

# Fö 5 - TSFS11 Energitekniska system

## Trefastransformatorn

### Elektrisk kraftöverföring

Christofer Sundström

19 april 2021

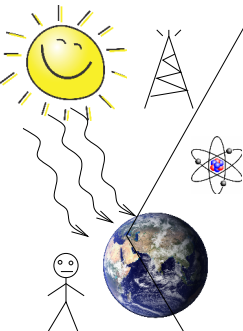
## 1 Trefastransformatorn

- Uppbyggnad
- Kopplingsarter
- Ekvivalent Kretsschema
- Beräkningsexempel

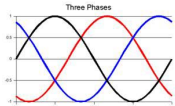
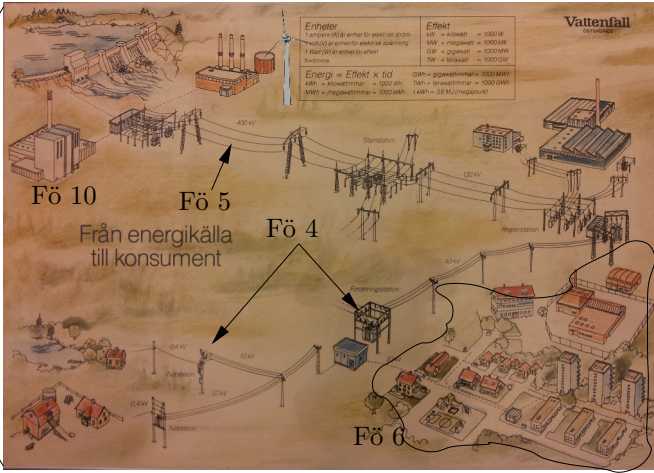
## 2 3-Fas kraftöverföring

- Exempel på varianter
- Egenskaper hos ledare
- Modell av kraftledare
- Spänningsfall
- Beräkningsexempel
- Vinkelskillnad vid effektöverföring
- Högsänd likspänning

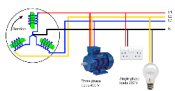
# Kursöversikt



Fö 2



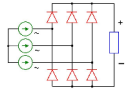
Fö 3



Fö 7-9



Fö 11



Fö 12



Fö 13

# Trefastransformatorn: Uppbyggnad

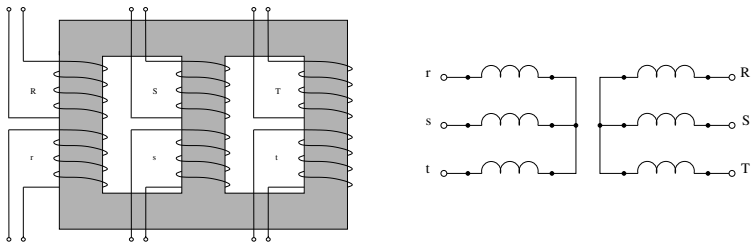
**Alt 1:** Använd tre st. likadana enfastransformatorer

- > Mindre vanligt
- > Lägre effektivitet än alternativet

**Alt 2:** Gemensam järnkärna för hela transformatorn, en s.k. **trefastransformator**

- > Summan av magnetflödena är alltid noll vid symmetrisk trefas. Därför behövs ingen magnetisk återledare.
- > Det räcker alltså med en trebent transformator, dvs ett ben för varje fas.

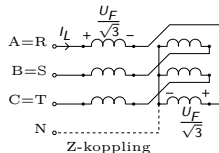
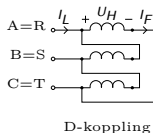
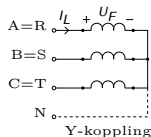
# Uppbyggnad, forts.



**Figur:** Uppbyggnad av trefas krafttransformator och dess schemasymbol vid Y-koppling. De tre faserna R, S och T har en uppsänningslindning och en nedspänningslindning på varje ben.

# Kopplingsarter

- Lindningarna på en trefastransformator brukar Y-kopplas, D-kopplas eller Z-kopplas. asuttagen märks A, B, och C.



