Dengeli Üç Fazlı Yıldız Bağlı Yük



$$\bar{V}_{AB} = \sqrt{3}\bar{V}_A | 30^\circ$$

$$\bar{V}_{BC} = \sqrt{3}\bar{V}_B | 30^\circ$$

$$\bar{V}_{CA} = \sqrt{3}\bar{V}_C | 30^\circ$$

Dengeli Üç Fazlı Yıldız Bağlı Yük

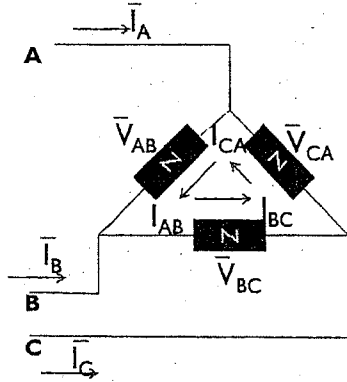
$$\bar{V}_{AB} = \sqrt{3}\bar{V}_A | 30^\circ$$

$$\bar{V}_{BC} = \sqrt{3}\bar{V}_B | 30^\circ$$

$$\bar{V}_{CA} = \sqrt{3}\bar{V}_C | 30^\circ$$

SONUÇ: Dengeli pozitif dizi gerilimi uygulanan üç fazlı yıldız bağlı bir sistemde fazlararası gerilimlerin genlikleri faz-nötr gerilim genliklerinin $\sqrt{3}$ katı, açıları da 30 derece ileridedir. Faz akımları, hat akımları ile aynı genlik ve faz açısına sahiptir.

Dengeli Üç Fazlı Üçgen Bağlı Yük



$$\bar{I}_{AB} = \frac{\bar{V}_{AB}}{Z} = I \angle 0^\circ$$

$$\bar{I}_{BC} = \frac{\bar{V}_{BC}}{Z} = I \angle -120^\circ$$

$$\bar{I}_{CA} = \frac{\bar{V}_{CA}}{Z} = I \angle 120^\circ$$

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA} = I \angle 0^\circ - I \angle 120^\circ = \sqrt{3}I \angle -30^\circ = \sqrt{3}I_{AB} \angle -30^\circ$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} = I \angle -120^\circ - I \angle 0^\circ = \sqrt{3}I \angle -150^\circ = \sqrt{3}I_{BC} \angle -30^\circ$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} = I \angle 120^\circ - I \angle -120^\circ = \sqrt{3}I \angle 90^\circ = \sqrt{3}I_{CA} \angle -30^\circ$$

Dengeli Üç Fazlı Üçgen Bağlı Yük

$$\bar{I}_A = \sqrt{3}I_{AB} \angle -30^\circ$$

$$\bar{I}_B = \sqrt{3}I_{BC} \angle -30^\circ$$

$$\bar{I}_C = \sqrt{3}I_{CA} \angle -30^\circ$$

SONUÇ: Dengeli pozitif dizi akımına sahip üç fazlı üçgen bağlı bir sistemde hat akımlarının genlikleri faz akımı genliklerinin $\sqrt{3}$ katı, açıları da 30 derece geridedir. Faz gerilimleri, fazlar arası gerilimlerle aynı genlik ve faz açısına sahiptir.

Dengeli Sistem

$$V_A = V_B = V_C, \quad V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = U$$

$$I_A = I_B = I_C = I, \quad I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$$

$$\bar{V}_A + \bar{V}_B + \bar{V}_C = 0 \quad \text{Fazlar arası gerilim}$$

$$\text{Hat akımı} \quad \bar{V}_{AB} + \bar{V}_{BC} + \bar{V}_{CA} = 0$$

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0$$

$$\bar{I}_{AB} + \bar{I}_{BC} + \bar{I}_{CA} = 0$$

Dengeli Üç Fazlı Sistemlerde Güç

Dengeli üç fazlı gerilim kaynağının yine dengeli yıldız ya da üçgen bağlı bir yükü beslediğini düşünelim. Faz gerilim ve akımlarını ani değerlerini yazalım.

$$v_A(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_V), \quad i_A(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_I)$$

$$v_B(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_V - 120^\circ), \quad i_B(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_I - 120^\circ)$$

$$v_C(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_V + 120^\circ), \quad i_C(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_I + 120^\circ)$$

$$p_{3\phi}(t) = v_A(t)i_A(t) + v_B(t)i_B(t) + v_C(t)i_C(t)$$

$$p_{3\phi}(t) = 3VI \cos(\theta_V - \theta_I)$$

$$= 3VI \cos \theta$$

Dengeli Yıldız Bağlı bir Yükün Gücü

$$\begin{aligned}\underline{V}_A &= V \angle \theta_V^\circ & \underline{I}_A &= I \angle \theta_I \\ \underline{V}_B &= V \angle \theta_V - 120^\circ & \underline{I}_B &= I \angle \theta_I - 120^\circ \\ \underline{V}_C &= V \angle \theta_V + 120^\circ & \underline{I}_C &= I \angle \theta_I + 120^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{S} &= \underline{V}_A \underline{I}_A^* + \underline{V}_B \underline{I}_B^* + \underline{V}_C \underline{I}_C^* \\ \bar{S} &= VI \angle \theta_V - \theta_I + VI \angle (\theta_V - 120) - (\theta_I - 120) + VI \angle (\theta_V + 120) - (\theta_I + 120)\end{aligned}$$

$$\bar{S} = 3VI \angle \theta_V - \theta_I = 3V \angle \theta_V \angle -\theta_I = \overline{3V_A I_A^*}$$

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}} \Rightarrow \bar{S} = \sqrt{3}UI \angle \theta_V - \theta_I$$

$$P = \sqrt{3}UI \cos \theta, \quad Q = \sqrt{3}UI \sin \theta, \quad S = \sqrt{3}UI = 3VI$$

Dengeli Üçgen Bağlı bir Yükün Gücü

$$\begin{aligned}\underline{V}_{AB} &= U \angle \theta_V^\circ & \underline{I}_{AB} &= I_{AB} \angle \theta_I \\ \underline{V}_{BC} &= U \angle \theta_V - 120^\circ & \underline{I}_{BC} &= I_{AB} \angle \theta_I - 120^\circ \\ \underline{V}_{CA} &= U \angle \theta_V + 120^\circ & \underline{I}_{CA} &= I_{AB} \angle \theta_I + 120^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{S} &= \underline{V}_{AB} \underline{I}_{AB}^* + \underline{V}_{BC} \underline{I}_{BC}^* + \underline{V}_{CA} \underline{I}_{CA}^* \\ \bar{S} &= UI_{AB} \angle \theta_V - \theta_I + UI_{AB} \angle (\theta_V - 120) - (\theta_I - 120) + UI_{AB} \angle (\theta_V + 120) - (\theta_I + 120)\end{aligned}$$

$$\bar{S} = 3UI_{AB} \angle \theta_V - \theta_I$$

$$I = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \Rightarrow \bar{S} = \sqrt{3}UI \angle \theta_V - \theta_I$$

$$P = \sqrt{3}UI \cos \theta, \quad Q = \sqrt{3}UI \sin \theta, \quad S = \sqrt{3}UI = 3VI$$

Dengeli Bir Devrenin Gücü

- Üç fazlı devremiz ister yıldız ister üçgen bağlı olsun,

$$\text{Üç faz görünür güç} \quad S = \sqrt{3}UI = 3VI$$

$$\text{Üç faz aktif güç} \quad P = \sqrt{3}UI \cos \theta$$

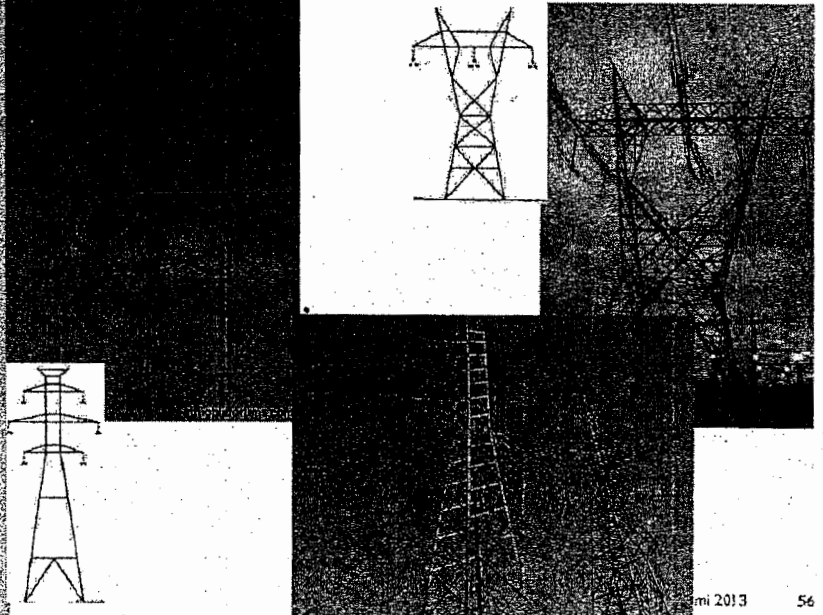
$$\text{Üç faz reaktif güç} \quad Q = \sqrt{3}UI \sin \theta$$

$$\text{Üç faz karmaşık güç} \quad \bar{S} = \sqrt{3}UI \angle \theta = 3VI \angle \theta = 3VI \angle \theta_V - \theta_I$$

U: Fazlararası gerilim, V: faz-nötr gerilim

I : Hat akımı

İletim Hatları

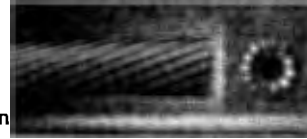


İletim Hattında Kullanılan İletkenler

Hava hattı iletkenleri örgülü yapıdadır. Örgülü iletkenlerde teller ortak eksen dolayında bir veya birkaç katman oluşturacak biçimde sarmal olarak sarılır.

Örgülü iletkenlerde çapları eşit olan ortada bir tel ve bu telin çevresindeki katmanların her birinde bir önceki katmandan 6 fazla olmak üzere teller bulunur.

- 1 telli iletken
- 1+6 = 7 telli iletken: 1 katmanlı iletken
- 1+6+12= 19 telli iletken: 2 katmanlı iletken
- 1+6+12+18= 37 telli iletken: 3 katmanlı iletken



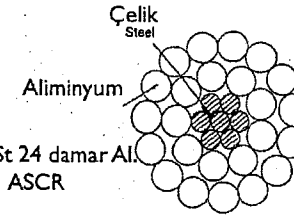
Çelik özlü Alüminyum iletkenlerde ortasında 1, 7, 19 telli çelik, çevresindeki her bir katmanda bir önceki katmandan 6 fazla olmak üzere Alüminyum teller bulunur.

- 18 Al/7St : 1+6=7St / 6+12= 18Al
- 26Al/7St : 1+6=7St / 10+16= 26Al
- 42Al/7St : 1+6=7St / 8+14+20 =42Al
- 54Al/19St : 1+6+12=19St / 12+18+24=54Al



İletim Hattında Kullanılan İletkenler

İletim hatlarında kullanılan iletkenler çelik özlü alüminyum 'dur



7 damar St 24 damar Al
7St/24Al ASCR

Çelik sayesinde mukavemeti yüksek, Alüminyum ile de hafif ve elektriksel geçirgenliği yüksek bir iletkenidir.

Çelik Alüminyum iletkenlerin isimlendirilmesi Amerikan tel ölçüleri ya da CM (Circular Mil) olarak belirtilir. ICM çapı 0.001 inch olan daire kesitidir.

$$1CM = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0,001 \times 25,4)^2}{4} = 5067 \times 10^{-7} mm^2$$

Türkiye'de 154kV'luk hatlarda, 477MCM, 795MCM, 226,8MCM iletkenler 380kV'luk hatlarda 954MCM tipi iletkenler kullanılmaktadır. Dağıtım hatlarında 3AWG, 1/0, 3/0 tipi iletkenler kullanılmaktadır.

İletim Hattında Kullanılan İletkenler

ÇELİK ÖZLÜ ALÜMİNYUM İLETKENLER (Yapı, mekanik ve elektrik özellikleri)

Yaratıcı Standartlar Anlık Adı	TS- Anlık Adı AUC	Kesit			İki Katman ve Sanjir		Etkelenebilir Kesit Kvadr. mm	Anlık Çapı		Anlık Kuvvet Yıldırımlık	20°C'de Dinamik Çökme	Anlık Etkin Ağırlık			Standard Arızalar (Bir mekanik birim)			Aynı Teyaz			
		AWG Viyer çil. mil	Al mm ²	Çelik mm ²	Toplam Kesit mm ²	Alüminyum mm ²		Çelik mm ²	Çelik mm			Alüminyum mm	Alüminyum kg/m	Çelik kg/m	Toplam kg/m	Yüksek Ağırlık kg	Mekanik Tipe		Yüksek Tipe	A.M.F. %	
SHALLOW SPANION	34/6	2	33,59	8,0	39,19	6	2,87	1	2,87	21,09	2,87	8,81	1296	0,8540	24,1	43,8	3,1600	855	TA	140	100
ROBACONE	45/7	88.220	44,70	7,85	52,15	6	3,06	1	3,06	26,11	3,06	8,24	1650	0,9410	24,1	56,1	1,760	575	TA	175	200
PRVEN	54/8	110	59,52	8,82	62,44	6	3,37	1	3,37	33,73	3,37	10,11	1860	0,9382	140,5	88,4	2,120	650	TA	195	230
PEEDI	65/14	30	85,13	14,18	99,30	8	4,25	1	4,25	53,92	4,25	12,75	2985	0,9380	233,5	110,4	3,410	550	TA	275	330
PARTROGE	135/22	266.800	134,87	21,90	156,80	20	2,57	7	2,00	36,17	3,00	16,20	5115	0,9140	372,2	171,8	5,410	880	D	345	450
OSTROCH	158/26	320.000	152,19	24,71	176,90	26	2,73	7	2,12	49,5	4,36	17,28	3755	0,9197	389,1	182,8	5,1800	980	EH	410	480
HAWK	242/39	477.000	241,85	39,19	280,94	26	3,44	7	2,82	152,0	6,01	21,77	3792	0,9194	388,3	306,1	6,920	1550	GH	540	670
UPPER CONDOR	703/65	795.000	402,58	65,44	468,00	26	4,49	7	3,35	253,3	10,36	26,71	14222	0,9218	1110,6	411,9	12,610	2800	FC	780	900
RAL	402/52	795.000	402,33	59,15	464,48	34	3,68	7	3,08	253,4	9,24	27,72	13023	0,9218	1112,9	407,1	15,912	1,1800	GH	780	900
CARDINAL	483/34	864.000	483,8	33,5	517,30	45	3,70	7	2,47	300,0	7,40	20,50	11684	0,9266	1230,0	322,2	12,000	2680	GH	880	1010
PHASANT	645/82	1.272.000	645,08	61,71	706,79	54	3,90	3,9	3,24	405,7	11,70	25,10	19787	0,9440	1703,4	638,7	14,815	3,1600	GR	1000	1100

İletim Hattında Kullanılan İletkenler

Electrical characteristics of bare aluminum conductors steel-reinforced (ASCR)†

Code word	Aluminum area, cm ²	Strand size Al/5	Layers of aluminum	Outside diameter, in.	Resistance			Capacitance per conductor 1-ft spacing, 60 Hz		
					Dc, 20°C, Ω/1,000 ft	20°C, Ω/mil	20°C, Ω/mil	CMR D _p , ft	Inductance X _L , Ω/mil	Capacitance X _C , pF/mil
Warwie	206,800	18/1	1	0,690	0,0645	0,8483	0,3831	0,0108	0,476	0,1000
Paritides	266,200	20/7	2	0,642	0,0640	0,3452	0,3792	0,0217	0,408	0,1074
Orteloh	326,000	20/7	2	0,690	0,0362	0,3020	0,3172	0,0290	0,458	0,1037
Mar-De	336,400	18/1	2	0,584	0,0312	0,2791	0,2027	0,0228	0,452	0,1035
Linnat	336,400	28/7	2	0,721	0,0507	0,2737	0,2005	0,0242	0,481	0,1040
Orteloh	336,400	30/7	2	0,741	0,0504	0,2719	0,2087	0,0235	0,449	0,1022
Chaladaw	336,400	18/1	2	0,745	0,0458	0,2542	0,2372	0,0241	0,482	0,1001
Orteloh	397,800	20/7	2	0,780	0,0430	0,2322	0,2181	0,0266	0,441	0,1015
Felican	477,000	14/1	2	0,814	0,0381	0,1937	0,2148	0,0264	0,441	0,1022
Wilder	477,000	24/7	2	0,848	0,0339	0,1843	0,2134	0,0284	0,482	0,1000
Hawk	477,000	30/7	2	0,848	0,0339	0,1843	0,2134	0,0284	0,482	0,1000
Hawk	477,000	30/7	2	0,882	0,0325	0,1919	0,2107	0,0304	0,424	0,0980
Orprey	554,200	18/1	2	0,875	0,0309	0,1878	0,2092	0,0284	0,432	0,0981
Paritides	554,200	24/7	2	0,875	0,0309	0,1878	0,2092	0,0284	0,432	0,0981
Dove	636,000	20/7	2	0,914	0,0287	0,1652	0,1822	0,0300	0,433	0,0969
Book	636,000	24/7	2	0,927	0,0280	0,1661	0,1826	0,0314	0,420	0,0945
Grubbeak	636,000	30/7	2	0,990	0,0268	0,1481	0,1590	0,0329	0,412	0,0948
Drake	781,000	26/7	2	1,126	0,0219	0,1179	0,1284	0,0273	0,399	0,0918
Ten	781,000	45/7	2	1,003	0,0217	0,1182	0,1282	0,0282	0,406	0,0922
Rail	854,000	45/7	2	1,165	0,0181	0,0997	0,1092	0,0386	0,385	0,0897
Condor	854,000	34/7	2	1,198	0,0180	0,0985	0,1092	0,0402	0,380	0,0890
Orteloh	1.052,000	45/7	3	1,213	0,0167	0,0924	0,1011	0,0402	0,360	0,0885
Shelley	1.115,000	45/7	3	1,229	0,0165	0,0911	0,0941	0,0415	0,386	0,0874
Finch	1.178,000	54/10	3	1,205	0,0143	0,0850	0,0937	0,0430	0,380	0,0866
Wisp	1.272,000	45/7	3	1,243	0,0136	0,0802	0,0825	0,0446	0,378	0,0857
Phasant	1.272,000	54/10	3	1,282	0,0123	0,0781	0,0824	0,0458	0,371	0,0837
Bobolink	1.421,000	45/7	3	1,427	0,0122	0,0804	0,0746	0,0470	0,371	0,0837
Flower	1.421,000	54/10	3	1,463	0,0120	0,0792	0,0735	0,0484	0,365	0,0829
Leopold	1.450,000	45/7	3	1,463	0,0119	0,0802	0,0748	0,0484	0,364	0,0829
Falcon	1.500,000	54/10	3	1,541	0,0106	0,0762	0,0707	0,0503	0,358	0,0814
Bluebird	2.136,000	84/19	4	1,702	0,0080	0,0470	0,0511	0,0286	0,346	0,0778

†Nickel used multilayer sizes.

†Data, by permission, from Aluminum Association, Aluminum Electrical Conductor Handbook, 2nd ed., Washington, D.C., 1982.

İletken Doğru Akım Direnci

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A}$$

ρ : İletkenin öz direnci [$\Omega \cdot m$] $20C^\circ$ 'de $\rho_{Cu} = 1,77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
 l : İletkenin uzunluğu [m] $20C^\circ$ 'de $\rho_{Al} = 2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
 A : İletkenin kesit alanı [m^2]

İletken direnci iletkenin spiral yapısından ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Spiralleşmeden dolayı %1-2 uzunluk artışı, dolayısı ile direnç artışı gözlenir.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

R_2 : t_2 sıcaklığındaki direnç
 R_1 : t_1 sıcaklığındaki direnç
 T : Sıcaklık Sabiti, Aliminyum için $228 C^\circ$

İletken Alternatif Akım Direnci

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A}$$

ρ : İletkenin öz direnci [$\Omega \cdot m$] $20C^\circ$ 'de $\rho_{Cu} = 1,77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
 l : İletkenin uzunluğu [m] $20C^\circ$ 'de $\rho_{Al} = 2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
 A : İletkenin kesit alanı [m^2]

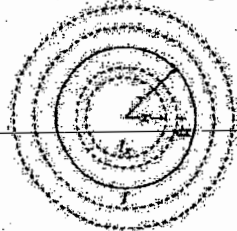
Alternatif akımda frekansın artması ile iletken üzerindeki akım dağılımı düzgün olmaz. Bu etkiye deri etkisi (skin effect) denir. Deri etkisi ek kayıplara neden olur ki bu kayıp sıcaklıkla değişmeyen bir dirence karşı gelir. Kesit büyük olduğunda deri etkisi dikkate alınması gerekir. Bu durumda alternatif akım direnç değeri Arnold formülü ile hesaplanır.

$$R_{ac} = R_0 \left[\frac{\left\{ \left(1 + \frac{X_R^4}{48} \right)^{1/2} + 1 \right\}}{2} \right], [\Omega / cm] \quad X_R = \sqrt{\frac{4\omega}{R_0 10^9}} < 3$$

$$R_{ac} = R_0 \left[\left(\frac{X_R}{2\sqrt{2}} + 0,26 \right) \right], [\Omega / cm] \quad X_R = \sqrt{\frac{4\omega}{R_0 10^9}} > 3$$