- Magnetfältet från en D-kopplad lindning blir  $\sqrt{3}$  ggr. större än vid Y-kopplad lindning.
- > Spänningen på nedsidan blir  $\sqrt{3}$  ggr. större för D-kopplad lindning än för Y-kopplad lindning på uppsidan.
- De två lindningsdelarna i Z-kopplingen är två hälften av en lindningsfläta kopplade så att spänningarna blir motkopplade och fasförskjutna  $60^\circ$ .
- > Mindre vanligt

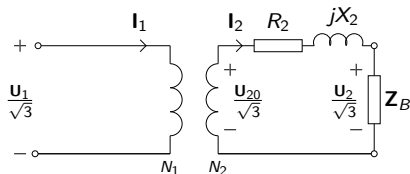
- Transformatorkopplingar betecknas enligt

	Uppspänningslindning	Nedspänningslindning
Y-koppling	Y	y
D-koppling	D	d
Z-koppling	Z	z

Ex: YNd betyder att uppspänningssidan är Y-kopplad med nolluttag och nedspänningssidan D-kopplad.

# Ekvivalent Krettschema

- Ofta försummas tomgångsförlusterna vid utritning av trefastransformatorns krettschema.
  - Räkningarna görs enklast under antagandet att transformatorn består av tre st Y-kopplade enfastransformatorer.
- > Förutsätter balanserad last.



**Figur:** Ekvivalent per Y-fas schema för trefastransformator.  $U_1$  representerar  $U_h$  på primärsidan, inte fasspänning nr 1.

- $R_1, X_1, Z_1, R_2, X_2, Z_2$ : Parametrar för respektive lindning.
- $R_{1k}, X_{1k}, Z_{1k}, R_{2k}, X_{2k}, Z_{2k}$ : Totala kortslutningsimpedansen på primärsidan respektive sekundärsidan. (ex:  $R_{1k} = R_1 + R'_2$  och  $R_{2k} = R'_1 + R_2$ )



# Ekvivalent Krettschema: Spänningsfall

- Vi hade sedan tidigare för enfasfallet

$$U_{20} = \sqrt{(U_2 + R_{2K} I_2 \cos \varphi_2 + X_{2K} I_2 \sin \varphi_2)^2 + (X_{2K} I_2 \cos \varphi_2 - R_{2K} I_2 \sin \varphi_2)^2}$$

- Vid 3-fas beräkningar så är alla spänningar huvudspänningar så vi får därför

$$\frac{U_{20}}{\sqrt{3}} = \sqrt{\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} + R_{2K} I_2 \cos \varphi_2 + X_{2K} I_2 \sin \varphi_2\right)^2 + \left(X_{2K} I_2 \cos \varphi_2 - R_{2K} I_2 \sin \varphi_2\right)^2}$$

Spänningsfallsformeln för 3-fas-transformatorn

$$\frac{U_{20}}{\sqrt{3}} \approx \left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} + R_{2K} I_2 \cos \varphi_2 + X_{2K} I_2 \sin \varphi_2\right)$$

# Beräkningsexempel 2.14

2.14 Beräkna nedanstående storheter med hjälp av ABB:s datablad för trefas krafttransformatorer, BD 140 022-BA, om transformatorn märkbelastas och effektfaktorn är 0,8 ind.

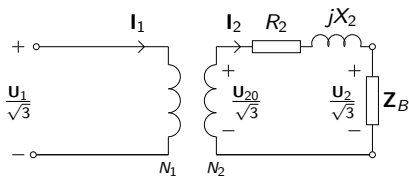
- $I_{1M}$  och  $I_{2M}$  (primär och sekundär märkström).
- $R_{1K}$  och  $R_{2K}$  (primär och sekundär kortslutningsresistans).
- $X_{1K}$  och  $X_{2K}$  (primär och sekundär kortslutningsreaktans).
- $U_2$  (sekundära spänningen över lasten).
- $\eta$  (vid märkström).
- Belastningsgraden  $x$  för max verkningsgrad.
- Hur stor är kortslutningsströmmen på primärsidan  $I_{K1}$  om transformatorn utsätts för trefasig kortslutning på sekundärsidan vid märkspänning?