R_0 : Sıcaklık ve spiralleşme etkisi dahil doğru akım direnci [Ω / cm]

İç ve Dış Endüktans



$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [H/m]$$

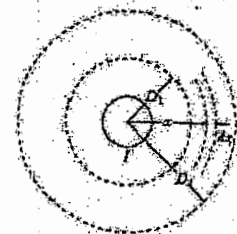
$$\int_0^{2\pi r} H_x dl = I_x \rightarrow H_x = \frac{I_x}{2\pi r}$$

$$H_x = \frac{I}{2\pi r} \times \left(\frac{l}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi r^2} \right)$$

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \times \left(B_x = \mu_0 H_x \right)$$

$$L_l = \frac{\lambda}{I} = \frac{\mu_0 I}{I} = \frac{\mu_0}{I}$$

$$L_l = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} [H/m]$$



$$H_x = \frac{I}{2\pi x}$$

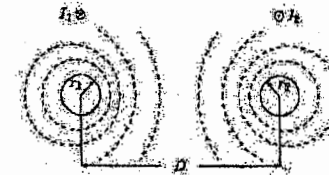
$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (B_x = \mu_0 H_x)$$

$$L_l = \frac{\lambda}{I}$$

$$\lambda = \int_a^b B_x dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_a^b \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \left(\frac{D_2}{D_1} \right)$$

$$L_d = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1} [H/m]$$

Tek Faz İletim Hatlarında Endüktans



I. İletkenin endüktansı

$r_1 = r_2 = r$ ise, genel olarak

$$L = L_l + L_d = \frac{1}{2} \times 10^{-7} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r_1} \right) = 2 \times 10^{-7} \left(\ln e^{1/4} + \ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{D}{1} \right)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r_1 e^{1/4}} + \ln \frac{D}{1} \right) = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1 e^{1/4}}$$

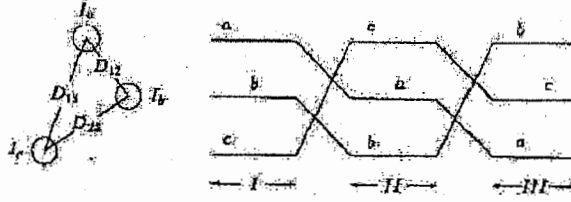
$$L = 0,2 \ln \frac{D}{r_1} [mH/km]$$

$$L = 0,2 \ln \frac{D}{D_s} [mH/km]$$

$$D_s = r' = r e^{-1/4} \text{ Saymal yarıçap}$$

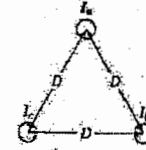
Üç fazlı İletim Hatlarında Çaprazlama

- Direk üzerinde hatlar arası uzaklık birbirlerine eşit değilse hat empedansları buna bağlı olarak ta faz akımları eşit olmayacaktır. Dengeli bir çalışma için hatlar çaprazlanır. Hatların çaprazlanmasında I hat uzunluğu faz sayısı olan üç bölüme ayrılır. Her bir faz iletkenine her bölümde bir kez hat boyunca iki kez yer değiştirir



Üç faz iletim hatlarında Endüktans

Simetrik Düzen

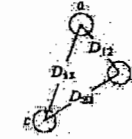


$$L = 0,2 \ln \frac{D}{D_s} [mH/km]$$

$$D_s = r e^{\frac{1}{4}} \text{ Tek damarlı iletkenlerde}$$

$$D_s = GMR \text{ Çok damarlı iletkenlerde}$$

Asimetrik Düzen



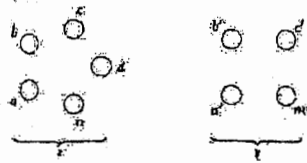
Çaprazlama yapılmış bir hatta

$$L = 0,2 \ln \frac{GMD}{D_s} [mH/km]$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}}$$

Üç faz iletim hatlarında Endüktans

Çok damarlı iletkenlerde



$$L = 0,2 \times \ln \frac{GMD}{GMR_x} [mH/km]$$

Geometrik ortalama uzaklık: GMD

$$GMD = \sqrt[m]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{am}) \dots (D_{na} D_{nb} \dots D_{nm})}$$

Geometrik ortalama yarıçap: GMR

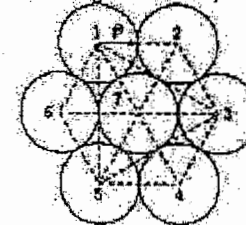
$$GMR_x = r \sqrt[m]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{am}) \dots (D_{na} D_{nb} \dots D_{nn})}$$

$$D_{aa} = D_{bb} = \dots = D_{nn} = r_x' = r e^{\frac{1}{4}}$$

St/Al iletkenlerde GMR

Damar Sayısı ve Kat adedi	Geometrik Ortalama Yarıçap (GMR)
Tek katlı iletkenler	0,35-0,70r
İki katlı ve 26 damarlı iletkenler	0,809r
İki katlı ve 30 damarlı iletkenler	0,826r
İki katlı ve 54 damarlı iletkenler	0,810r

7 telli örgülü iletken için GMR

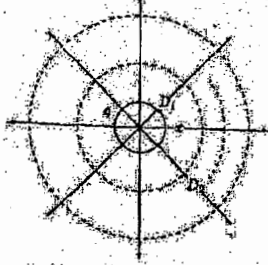


$$GMR_x = r \sqrt[7]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{an}) \dots (D_{na} D_{nb} \dots D_{nn})}$$

$$GMR_x = \sqrt[7]{[(e^{-1/4} \rho)(2\rho)(2\sqrt{3}\rho)(4\rho)(2\sqrt{3}\rho)(2\rho)(2\rho)]^6 [e^{-1/4} \rho(2\rho)]^6}$$

$$GMR_x = 2,1767\rho = 0,7256r \quad (r = 3\rho)$$

İletim hatlarında Kapasitans



- İletim hattının kapasitesi, iletkenler arası potansiyel farktan dolayı oluşur. Bu kapasite iletken cinsine, iletkenler arası mesafeye ve topraktan olan yüksekliğe bağlıdır.

1 Coulomb'luk yükün D1'den D2'ye olan hareketi ile yaptığı iş, D1-D2 arası potansiyel farkı verir.

$$V_{D1,D2} = \int_{D1}^{D2} E dx = \int_{D1}^{D2} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D1}{D2}\right)$$

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D1}{D2}\right)} = \frac{2\pi(8,85 \times 10^{-9} \text{ F/km})}{\ln\left(\frac{D1}{D2}\right)} = \frac{0,0556}{\ln\left(\frac{D1}{D2}\right)} [\mu\text{F/km}]$$

Tek Faz İletim Hatlarında Kapasitans

$$V_{12(q1)} = \frac{q1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad V_{21(q2)} = \frac{q2}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D}{r}\right) = -V_{12(q2)}$$

$$V_{12} = V_{12(q1)} + V_{12(q2)}$$

$$V_{12} = \frac{q1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D}{r}\right) + \frac{q2}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r}{D}\right)$$

$$q2 = -q1 = -q$$

$$V_{12} = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D}{r}\right)$$

$$C_{12} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)}$$



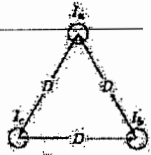
$$C = 2C_{12}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)}$$

$$C = \frac{0,0556}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} [\mu\text{F/km}]$$

Üç faz iletim hatlarında Kapasitans

Simetrik Düzen



$$C = \frac{0,0556}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} [\mu\text{F/km}]$$

Asimetrik Düzen

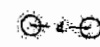


Çaprazlama yapılmış bir hatta

$$C = \frac{0,0556}{\ln\left(\frac{GMD}{r}\right)} [\mu\text{F/km}]$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}$$

Üç faz Demet yapılı iletim hatlarında Endüktans ve Kapasitans



$$GMR^b = \sqrt{GMRxd}$$

$$r^b = \sqrt{rd}$$



$$GMR^b = \sqrt[3]{GMRxd^2}$$

$$r^b = \sqrt[3]{rd^2}$$



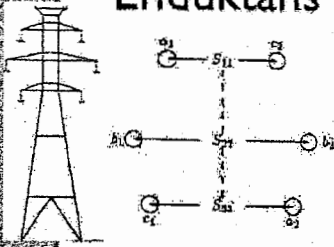
$$GMR^b = 1,094 \sqrt[4]{GMRxd^3}$$

$$r^b = 1,094 \sqrt[4]{rd^3}$$

$$L = 0,2 \times \ln\left(\frac{GMD}{GMR^b}\right) [\text{mH/km}]$$

$$C = \frac{0,0556}{\ln\left(\frac{D}{r^b}\right)} [\mu\text{F/km}]$$

Çift devre üç faz iletim hatlarında Endüktans ve Kapasitans



$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{a1b1}D_{a1b2}D_{a2b1}D_{a2b2}}$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{b1c1}D_{b1c2}D_{b2c1}D_{b2c2}}$$

$$D_{AC} = \sqrt[4]{D_{a1c1}D_{a1c2}D_{a2c1}D_{a2c2}}$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}}$$

$$GMR_A = \sqrt{GMR^b D_{a1,a2}}$$

$$GMR_B = \sqrt{GMR^b D_{b1,b2}}$$

$$GMR_C = \sqrt{GMR^b D_{c1,c2}}$$

$$GMR_L = \sqrt[3]{GMR_A GMR_B GMR_C}$$

$$r_A = \sqrt{r^b D_{a1,a2}}$$

$$r_B = \sqrt{r^b D_{b1,b2}}$$

$$r_C = \sqrt{r^b D_{c1,c2}}$$

$$GMR_K = \sqrt[3]{r_A r_B r_C}$$

$$L = 0,2 \times \ln \frac{GMD}{GMR_L} \text{ [mH / km]}$$

$$C = \frac{0,0556}{\ln \frac{GMD}{GMR_K}} \text{ [mF / km]}$$

İletim Hattı Parametreleri

İletim hattı parametreleri, hat iletkenin malzemesine (iletken öz direnci, yarıçapı, kesit), örgü şekline, hatların direk üzerindeki dizilişlerine; ortam sıcaklığına ve toprağa olan mesafelerine bağlıdır.

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A}, \quad \frac{R_{dc1}}{R_{dc2}} = \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

$$R_{ac} = R_{dc} \left[\frac{\left(1 + \frac{X_R^4}{48}\right)^{1/2} + 1}{2} \right], \text{ [}\Omega/\text{cm]} \quad X_R = \sqrt{\frac{4\omega}{R_{dc} 10^9}} < 3$$

$$R_{ac} = R_{dc} \left[\frac{X_R}{2\sqrt{2}} + 0,26 \right], \text{ [}\Omega/\text{cm]} \quad X_R = \sqrt{\frac{4\omega}{R_{dc} 10^9}} > 3$$

Arnold Formülü

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{GMD}{GMR} \text{ [H / km]}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{GMD}{GMR}} \text{ [F / km]}$$

İletim Hattı Parametreleri

Seri direnç (r [Ω/km]): Hat boyunca akan akımdan dolayı $R I^2$ güç kaybına neden olan parametre,

Seri endüktans (L [H/km]): İletkenlerden akan akımların halkaladığı akılardan dolayı oluşan endüktif etkiyi gösteren parametre

Hattın seri empedansı (z [Ω/km]), hattın seri direnci ve seri endüktif reaktansını ($x=2\pi fL$) içerir.

$$\bar{z} = r + jx = r + j\omega L \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

$$\bar{Z} = \bar{z}l = R + jX \text{ [}\Omega \text{]} \quad (l: \text{ hat uzunluğu})$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ [}\Omega \text{]}$$

İletim Hattı Parametreleri

Paralel Kapasite (C [F/km]): İletkenlerin birbirlerine ya da toprağa karşı olan potansiyelinden kaynaklanan kapasitif etkiyi gösteren parametre

Paralel Kondüktans (g [S/km]): İletkenler arası ya da iletken-toprak arası kaçak akımlardan dolayı hat kayıplarına neden olan parametre. Paralel direnç etkisi çok yüksek gerilimlerde dikkate alınır yoksa ihmal edilir.

Hattın paralel admitansı (y [S/km]), hattın paralel kondüktansı ile kapasitif süseptansını ($b=2\pi fC$) içerir.

$$y = g + jb = g + j\omega C \text{ [S / km]}$$

$$\bar{Y} = \bar{y}l = G + jB \text{ [S]} \text{ [}\Omega^{-1} \text{]} \quad (l: \text{ hat uzunluğu})$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \text{ [S]}$$

İletim Hattı Parametreleri

Bir hattın tipik parametreleri

R: 0,07-0,2 Ω /km, L: 0,26-0,41 H/km

20 kV'luk bir hatta C: 1kVAr/km, 220kV'luk bir hava hattında

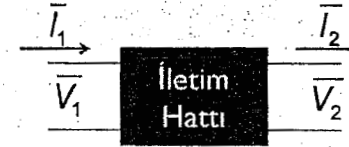
C: 180kVAr/km

400kV'un altında olan hatlarda G ihmal edilir.

Bir hattın admitansı ($Y=G+jB$), hat empedansının ($Z=R+jX$) tersine eşit değildir.

İletim Hattı Modellemesi

Tek faz eşdeğer devre modeli



$$\text{Hat Başı Gerilimi: } \bar{V}_1 = V_1 \angle \theta_{V_1}$$

$$\text{Hat Sonu Gerilimi: } \bar{V}_2 = V_2 \angle \theta_{V_2}$$

$$\text{Hat Başı Akımı: } \bar{I}_1 = I_1 \angle \theta_{I_1}$$

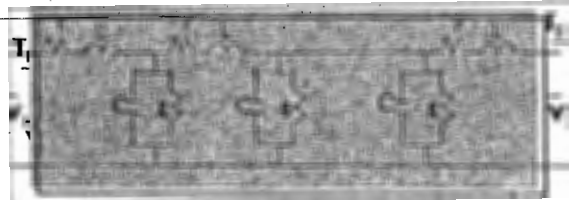
$$\text{Hat Sonu Akımı: } \bar{I}_2 = I_2 \angle \theta_{I_2}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

Hat başı gerilim ve akımının hat sonu gerilim ve akım cinsinden ifadesi

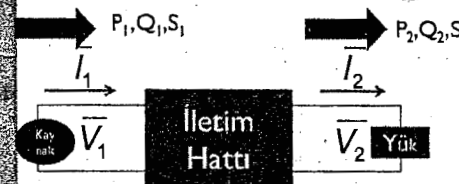
İletim Hattı Modellemesi

İletim hat parametreleri hat boyunca düzgün yayılıdır.



$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

İletim Hattı Bağıntıları



$$\text{Hat Başı Gerilimi: } \bar{V}_1 = V_1 \angle \theta_{V_1}$$

$$\text{Hat Sonu Gerilimi: } \bar{V}_2 = V_2 \angle \theta_{V_2}$$

$$\text{Hat Başı Akımı: } \bar{I}_1 = I_1 \angle \theta_{I_1}$$

$$\text{Hat Sonu Akımı: } \bar{I}_2 = I_2 \angle \theta_{I_2}$$

Hat Başı Aktif ve Reaktif Gücü:

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}), \quad Q_1 = 3V_1 I_1 \sin(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})$$

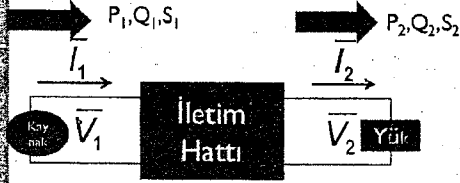
$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}), \quad Q_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})$$

Hat Sonu Aktif ve Reaktif Gücü:

$$P_2 = 3V_2 I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}), \quad Q_2 = 3V_2 I_2 \sin(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})$$

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}), \quad Q_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \sin(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})$$

İletim Hattı Bağıntıları



$$\begin{aligned} \text{Hat Başı Gerilimi: } \bar{V}_1 &= V_1 \angle \theta_{V_1} \\ \text{Hat Sonu Gerilimi: } \bar{V}_2 &= V_2 \angle \theta_{V_2} \\ \text{Hat Başı Akımı: } \bar{I}_1 &= I_1 \angle \theta_{I_1} \\ \text{Hat Sonu Akımı: } \bar{I}_2 &= I_2 \angle \theta_{I_2} \end{aligned}$$

Hat Başı Karmaşık Gücü, ve güç katsayısı:

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= P_1 + jQ_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 [\cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}) + j \sin(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})] \\ \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}) \end{aligned}$$

Hat Sonu Karmaşık Gücü ve Güç Katsayısı:

$$\begin{aligned} \bar{S}_2 &= P_2 + jQ_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 [\cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}) + j \sin(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})] \\ \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}) \end{aligned}$$

İletim Hattı Verimi

Bir hattın verimi : Hat sonundan çekilen aktif gücün hat başından verilen aktif güce oranıdır.



$$\% \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{P_2}{P_2 + P_k} \times 100$$

İletim Hattı Gerilim Regülasyonu

Bir hattın gerilim regülasyonu: Hat başı gerilimi sabit kalma koşulu ile hat sonunda hattın yüksüz ve tam yüklü olduğu durumdaki gerilimler arasındaki farktır.

$$GR = V_{2-0} - V_2 \quad \begin{array}{l} V_{2-0}: \text{Hat sonu yüksüz iken hat sonu gerilimi} \\ V_2: \text{Hat sonu tam yüklü iken hat sonu gerilimi} \end{array}$$

Gerilim regülasyonu genellikle % cinsinden ifade edilir.

$$\%GR = \frac{V_{2-0} - V_2}{V_2} \times 100$$

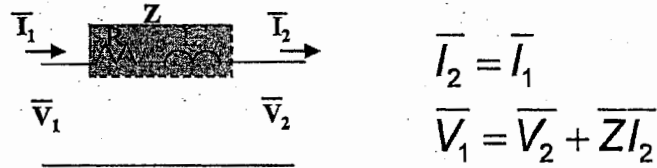
Not: Gerilim regülasyonu hesaplanırken gerilimin genlik değerleri alınmalıdır.

İletim Hat Tipleri

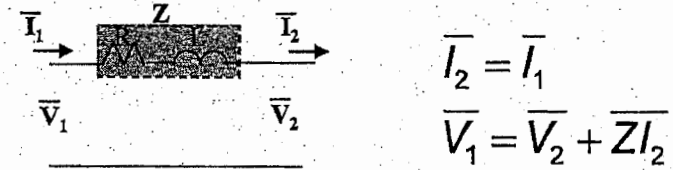
- Kısa Hat: $0 < l \leq 100 \text{ km}$
- Orta Uzun Hat: $100 < l \leq 250 \text{ km}$
- Uzun Hat: $l > 250 \text{ km}$

Kısa Hatlar

Uzunluğu 100km'ye kadar olan hatlardır. Hattın kapasitif etkisinden kaynaklanan süseptans, buna bağlı olarak ta admitans ihmal edilir. Bu durumda seri direnç ve reaktanslardan oluşan düzgün yayılı devrede direnç ve reaktanslar toplanarak tek bir empedans değeri ile gösterilebilir.



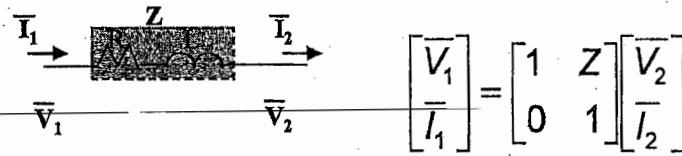
Kısa Hatlar



$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow A=1, \quad B=Z[\Omega], \quad C=0, \quad D=1$$

Kısa Hatlar



$$S_1 = 3\bar{V}_1\bar{I}_1 = P_1 + jQ_1 \rightarrow P_1 = 3V_1I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}), \quad Q_1 = 3V_1I_1 \sin(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2\bar{I}_2 = P_2 + jQ_2 \rightarrow P_2 = 3V_2I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}), \quad Q_2 = 3V_2I_2 \sin(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3V_2I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})}{3V_1I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})} = \frac{P_2}{P_2 + 3RI^2}$$

Kısa Hatlar (Verim)

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{3V_2I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})}{3V_1I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})} \\ &= \frac{V_2 \cos \theta_2}{V_1 \cos \theta_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_2 + 3RI_2^2} = \frac{3V_2I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})}{3V_2I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}) + 3RI_2^2} \\ &= \frac{V_2 \cos \theta_2}{V_2 \cos \theta_2 + RI_2} \end{aligned}$$

Kısa Hatlar (Gerilim Regülasyonu)

$$\%GR = \frac{V_{2-0} - V_2}{V_2} \times 100$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Hattın yüksüz olması,} \\ \text{hat sonuna yük bağlı değildir} \\ \bar{I}_2 = 0 \end{array}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{2-0} + \bar{Z} \times 0 \Rightarrow V_{2-0} = V_1$$

$$\%GR = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100$$

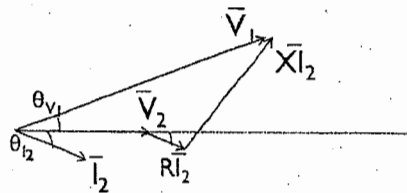
Kısa Hatlar (Yüklenme ve Fazör)

Fazör diyagramları çizilirken hat sonu gerilimi (V_2) ve akımı (I_2) bilindiği kabul edilir. Buna göre hat başı gerilimi (V_1) akımı çizilir. Çizim kolaylığı açısından hat sonu gerilimi referans alınır. Sonra, yükleme durumuna göre hat sonu akımı çizilir.