Transformatorer typ TOL  
Öppet system, ej omlastningsbara

Effekt	Garantier		Vikter i kg		Beställningsnummer			
kVA	P <sub>0</sub> W	P <sub>b</sub> W	U <sub>2</sub> %	I <sub>0</sub> %	Olja	Totalt	Mållade	Värmförsänkade
Serie A, 10 ± 2 × 2,5 %/0,4 kV, Dyn 11								
50	135	870	3,4	1,4	90	390	BD 140 022-BA	BD 140 023-BA
100	215	1370	3,6	1,2	130	605	-CA	-CA
200	330	2530	3,4	0,9	180	890	-DA	-DA
315	460	3260	3,8	0,7	240	1310	-EA	-EA
400	580	3640	3,9	0,8	280	1510	-FA	
500	730	4410	4,5	0,7	390	1750	-GA	
630	900	5210	4,3	0,7	465	2085	-HA	
800	1100	6160	5,0	0,7	550	2550	-KA	
1000	1200	8250	5,8	0,6	680	2980	-LA	
1250	1520	9190	5,7	0,6	800	3550	-MA	
1600	1780	12360	6,0	0,6	970	4140	-NA	
2000	2100	15180	6,4	0,5	1160	5050	-PA	
2500	2600	17670	6,3	0,5	1350	6230	-RA	

Källa: ABB.

Rita ekvivalent per fas schema



## Beräkningsexempel 2.14

a)

**Sökt:**  $I_{1M}$  och  $I_{2M}$

**Givet:**  $S_M = 50 \text{ kVA}$ ,  $U_{1M} = 10 \text{ kV}$ ,  $U_{2M} = 0,4 \text{ kV}$

**Lösning:** Använd definitionen av trefaseffekt för upp-sidan och ned-sidan

$$S_M = \sqrt{3} \cdot U_{1M} \cdot I_{1M} = \sqrt{3} \cdot U_{2M} \cdot I_{2M} \implies$$

$$\implies \begin{cases} I_{1M} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 2,9 \text{ A} \\ I_{2M} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 10^2} = 72,2 \text{ A} \end{cases}$$

b)

**Sökt:**  $R_{1K}$  och  $R_{2K}$ , dvs kortslutningsresistansen sett från primär och sekundärsidan.

**Givet:**  $P_{FBM} = 870 \text{ W}$

**Lösning:** Effekten i varje gren är en tredjedel så vi har att

$$P_{FBM} = 3 \cdot R_{1K} \cdot I_{1M}^2 = 3 \cdot R_{2K} \cdot I_{2M}^2 \implies$$

$$\implies \begin{cases} R_{1K} = \frac{870}{3 \cdot 2,9^2} = 34,8 \text{ } \Omega \\ R_{2K} = \frac{870}{3 \cdot 72,2^2} = 55,2 \text{ m}\Omega = R_{1K} \cdot \left( \frac{U_{2M}}{U_{1M}} \right)^2 \end{cases}$$

## Beräkningsexempel 2.14

c)

**Sökt:**  $X_{1K}$  och  $X_{2K}$ , dvs kortslutningsreaktans sett från primär och sekundärsidan.

**Givet:**  $P_{FBM} = 870 \text{ W}$ ,  $u_Z = 3,4\%$ . Här är  $u_Z$  det procentuella impedansspänningsfallet vid märkström.

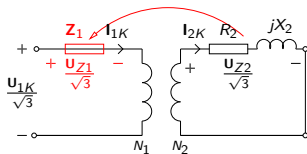
**Lösning:** Procentuella spänningsfallet är spänningsfallet över  $Z_{1K}$  eller  $Z_{2K}$  vid märkström på resp. sida.

$$\frac{U_{1K}}{\sqrt{3}} = |Z_{1K}| \cdot I_{1K} \quad (1)$$

$$U_{1K} = \frac{u_Z}{100} \cdot U_{1M} = \frac{3,4}{100} \cdot 10^4 = 340 \text{ V} \quad (2)$$

$$Z_{1K} = \sqrt{R_{1K}^2 + X_{1K}^2} \quad (3)$$

$$X_{2K} = X_{1K} \cdot \left( \frac{U_{2M}}{U_{1M}} \right)^2 \quad (4)$$



$$(1) \& (2) \Rightarrow Z_{1K} = \frac{U_{1K}}{\sqrt{3} \cdot I_{1K}} = \frac{340}{\sqrt{3} \cdot 2,9} = 68 \Omega$$

$$(3) \Rightarrow X_{1K} = 58,4 \Omega$$

$$(4) \Rightarrow X_{2K} = 58,4 \cdot \left( \frac{400}{10^4} \right)^2 = 93,5 \text{ m}\Omega$$