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z}\bar{I}_2 = \bar{V}_2 + R\bar{I}_2 + jX\bar{I}_2$$

ifadesi dikkate alınarak önce I_2 akımına paralel $R I_2$ kadar fazör V_2 'ye eklenir; bu fazöre de 90 derece saat yönünün tersine $X I_2$ kadar fazör eklenerek, bu fazörün bittiği nokta ile V_2 'nin başı arasında çizilen fazör hat başı gerilimi V_1 'i verir.

Kısa Hatlar (Endüktif Yükleme)



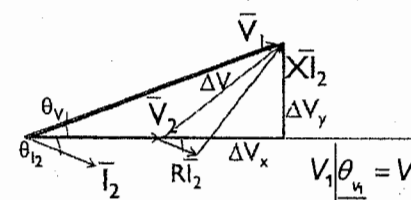
$$\bar{V}_2 = V_2 \angle 0^\circ$$

$$\bar{I}_2 = I_2 \angle \theta_{I_2}, \quad \theta_{I_2} < 0$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z}\bar{I}_2$$

$$\bar{V}_1 = (\bar{V}_2 + R\bar{I}_2) + jX\bar{I}_2$$

Kısa Hatlar (Endüktif Yükleme)



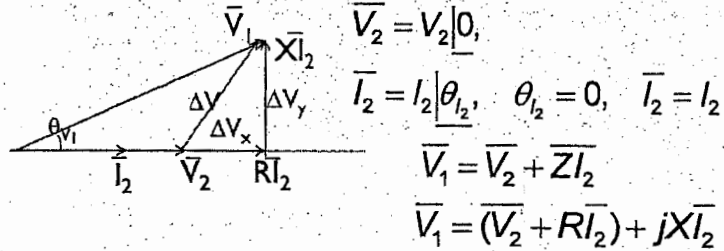
$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \bar{V}_2 + \bar{Z}\bar{I}_2 \\ &= \bar{V}_2 + \underbrace{(R + jX)\bar{I}_2}_{\Delta \bar{V}} \end{aligned}$$

$$V_1 \cos \theta_{V_1} = V_2 + (R I_2 \cos \theta_{I_2} + j X I_2 \sin \theta_{I_2}) + (j X I_2 \cos \theta_{I_2} - X I_2 \sin \theta_{I_2})$$

$$V_1 = \sqrt{(V_2 + \Delta V_x)^2 + \Delta V_y^2} \quad V_1 \sin \theta_{V_1} = V_2 + I_2 (R \cos \theta_{I_2} - X \sin \theta_{I_2}) + j I_2 (X \cos \theta_{I_2} + R \sin \theta_{I_2})$$

$$\theta_{V_1} = \text{Arctan} \left(\frac{\Delta V_y}{V_2 + \Delta V_x} \right)$$

Kısa Hatlar (Omik Yükleme)

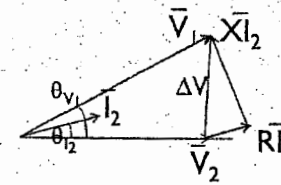


$$V_1 = \sqrt{(V_2 + R I_2)^2 + (X I_2)^2}$$

$$\theta_{V_1} = \text{Arctan} \left(\frac{X I_2}{V_2 + R I_2} \right)$$

$$\Delta V_x = R I_2, \quad \Delta V_y = X I_2$$

Kısa Hatlar (Kapasitif Yükleme)



$$\bar{V}_2 = V_2 \angle 0$$

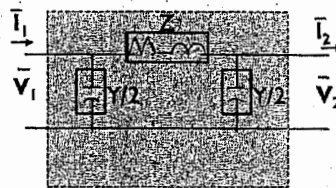
$$\bar{I}_2 = I_2 \angle \theta_{I_2}, \theta_{I_2} > 0$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z} \bar{I}_2$$

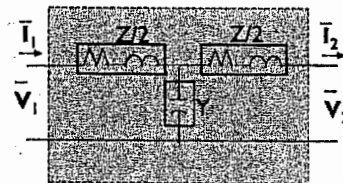
$$\bar{V}_1 = (\bar{V}_2 + R \bar{I}_2) + j X \bar{I}_2$$

Orta Uzun Hatlar

- Uzunluğu 100 ile 250km arasında olan hatlardır. Hattın kapasitif etkisi ihmal edilmez. Düzgün yayılı olarak değil, ya hat ortasında, ya da hattın her iki tarafında toplu olarak iki şekilde modellenir.



Π Eşdeğer Devresi

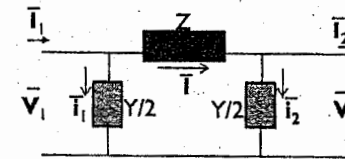


T Eşdeğer Devresi

$$Z = \bar{Z} = R + jX = R + j\omega L$$

$$Y = \bar{Y} = jB = j\omega C$$

Π Eşdeğer Devresi Akım-Gerilim Bağlıntıları



$$\bar{I}_1 = \frac{Y}{2} \bar{V}_1, \quad \bar{I}_2 = \frac{Y}{2} \bar{V}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_1 + \bar{I}$$

$$= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}$$

$$\bar{I}_1 = \frac{Y}{2} \bar{V}_1 + \frac{Y}{2} \bar{V}_2 + \bar{I}$$

$$\bar{I}_1 = \frac{Y}{2} \left[\left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \bar{V}_2 + Z \bar{I}_2 \right] + \frac{Y}{2} \bar{V}_2 + \bar{I}$$

$$\bar{I}_1 = \left(Y + \frac{ZY^2}{4} \right) \bar{V}_2 + \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) \bar{I}_2$$

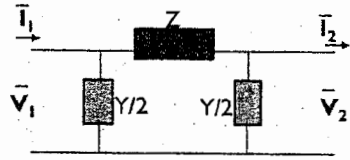
$$\bar{V}_1 = Z \bar{I} + \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_1 = Z(\bar{I}_2 + \bar{I}_2) + \bar{V}_2$$

$$= Z \left(\bar{I}_2 + \frac{Y}{2} \bar{V}_2 \right) + \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_1 = \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) \bar{V}_2 + Z \bar{I}_2$$

II Eşdeğer Devresi Akım-Gerilim Bağlıları



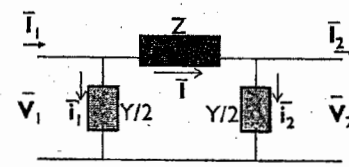
$$\bar{V}_1 = \underbrace{\left(1 + \frac{ZY}{2}\right)}_A \bar{V}_2 + \underbrace{Z}_{B} \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \underbrace{\left(Y + \frac{ZY^2}{4}\right)}_C \bar{V}_2 + \underbrace{\left(1 + \frac{ZY}{2}\right)}_D \bar{I}_2$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) & Z \\ \left(Y + \frac{ZY^2}{4}\right) & \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

A=D: Birimsiz
B: [Ω]
C: [Ω⁻¹], [S]

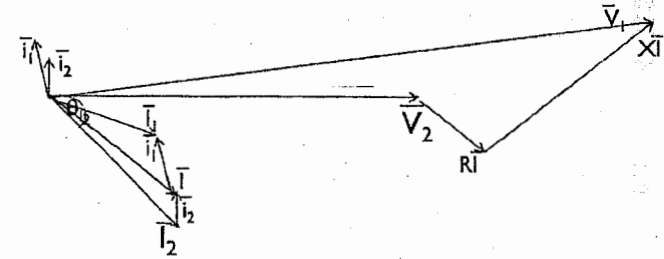
II Eşdeğer Devresi Fazör Diyagramı



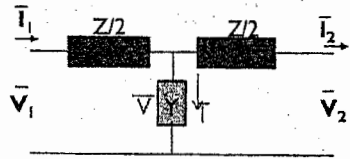
$$\bar{I}_2 = \frac{Y}{2} \bar{V}_2 \quad \bar{I} = \bar{I}_2 + \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_1 = Z\bar{I} + \bar{V}_2 = (R + jX)\bar{I} + \bar{V}_2$$

$$\bar{I}_1 = \frac{Y}{2} \bar{V}_1 \quad \bar{I}_1 = \bar{I} + \bar{I}_1$$



T Eşdeğer Devresi Akım-Gerilim Bağlıları



$$\bar{I}_1 = \bar{I} + \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = Y\bar{V} + \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = Y\left(\bar{V}_2 + \frac{Z}{2}\bar{I}_2\right) + \bar{I}_2$$

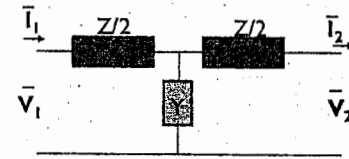
$$\bar{I}_1 = Y\bar{V}_2 + \left(1 + Y\frac{Z}{2}\right)\bar{I}_2$$

$$\bar{V}_1 = \frac{Z}{2}\bar{I}_1 + \bar{V}$$

$$\bar{V}_1 = \frac{Z}{2} \underbrace{\left[Y\bar{V}_2 + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right)\bar{I}_2\right]}_{\bar{I}_1} + \underbrace{\left[\bar{V}_2 + \frac{Z}{2}\bar{I}_2\right]}_{\bar{V}}$$

$$\bar{V}_1 = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right)\bar{V}_2 + \left(Z + \frac{YZ^2}{4}\right)\bar{I}_2$$

T Eşdeğer Devresi Akım-Gerilim Bağlıları



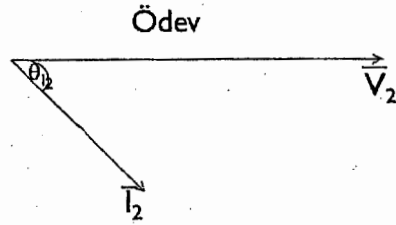
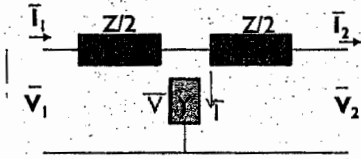
$$\bar{V}_1 = \underbrace{\left(1 + \frac{YZ}{2}\right)}_A \bar{V}_2 + \underbrace{\left(Z + \frac{YZ^2}{4}\right)}_B \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \underbrace{Y}_{C} \bar{V}_2 + \underbrace{\left(1 + Y\frac{Z}{2}\right)}_D \bar{I}_2$$

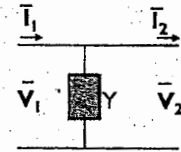
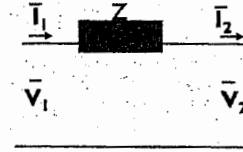
$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) & \left(Z + \frac{YZ^2}{4}\right) \\ Y & \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