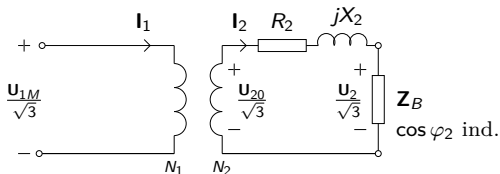
## Beräkningsexempel 2.14

d)

**Sökt:**  $U_2$ , spänningen över lasten

**Givet:**  $U_1 = U_{1M} \Rightarrow U_{20} = U_{2M}$ , Märkbelastning  $\Rightarrow I_2 = I_{2M}$ ,  $\cos \varphi_2$

**Lösning:** Rita figur och sätt ut kända och okända storheter. Använd spänningsfallsformeln



$$\frac{U_{20}}{\sqrt{3}} \approx \frac{U_2}{\sqrt{3}} + I_2 (R_{2K} \cos \varphi_2 + X_{2K} \sin \varphi_2) \Rightarrow$$

$$\frac{400}{\sqrt{3}} \approx \frac{U_2}{\sqrt{3}} + 72,2 (55,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 93,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \Rightarrow$$

$$U_2 \approx 387,4 \text{ V}$$

## Beräkningsexempel 2.14

e)

**Sökt:**  $\eta$ , för märkbelastningsfallet

**Givet:**  $U_2, I_{2M}, \cos \varphi_2, P_{F0}, P_{FBM}$

**Lösning:** Räkna ut  $P_{2M}$  för driftsfallet och använd formeln för effektivitet

$$P_{2M} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{2M} \cdot \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 387,4 \cdot 72,2 \cdot 0,8 = 38742 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{2M}}{P_{2M} + P_{F0} + P_{FBM}} = \frac{38742}{38742 + 135 + 870} = 97,5 \%$$

**Notera:**  $P_{2M}$  beror både på belastningsgrad  $x$  (via  $U_2$ ) och effektfaktor  $\cos \varphi_2$ . Detta syns inte explicit i formeln i boken

$$\eta = \frac{x \cdot P_{2M}}{x \cdot P_{2M} + P_{F0} + x^2 \cdot P_{FKM}}$$

Formeln borde alltså egentligen förtydligas med  $P_{2M}(x, \cos \varphi_2)$ .

## Beräkningsexempel 2.14

f)

**Sökt:** Belastningsgraden för max verkningsgrad

**Givet:**  $P_{F0}$ ,  $P_{FBM}$

**Lösning:** Försumma  $P_{2M}$ 's beroende på belastningsgrad och ställ upp verkningsgraden som funktion av belastningsgrad.

$$\begin{aligned}\eta(x) &= \frac{x \cdot P_{2M}}{x \cdot P_{2M} + P_{F0} + x^2 \cdot P_{FBM}} = \frac{f(x)}{g(x)} \\ \eta'(x) &= \frac{f'(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot g'(x)}{g(x)^2} = \\ &= \frac{P_{2M} \cdot (x \cdot P_{2M} + P_{F0} + x^2 \cdot P_{FBM}) - x \cdot P_{2M} \cdot (P_{2M} + 2 \cdot x \cdot P_{FBM})}{g(x)^2} = \\ &= \frac{x \cdot P_{2M}^2 + P_{2M} \cdot P_{F0} + x^2 \cdot P_{2M} \cdot P_{FBM} - x \cdot P_{2M}^2 - 2 \cdot x^2 \cdot P_{2M} \cdot P_{FBM}}{g(x)^2} = \\ &= \frac{P_{2M} \cdot P_{F0} - x^2 \cdot P_{2M} \cdot P_{FBM}}{g(x)^2} = \frac{P_{2M} \cdot (P_{F0} - x^2 \cdot P_{FBM})}{g(x)^2} \\ \eta'(x) = 0 &\implies (P_{F0} - x^2 \cdot P_{FBM}) = 0 \implies \\ x_{\eta_{\max}} &= \sqrt{\frac{P_{F0}}{P_{FBM}}} = \sqrt{\frac{135}{870}} = 0.39\end{aligned}$$

## Beräkningsexempel 2.14

g)

**Sökt:**  $I_{K1}$  om transformatorn kortsluts trefasigt på sekundärsidan  
(obs skillnad  $I_{1K} \neq I_{K1}$ )

**Givet:**  $U_1 = U_{1M}$ ,  $Z_{1\text{Tot}} = Z_{1K}$

**Lösning:** Använd ohms lag på den kortslutna kretsen

$$I_{K1} = \frac{U_{1M}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1K}} = \frac{10^4}{\sqrt{3} \cdot 68} = 85 \text{ A}$$