A=D: Birimsiz
B: [Ω]
C: [Ω⁻¹], [S]

T Eşdeğer Devresi Fazör Diyagramı



Orta Uzun Hatlar Akım-Gerilim Bağlıları (Matris Çarpımı Yolu ile)



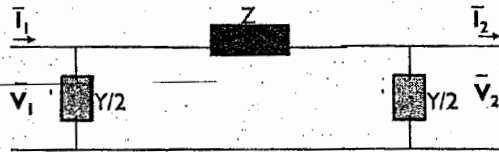
$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \bar{V}_2 \\ \bar{I}_1 &= \bar{I}_2 + Y\bar{V}_2 \end{aligned}$$

Daha önce kısa hatlar için çıkarılmıştı

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

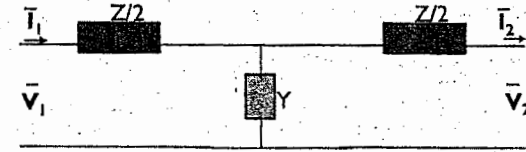
II Eşdeğer Devresi Akım-Gerilim Bağlıları (Matris Çarpımı Yolu ile)



$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{ZY}{2}) & Z \\ (Y + \frac{ZY^2}{4}) & (1 + \frac{ZY}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

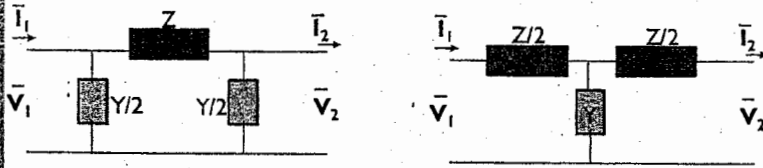
T Eşdeğer Devresi Akım-Gerilim Bağlıları (Matris Çarpımı Yolu ile)



$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{ZY}{2}) & (Z + \frac{YZ^2}{4}) \\ Y & (1 + \frac{ZY}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

Orta Uzun Hatlar (Güç Bağıntıları)



$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{ZY}{2}) & Z \\ Y + \frac{ZY^2}{4} & (1 + \frac{ZY}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{ZY}{2}) & (Z + \frac{YZ^2}{4}) \\ Y & (1 + \frac{ZY}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = 3\bar{V}_1\bar{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \rightarrow P_1 = 3V_1I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}), \quad Q_1 = 3V_1I_1 \sin(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2\bar{I}_2^* = P_2 + jQ_2 \rightarrow P_2 = 3V_2I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}), \quad Q_2 = 3V_2I_2 \sin(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})$$

Orta Uzun Hatlar (Verim)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3V_2I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})}{3V_1I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + 3R \left(I_2 + \frac{Y}{2} V_2 \right)^2} \times 100$$

Orta Uzun Hatlar (Gerilim Regülasyonu)

$$\%GR = \frac{V_{2-0} - V_2}{V_2} \times 100$$

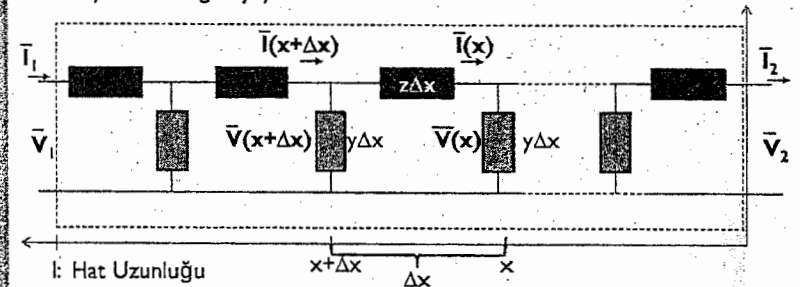
$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Hattın yüksüz olması,} \\ \text{hat sonuna yük bağlı değildir} \\ \bar{I}_2 = 0 \end{array}$$

$$\bar{V}_1 = A\bar{V}_{2-0} + B \times 0 \Rightarrow V_{2-0} = \frac{V_1}{A}$$

$$\%GR = \frac{V_1/A - V_2}{V_2} \times 100 = \frac{\left(\frac{V_1}{1 + ZY/2} \right) - V_2}{V_2}$$

Uzun Hatlar

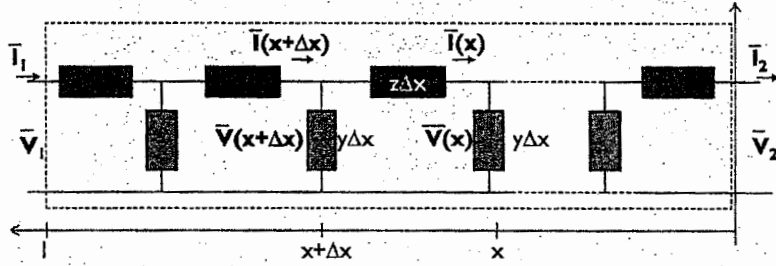
Uzunluğu 250km'nin üzerinde olan hatlardır. İletim hat parametreleri hat boyunca düzgün yayılıdır.



$$z = r + jx, \quad [\Omega / km]$$

$$y = g + jb, \quad [\Omega^{-1} / km]$$

Uzun Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)



$$\begin{aligned} \bar{V}(x+\Delta x) &= \bar{V}(x) + z\Delta x \bar{I}(x) & \bar{I}(x+\Delta x) &= \bar{I}(x) + y\Delta x \bar{V}(x+\Delta x) \\ z\bar{I}(x) &= \frac{\bar{V}(x+\Delta x) - \bar{V}(x)}{\Delta x} & y\bar{V}(x+\Delta x) &= \frac{\bar{I}(x+\Delta x) - \bar{I}(x)}{\Delta x} \\ \lim_{\Delta x \rightarrow 0} z\bar{I}(x) &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\bar{V}(x+\Delta x) - \bar{V}(x)}{\Delta x} & \lim_{\Delta x \rightarrow 0} y\bar{V}(x+\Delta x) &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\bar{I}(x+\Delta x) - \bar{I}(x)}{\Delta x} \end{aligned}$$

$$z\bar{I}(x) = \frac{d\bar{V}(x)}{dx} \quad 1$$

$$y\bar{V}(x) = \frac{d\bar{I}(x)}{dx} \quad 2$$

Tek bilinmeyenli 1. dereceden diferansiyel denklemler ARSOY, Enerji İletimi 2013 109

Uzun Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)

$$\begin{aligned} z\bar{I}(x) &= \frac{d\bar{V}(x)}{dx} \quad 1 & z \frac{d\bar{I}(x)}{dx} &= \frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} & zy\bar{V}(x) &= \frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} \quad 1^* \\ y\bar{V}(x) &= \frac{d\bar{I}(x)}{dx} \quad 2 & y \frac{d\bar{V}(x)}{dx} &= \frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} & yz\bar{I}(x) &= \frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} \quad 2^* \end{aligned}$$

Tek bilinmeyenli 2. dereceden diferansiyel denklemler

Tek bilinmeyenli 2. dereceden diferansiyel denklemler 1*'in çözümü

$$\bar{V}(x) = A_1 e^{\sqrt{zy}x} + A_2 e^{-\sqrt{zy}x} \quad \text{olsun.}$$

A_1 ve A_2 'leri bulmak için $\bar{V}(x)$ ve $d\bar{V}/dx$ 'in ($x=0$)'daki değerlerini belirleyelim.

$$\begin{aligned} \bar{V}(x) &= A_1 e^{\sqrt{zy}x} + A_2 e^{-\sqrt{zy}x} & \frac{d\bar{V}(x)}{dx} &= A_1 \sqrt{zy} e^{\sqrt{zy}x} - A_2 \sqrt{zy} e^{-\sqrt{zy}x} \\ \bar{V}(x)_{x=0} &= \bar{V}_2 = A_1 + A_2 & \frac{d\bar{V}(x)}{dx} \Big|_{x=0} &= z\bar{I}_2 = \sqrt{zy}(A_1 - A_2) \end{aligned}$$

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013 110

Uzun Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= \bar{V}_2 & A_1 + A_2 &= \bar{V}_2 \\ A_1 - A_2 &= \frac{z}{\sqrt{zy}} \bar{I}_2 & A_1 - A_2 &= \sqrt{\frac{z}{y}} \bar{I}_2 \\ A_1 &= \frac{\bar{V}_2 + \sqrt{\frac{z}{y}} \bar{I}_2}{2} \\ A_2 &= \frac{\bar{V}_2 - \sqrt{\frac{z}{y}} \bar{I}_2}{2} \end{aligned}$$

$\sqrt{zy} = \gamma$: Yayılma Katsayısı [1/km]

$\sqrt{\frac{z}{y}} = Z_c$: Karakteristik Empedans [ohm]

$$\bar{V}(x) = A_1 e^{\sqrt{zy}x} + A_2 e^{-\sqrt{zy}x}$$

$$\bar{V}(x) = \left[\frac{\bar{V}_2 + Z_c \bar{I}_2}{2} \right] e^{\gamma x} + \left[\frac{\bar{V}_2 - Z_c \bar{I}_2}{2} \right] e^{-\gamma x}$$

$$\bar{V}(x) = \left[\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{V}_2 + Z_c \left[\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{I}_2 \quad 1^{**}$$

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013 111

Uzun Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)

$$\begin{aligned} z\bar{I}(x) &= \frac{d\bar{V}(x)}{dx} \quad 1 & z \frac{d\bar{I}(x)}{dx} &= \frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} & zy\bar{V}(x) &= \frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} \quad 1^* \\ y\bar{V}(x) &= \frac{d\bar{I}(x)}{dx} \quad 2 & y \frac{d\bar{V}(x)}{dx} &= \frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} & yz\bar{I}(x) &= \frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} \quad 2^* \end{aligned}$$

Tek bilinmeyenli 2. dereceden diferansiyel denklemler

Tek bilinmeyenli 2. dereceden diferansiyel denklemler 2*'in çözümü

$$\bar{I}(x) = B_1 e^{\sqrt{zy}x} + B_2 e^{-\sqrt{zy}x} \quad \text{olsun.}$$

A_1 ve A_2 'leri bulmak için $\bar{I}(x)$ ve $d\bar{I}/dx$ 'in ($x=0$)'daki değerlerini belirleyelim.

$$\begin{aligned} \bar{I}(x) &= B_1 e^{\sqrt{zy}x} + B_2 e^{-\sqrt{zy}x} & \frac{d\bar{I}(x)}{dx} &= B_1 \sqrt{zy} e^{\sqrt{zy}x} - B_2 \sqrt{zy} e^{-\sqrt{zy}x} \\ \bar{I}(x)_{x=0} &= \bar{I}_2 = B_1 + B_2 & \frac{d\bar{I}(x)}{dx} \Big|_{x=0} &= y\bar{V}_2 = \sqrt{zy}(B_1 - B_2) \end{aligned}$$