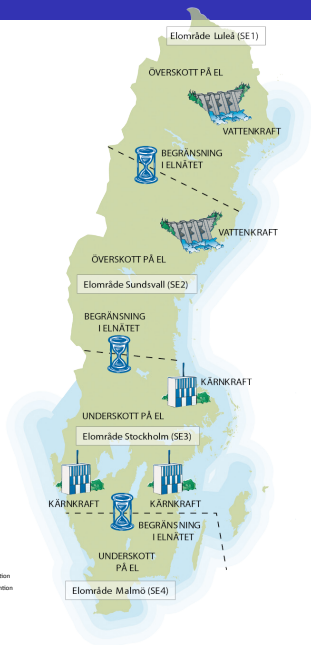
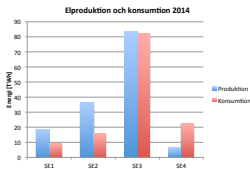
# Sveriges Elsystem - Indelning

Sverige är uppdelat i 4 Elområden

- Elområde Luleå (SE1)
- Elområde Sundsvall (SE2)
- Elområde Stockholm (SE3)
- Elområde Malmö (SE4)

De fyra elområdena avgränsas av tydliga flaskhalsar i systemet.

Även Svenska, Finska, Norska och Danska elnätet är ihopkopplade. Visst utbyte sker även med Ryssland, Tyskland och Polen.



# Tekniska utmaningar - Distribution

De flesta elnät använder 3-fas växelspanning. Detta ger bl.a. billig överföring och konstant (icke-pulserande) överförd effekt.

Förlusterna för en viss överförd effekt minskar med ökad spänning. Därför används olika spänningar i nätet.

<b>Benämning</b>	<b>Användning</b>	<b>Spänning</b>	<b>Typisk Effekt</b>
Transmissionsnät	Långa sträckor Större kraftverk	400 kV, 220 kV	1000 MW
Regionnät alt. Subtransmissionsnät	Medelkort ca 100km Mindre kraftverk	130 kV, 70 kV, 50 kV	
Distributionsnät	Ca 10 km Mikrokraftverk	10 kV, 20 kV	Några MW
Lågspännings- fördelning	< 1 km, Hushåll	400 V	< 1000 kW

Regionnät och distributionsnät kopplas ofta i slutna slingor eller med matning från fler håll för att minska känsligheten för fel.

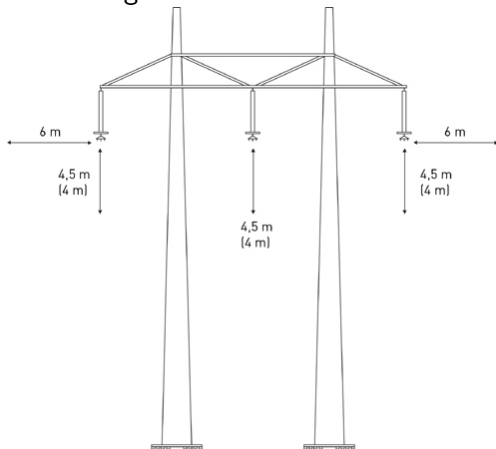
# Exempel på krafledningar - Transmissionsnät

400 kV ledning



# Exempel på krafledningar - Transmissionsnät

Figuren visar området kring en krafledning där något inte får befinna sig utan särskilt tillstånd från Svenska kraftnät.



Siffror utom parentes anger 400 kV

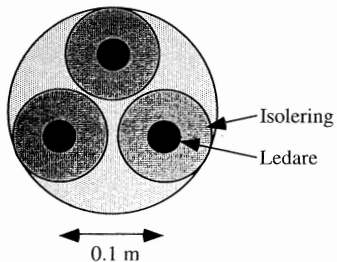
Siffror inom parentes anger 220 kV

# Exempel på krafledningar - Transmissionsnät

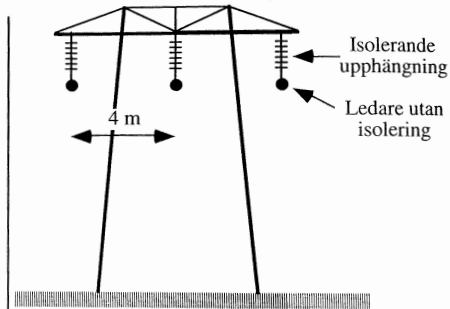
Dubbel 200 kV ledning



# Exempel på krafledningar - Regionnät



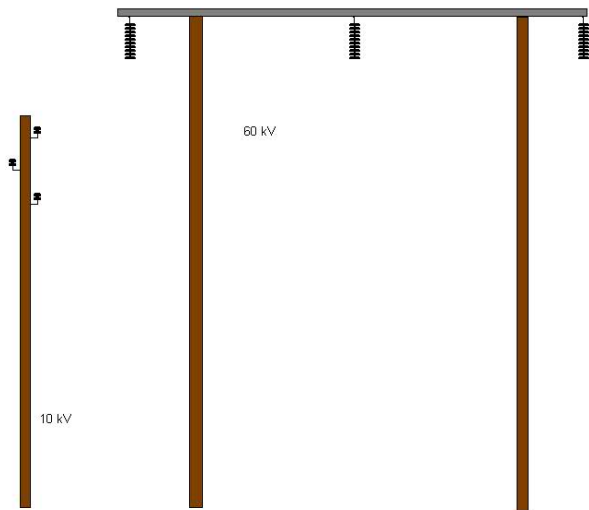
130 kV Jordkabel



130 kV Luftledning

Figur 3.19 Tvärsnitt av en 130 kV jordkabel och en 130 kV luftledning .

# Exempel på krafledningar - Distributionsnät / Regionnät



# Egenskaper hos ledare: Resistans och induktans

## Resistans

Koppar:  $R_{Cu} = \frac{17,2}{a} \Omega/km$

Aluminium:  $R_{Al} = \frac{27}{a} \Omega/km$

$\Rightarrow a$  är ledar-area i  $mm^2$

## Induktans

Magnetisk påverkan mellan ledarna som beror på ledarnas radie och avstånd mellan varandra. Vid ledarplacering i liksidig triangel fås

$$L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \left( \frac{\mu_r}{4} + \ln \left( \frac{d}{r} \right) \right)$$

där  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} Vs/Am$  är den magnetiska permeabiliteten i vakuum,  $\mu_r$  är relativ permeabilitet,  $d$  är avstånd mellan ledarna och  $r$  är ledarnas radie.



## Kapacitans

- Ledare som är i närheten av andra ledare eller jord fungerar som kondensatorer.
- Ledningens kapacitans beror på ledarens yta (diameter och längd) samt avstånd mellan ledarna.
- Upp till 50kV kan kapacitanserna försummas.
- Vid längre ledningar och högre spänningar, t.ex. i transmissionsnätet, ger kapacitansen en märkbar påverkan.

## Andra läckströmmar

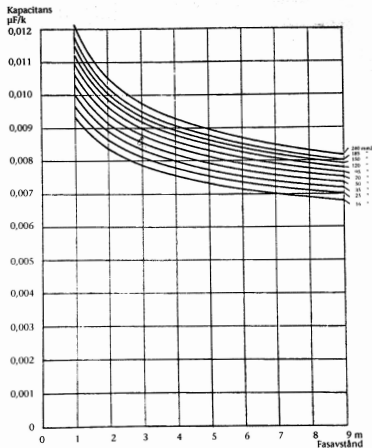
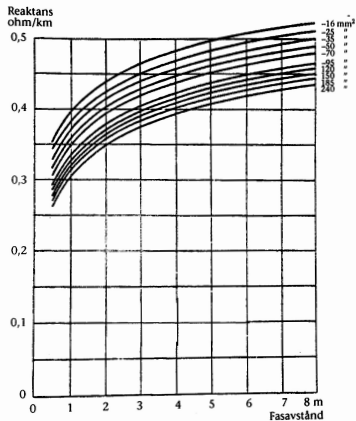
- Viss läckström uppstår genom isolatorerna vid högre spänningar. Denna väderberoende läckström är i stort sett försumbar under normala förhållanden.
- Högspänningsledningar kan även råka ut ett glimningsfenomen eller s.k. koronaeffekt som uppstår när luftens dielektriska hållfasthet överskrids.