Ayşen BASA ARSOY, Enerji İletimi 2013 112

Uzun Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)

$$B_1 + B_2 = \bar{I}_2$$

$$B_1 - B_2 = \sqrt{\frac{y}{z}} \bar{V}_2$$

$$B_1 = \frac{\bar{I}_2 + \sqrt{\frac{y}{z}} \bar{V}_2}{2}$$

$$B_2 = \frac{\bar{I}_2 - \sqrt{\frac{y}{z}} \bar{V}_2}{2}$$

$\sqrt{zy} = \gamma$: Yayılma Katsayısı [1/km]

$\sqrt{\frac{z}{y}} = Z_c$: Karakteristik Empedans [ohm]

$$\bar{I}(x) = B_1 e^{\sqrt{zy}x} + B_2 e^{-\sqrt{zy}x}$$

$$\bar{I}(x) = \left[\frac{\bar{I}_2 + \bar{V}_2 / Z_c}{2} \right] e^{\gamma x} + \left[\frac{\bar{I}_2 - \bar{V}_2 / Z_c}{2} \right] e^{-\gamma x}$$

$$\bar{I}(x) = \frac{1}{Z_c} \left[\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{V}_2 + \left[\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{I}_2$$

Uzun Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)

$$\bar{V}(x) = \left[\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{V}_2 + Z_c \left[\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{I}_2$$

$$\bar{I}(x) = \frac{1}{Z_c} \left[\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{V}_2 + \left[\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right] \bar{I}_2$$

$$\bar{V}(x) = \cosh(\gamma x) \bar{V}_2 + Z_c \sinh(\gamma x) \bar{I}_2$$

$$\bar{I}(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \bar{V}_2 + \cosh(\gamma x) \bar{I}_2$$

$\sqrt{zy} = \gamma$: Yayılma Katsayısı [1/km]

$\sqrt{\frac{z}{y}} = Z_c$: Karakteristik Empedans [ohm]

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(x) \\ \bar{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \sinh(\gamma x) / Z_c & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

Uzun Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(x) \\ \bar{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \sinh(\gamma x) / Z_c & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(x) \\ \bar{I}(x) \end{bmatrix}_{x=l} = \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underbrace{\cosh(\gamma l)}_A & \underbrace{Z_c \sinh(\gamma l)}_B \\ \underbrace{\sinh(\gamma l) / Z_c}_C & \underbrace{\cosh(\gamma l)}_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

Bazı özellikler

$$\cosh(\gamma x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}$$

$$\sinh(\gamma x) = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$$

$\sqrt{zy} = \gamma = \alpha + j\beta$: Zayıflama Sabiti [1/km]
: Faz Sabiti [1/km]
: Yayılma Katsayısı [1/km]

$\sqrt{\frac{z}{y}} = Z_c$: Karakteristik Empedans [ohm]

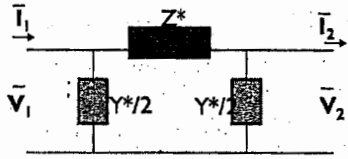
$$\cosh(\gamma l) = \cosh(\alpha + j\beta)l$$

$$= \cosh(\alpha l) \cos(\beta l) + j \sinh(\alpha l) \sin(\beta l)$$

$$\sinh(\gamma l) = \sinh(\alpha + j\beta)l$$

$$= \sinh(\alpha l) \cos(\beta l) + j \cosh(\alpha l) \sin(\beta l)$$

Uzun Hatların Π Eşdeğer Gösterimi



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{Z^* Y^*}{2}) & Z^* \\ Y^* + \frac{Z^* Y^{*2}}{4} & (1 + \frac{Z^* Y^*}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cosh(\gamma l)}{A} & \frac{Z_c \sinh(\gamma l)}{B} \\ \frac{\sinh(\gamma l)/Z_c}{C} & \frac{\cosh(\gamma l)}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$B = Z^* = Z_c \sinh(\gamma l)$$

$$Z^* = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh(\gamma l) \left[\frac{\sqrt{Zl}}{\sqrt{Yl}} \right]$$

$$Z^* = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l}$$

$$A = 1 + \frac{Z^* Y^*}{2} = \cosh(\gamma l)$$

$$\frac{Y^*}{2} = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{Z^*} = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{Z_c \sinh(\gamma l)}$$

$$\frac{Y^*}{2} = \frac{Y \tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2}$$

Uzun Hatlar (Güç Bağıntıları)

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \sinh(\gamma x)/Z_c & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cosh(\gamma l)}{A} & \frac{Z_c \sinh(\gamma l)}{B} \\ \frac{\sinh(\gamma l)/Z_c}{C} & \frac{\cosh(\gamma l)}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$S(x) = 3\bar{V}(x)\bar{I}(x)^* = P(x) + jQ(x)$$

$$\rightarrow P(x) = 3V(x)I(x) \cos(\theta_{V(x)} - \theta_{I(x)}), \quad Q(x) = 3V(x)I(x) \sin(\theta_{V(x)} - \theta_{I(x)})$$

$$S_1 = 3\bar{V}_1 \bar{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \rightarrow P_1 = 3V_1 I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}), \quad Q_1 = 3V_1 I_1 \sin(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2 \bar{I}_2^* = P_2 + jQ_2 \rightarrow P_2 = 3V_2 I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2}), \quad Q_2 = 3V_2 I_2 \sin(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})$$

Uzun Hatlar (Verim)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3V_2 I_2 \cos(\theta_{V_2} - \theta_{I_2})}{3V_1 I_1 \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1})}$$

Uzun Hatlar (Gerilim Regülasyonu)

$$\%GR = \frac{V_{2-0} - V_2}{V_2} \times 100$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Hattın yüksüz olması,
hat sonuna yük bağlı değildir

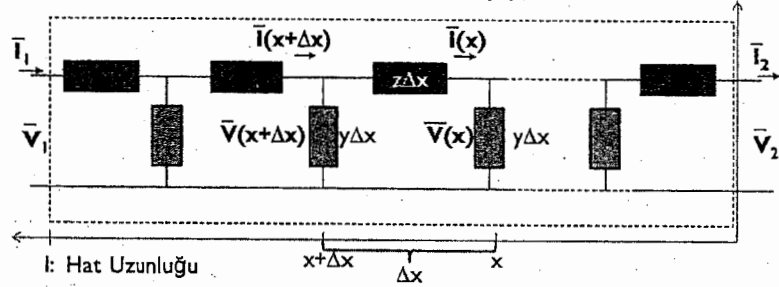
$$I_2 = 0$$

$$\bar{V}_1 = A\bar{V}_{2-0} + B \times 0 \Rightarrow V_{2-0} = \frac{V_1}{|A|}$$

$$\%GR = \frac{\frac{V_1}{|A|} - V_2}{V_2} \times 100 = \frac{\frac{V_1}{\cosh(\gamma l)} - V_2}{V_2} \times 100$$

Kayıpsız Hatlar

Direnci ve kondüktansı ihmal edilecek kadar küçük olan hatlardır. İletim hat parametreleri hat boyunca düzgün yayılıdır.



$$z = j\omega L, \quad [\Omega/km]$$

$$y = jb = j\omega C, \quad [\Omega^{-1}/km]$$

Uzun hat akım ve gerilim bağıntıları sadeleşir

Kayıpsız Hatlar (Akım-Gerilim Bağıntıları)

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \sinh(\gamma l)/Z_c & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{(j\omega L)(j\omega C)} = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$A = D = \cosh(j\beta l) = \cos(\beta l)$$

$$B = Z_c \sinh(j\beta l) = jZ_c \sin(\beta l)$$

$$C = j \sin(\beta l) / Z_c$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & Z_c j \sin(\beta l) \\ j \sin(\beta l) / Z_c & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

Kayıpsız Hatlar (Dalga Boyu)

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(x) \\ \bar{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta x) & Z_c j \sin(\beta x) \\ j \sin(\beta x) / Z_c & \cos(\beta x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$V_x |_{\theta_x} = \cos(\beta x) V_2 |_{\theta_2} + Z_c j \sin(\beta x) I_2 |_{\theta_2}$$

$$I_x |_{\theta_x} = \frac{j \sin(\beta x)}{Z_c} V_2 |_{\theta_2} + \cos(\beta x) I_2 |_{\theta_2}$$

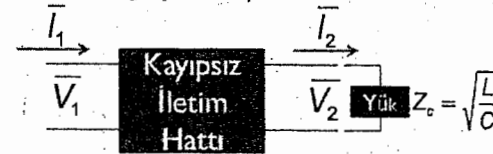
$$x = \frac{2\pi}{\beta} \Rightarrow \bar{V}_x = \bar{V}_2 \quad \& \quad \bar{I}_x = \bar{I}_2$$

x = Dalga Boyu

$$x = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} \quad \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \Rightarrow x = \frac{2\pi}{2\pi 50 \sqrt{LC}} \approx 6000 \text{ km}$$

Doğal Yüklenme (Surge Impedance Loading)

Kayıpsız bir hattın sonuna karakteristik empedansa eşit bir yük bağlanan bir hat doğal yüklenmiş olur.



$$\bar{V}_x = \cos(\beta x) \bar{V}_2 + Z_c j \sin(\beta x) \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_x = \cos(\beta x) \bar{V}_2 + \cancel{j \sin(\beta x)} \frac{\bar{V}_2}{Z_c}$$

$$\bar{V}_x = (\cos(\beta x) + j \sin(\beta x)) \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_x = \underbrace{(1 \angle \beta x)}_{1 \angle \beta x} \bar{V}_2$$

$$\bar{I}_x = \frac{j \sin(\beta x)}{Z_c} \bar{V}_2 + \cos(\beta x) \bar{I}_2$$

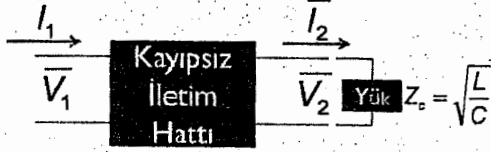
$$\bar{I}_x = \frac{j \sin(\beta x)}{\cancel{Z_c}} Z_c \bar{I}_2 + \cos(\beta x) \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_x = (\cos(\beta x) + j \sin(\beta x)) \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_x = \underbrace{(1 \angle \beta x)}_{1 \angle \beta x} \bar{I}_2$$

Doğal Yüklenme (Surge Impedance Loading)

Kayıpsız bir hattın sonuna karakteristik empedansa eşit bir yük bağlanan bir hat doğal yüklenmiş olur.



$$\bar{V}_x = (1/\beta x) \bar{V}_2 \quad \bar{I}_x = (1/\beta x) \bar{I}_2 \quad S_x = 3\bar{V}_x \bar{I}_x^* = 3\bar{V}_2 (1/\beta x) \bar{I}_2^* (1 - \beta x)$$

$$S_x = 3\bar{V}_2 \left(\frac{\bar{V}_2}{Z_c}\right)^* = 3 \frac{\bar{V}_2^2}{Z_c} = sbt$$

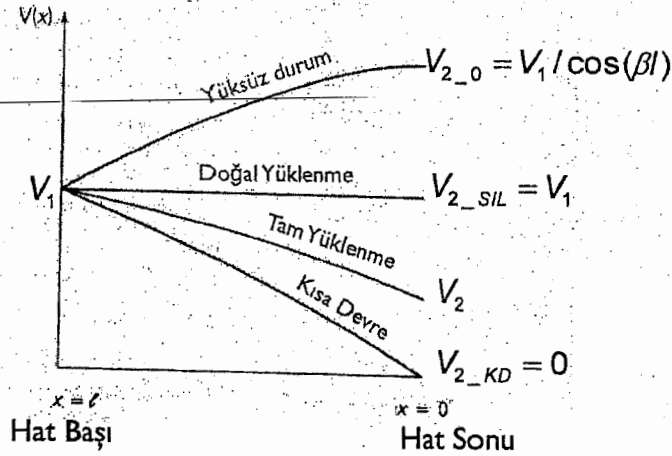
Doğal yüklenmiş kayıpsız bir hatta, gerilim ve akımın genliği, ve güç hat boyunca sabittir.

İletim Hatlarının ABCD Parametreleri ile Gösterimi

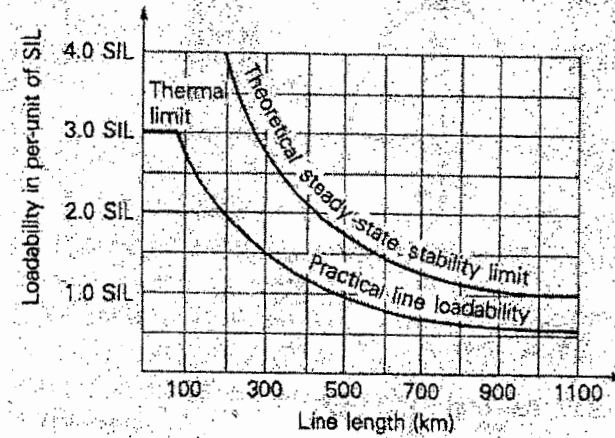
$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

	A=D: []	B : [Ω]	C: [S]	
Kısa Hatlar	1	Z	0	
Orta Uzun Hatlar	$(1 + \frac{ZY}{2})$	Z	$(Y + \frac{ZY^2}{4})$	Pi eşdeğeri
	$(1 + \frac{ZY}{2})$	$(Z + \frac{YZ^2}{4})$	Y	T eşdeğeri
Uzun Hatlar	cosh(γl)	Z _c sinh(γl)	$\frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c}$	$\gamma = \sqrt{ZY}$ $Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$
Kayıpsız Hatlar	cos(βl)	jZ _c sin(βl)	$\frac{j \sin(\beta l)}{Z_c}$	$\beta = \omega \sqrt{LC}$ $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$

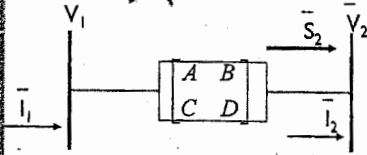
Gerilim Profili



Yüklenme Eğrisi



Sürekli Durumda İletilebilecek Mak. Güç (Kararlılık Sınırlaması)



$$\bar{V}_1 = V_1 / \underline{\theta}_V = V_1 / \underline{\delta} = \text{Hat başı gerilimi}$$

$$\bar{V}_2 = V_2 / \underline{\theta} = \text{Hat sonu gerilimi}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_1 = A\bar{V}_2 + B\bar{I}_2$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_1 - A\bar{V}_2}{B}$$

$$A = |A| / \underline{\theta}_A, \quad B = |B| / \underline{\theta}_B$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2 \bar{I}_2^*$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2 \left(\frac{\bar{V}_1 - A\bar{V}_2}{B} \right)^*$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2 \frac{\bar{V}_1}{B} - 3\bar{V}_2 \frac{A\bar{V}_2}{B}$$

$$S_2 = 3 \frac{V_2 V_1}{|B|} / \underline{\theta} - \delta + \theta_B - 3 \frac{|A| V_2^2}{|B|} / -\theta_A + \theta_B$$

Sürekli Durumda İletilebilecek Mak. Güç (Kararlılık Sınırlaması)

$$S_2 = \frac{3V_2 V_1}{|B|} [\cos(\theta_B - \delta) + j \sin(\theta_B - \delta)] - \frac{3|A|V_2^2}{|B|} [\cos(\theta_B - \theta_A) + j \sin(\theta_B - \theta_A)]$$

$$= P_2 + jQ_2$$

$$P_2 = \frac{3V_2 V_1}{|B|} \cos(\theta_B - \delta) - \frac{3|A|V_2^2}{|B|} \cos(\theta_B - \theta_A)$$

$$Q_2 = \frac{3V_2 V_1}{|B|} \sin(\theta_B - \delta) - \frac{3|A|V_2^2}{|B|} \sin(\theta_B - \theta_A)$$

$$\delta = \theta_B \Rightarrow P_2 = P_{2\max}$$

$$P_{2\max} = \frac{3V_2 V_1}{|B|} - \frac{3|A|V_2^2}{|B|} \cos(\theta_B - \theta_A)$$

Hat boyunca iletebilecek max güç

Sürekli Durumda İletilebilecek Mak. Güç (Kararlılık Sınırlaması)

$$S_2 = \frac{3V_2 V_1}{|B|} [\cos(\theta_B - \delta) + j \sin(\theta_B - \delta)] - \frac{3|A|V_2^2}{|B|} [\cos(\theta_B - \theta_A) + j \sin(\theta_B - \theta_A)]$$

$$= P_2 + jQ_2$$

$$P_2 = \frac{3V_2 V_1}{|B|} \cos(\theta_B - \delta) - \frac{3|A|V_2^2}{|B|} \cos(\theta_B - \theta_A)$$

$$Q_2 = \frac{3V_2 V_1}{|B|} \sin(\theta_B - \delta) - \frac{3|A|V_2^2}{|B|} \sin(\theta_B - \theta_A)$$

İletim hattı kısa hat ise ve R=0 ise, A, B, C, D parametreleri

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & jx \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

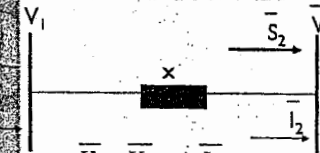
$$A = 1 / \underline{\theta}$$

$$B = x / \underline{\theta}$$

$$P_2 = \frac{3V_2 V_1}{x} \cos(90 - \delta) - \frac{3V_2^2}{x} \cos(90 - 0)$$

$$P_2 = \frac{3V_2 V_1}{x} \sin \delta$$

İletim hattında Güç İletimi



$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + jx\bar{I}_2$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{jx}$$

$$\bar{V}_1 = V_1 / \underline{\delta} = \text{Hat başı gerilimi [pu,b]}$$

$$\bar{V}_2 = V_2 / \underline{\theta} = \text{Hat sonu gerilimi [pu,b]}$$

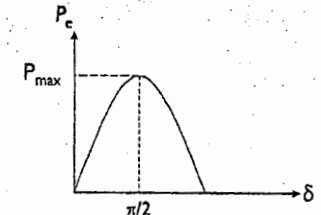
$$x = \text{hattın reaktansı}$$

$$P = \frac{3V_1 V_2}{x} \sin \delta$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2 \bar{I}_2^*$$

$$S_2 = 3\bar{V}_2 \left(\frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{jx} \right)^* = 3\bar{V}_2 \frac{\bar{V}_1}{-jx} - 3\bar{V}_2 \frac{\bar{V}_2}{-jx} = P_2 + jQ_2$$

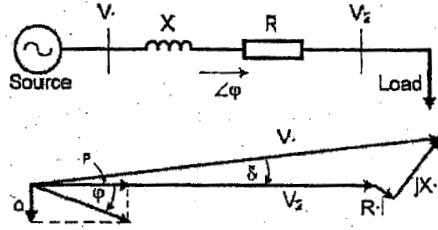
$$P_2 + jQ_2 = \frac{3V_2 V_1}{x} / \underline{\theta} - \delta - \frac{3V_2^2}{x} / \underline{\theta}$$



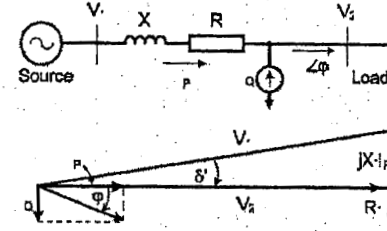
İletim Hatlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu

İletim hattının performansını arttırmak amacı ile hatlarda kompanzasyon yapılır.

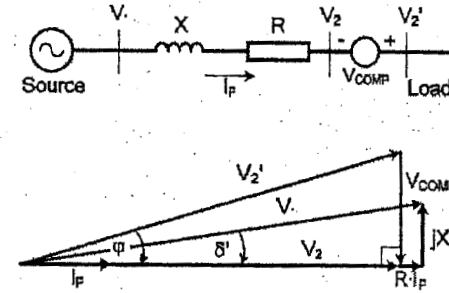
- hat yüklenebilirliğini artırma,
- hat gerilim düşümünü azaltma



Paralel ve Seri Kompanzasyon



- Gerilim düzenleme
- Hattaki reaktif gücün azaltılması
 - Kayıpların azaltılması
 - Gerilim düşümünün azaltılması



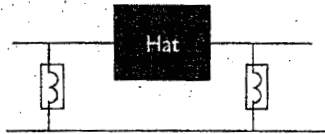
- Hattın seri reaktansının azaltılması
 - Kayıpların azaltılması
 - Gerilim düşümünün azaltılması
 - Kararlılığın artırılması

Paralel Kompanzasyon (Reaktör)

Hat boyunca belirli noktalarda faz-nötr arası paralel reaktör

- Hattın az yüklendiği durumlarda hat sonu gerilim yükselmeleri
- Anahtarlama sırasında oluşabilecek aşırı gerilimlerini önlemek amacı ile kullanılır.

Hat tam yüklü ise reaktörler devre dışı bırakılmalıdır.



Paralel Kompanzasyon (Kapasitör)

Hat boyunca belirli noktalarda faz-nötr arası paralel kapasitör

- Hat yoğun yüklü olduğunda hat sonundaki gerilim düşmesini önlemek amacı ile paralel kapasitörler kullanılır