# Exempel på krafledningar: Koronaeffekt

Exempel på Koronaeffekt på 500kV ledning



# Egenskaper hos ledare: Två bilder

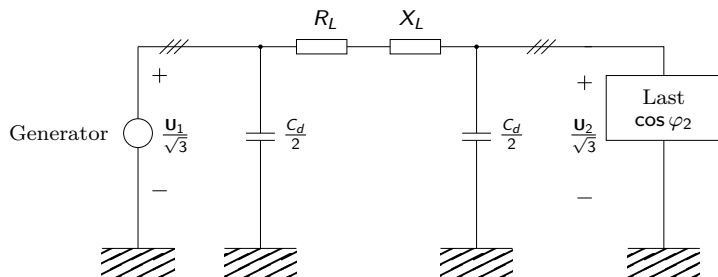


# Egenskaper hos ledare: Sammanfattning

- Vid överslagsberäkningar kan man i princip räkna med  $C_d \approx 0.008 \mu\text{F}$  per km
- För normalt utförda ledningar kan man anta  $X_L \approx 0,4 \Omega$  per km och fas
- Ledningens impedans kan skrivas som  $Z_L = R_L + jX_L \Omega$ . Vid stora ledningar med grova linor kan resistansen vara försumbar i förhållande till reaktansen.

# Modell av kraftledare: PI-Schemat (Stora $\pi$ , dvs $\Pi$ )

Medellånga ledare modelleras enligt ett ekvivalent  $\Pi$ -schema där ledningskapacitansen har delats upp i två lika delar. För korta ledare tas endast induktans och resistans med (dvs kapacitansen försummas).

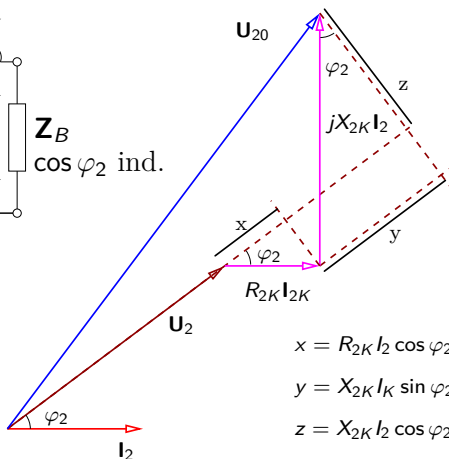
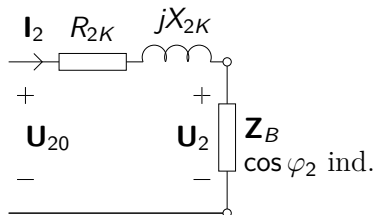


$0 \text{ km} < l \leq 50 \text{ km}$   $\Rightarrow$  Kort ledare (Endast  $R_L$  och  $X_L$ )

$50 \text{ km} < l \leq 200 \text{ km}$   $\Rightarrow$  Medellång ledare (Hela schemat)

$200 \text{ km} < l$   $\Rightarrow$  Lång ledare (Överkurs)

# Nicht ideal 1-fas Transformator: Spannungsfall



$$x = R_{2K} I_2 \cos \varphi_2$$

$$y = X_{2K} I_2 \sin \varphi_2$$

$$z = X_{2K} I_2 \cos \varphi_2 - R_{2K} I_2 \sin \varphi_2$$

$$U_{20} = \sqrt{(U_2 + R_{2K} I_2 \cos \varphi_2 + X_{2K} I_2 \sin \varphi_2)^2 + (X_{2K} I_2 \cos \varphi_2 - R_{2K} I_2 \sin \varphi_2)^2}$$

# Spänningsfall: Härledning

Vi hade sedan tidigare spännings-sambanden för 3-fas-transformatorn. Vi insättning av  $U_{20} = U_1$ ,  $R_{2K} = R_L$  och  $X_{2K} = X_L$  fås

$$\frac{U_1}{\sqrt{3}} = \sqrt{\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} + R_L I_2 \cos \varphi_2 + X_L I_2 \sin \varphi_2\right)^2 + \left(X_L I_2 \cos \varphi_2 - R_L I_2 \sin \varphi_2\right)^2}$$

Vidare kan vi sätta in

$$\begin{aligned} P_2 &= \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \implies \\ \implies I_2 \cos \varphi_2 &= \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \implies \\ \implies I_2 \sin \varphi_2 &= \frac{Q_2}{\sqrt{3} \cdot U_2} \end{aligned}$$

Vilket alltså ger

$$U_1 = U_2 \sqrt{\left(1 + \frac{P_2 \cdot R_L + Q_2 \cdot X_L}{U_2^2}\right)^2 + \left(\frac{P_2 \cdot X_L - Q_2 \cdot R_L}{U_2^2}\right)^2}$$

# Spänningsfall uttryckt i effekt

I anläggningstekniska sammanhang vill man vanligen räkna med aktiva och reaktiva effekter istället för strömmar och fasförskjutningar.

Det är därför praktiskt att uttrycka spänningsfallsformeln i effekt enligt följande.

$$U_1 = U_2 \sqrt{\left(1 + \frac{P_2 \cdot R_L + Q_2 \cdot X_L}{U_2^2}\right)^2 + \left(\frac{P_2 \cdot X_L - Q_2 \cdot R_L}{U_2^2}\right)^2}$$

**Notera:** Vid användning av den effektbaserade spänningsfallsformeln för medellånga ledare så används  $Q_{2,\text{Tot}} = Q_2 + Q_{C_d/2}$  i formeln ovan.

På så sätt kan fasförskjutningen som uppstår p.g.a. ledningskapacitansen härförs till lasten.



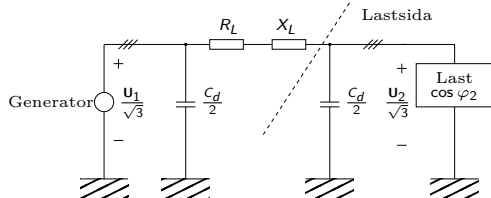
# Beräkningsexempel

En industrianläggning förbrukar vid full drift 25 MW vid  $\cos \varphi = 0,8$  ind. Matningen till industrianläggningen är en 100 km lång trefas luftledning av koppar och med ledararea  $95 \text{ mm}^2$ . Ledningens reaktans är  $X_L = 0,4 \Omega$  per km och fas. Dess driftskapacitans är  $C_d = 0,01 \mu\text{F}$  per km och fas. Frekvensen hos nätet är 50Hz. Beräkna

- Spänningen i generatoränden om spänningen hos mottagaren skall vara 70kV.
- Total aktiv och reaktiv effektförlust  $P_F$  och  $Q_F$  i a).
- Total avgiven aktiv och reaktiv effekt från generatorn.

## Beräkningsexempel: Lösning a)

Ledaren i uppgiften är medellång så vi kan räkna på ett  $\pi$ -schema med  $C_d/2$  i varje ände enligt nedan.



Vi väljer att baka in det reaktiva effektbehovet från lastsidan i lastens reaktiva effektbehov för att kunna använda uttrycket för spänningsfall. Vi har

$$P_2 = 25 \text{ MW}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_{\text{Load}} - Q_{\text{Ledare}} = P_2 \tan \varphi - 3 \cdot \left( \frac{U_2}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \frac{C_d}{2} = \\ &= 18.75 - 0.77 = 17.93 \text{ MVar} \end{aligned}$$

## Beräkningsexempel: Lösning a)

Vidare har vi att

$$R_L = 17,2 \cdot 100/95 = 18.10 \Omega$$

$$X_L = 0,4 \cdot 100 = 40 \Omega$$

Instoppat i spänningsfallsformeln får vi då

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \sqrt{\left(1 + \frac{P_2 \cdot R_L + Q_2 \cdot X_L}{U_2^2}\right)^2 + \left(\frac{P_2 \cdot X_L - Q_2 \cdot R_L}{U_2^2}\right)^2} = \\ &= 70 \text{ kV} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{25 \cdot 18,4 + 17,93 \cdot 0,4}{70^2}\right)^2 + \\ &+ \left(\frac{25 \cdot 0,4 - 17,93 \cdot 18,4}{70^2}\right)^2} \approx 86.7 \text{ kV} \end{aligned}$$

## Beräkningsexempel: Lösning b), c)

Börja med att räkna ut strömmen ur den skenbara effekten enligt

$$S_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \quad \text{och} \quad S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} \implies$$
$$\implies I = \frac{\sqrt{25^2 + 17,9^2} \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 70 \cdot 10^3} = 253,75 \text{ A}$$

Vi får då

$$P_F = \text{Resistansförlust} = 3 \cdot R_L \cdot I^2 = 3,56 \text{ MW}$$

$$Q_F = 3 \cdot X_L \cdot I^2 = 7,75 \text{ MVar}$$

Den totalt avgivna aktiva och reaktiva effekten blir

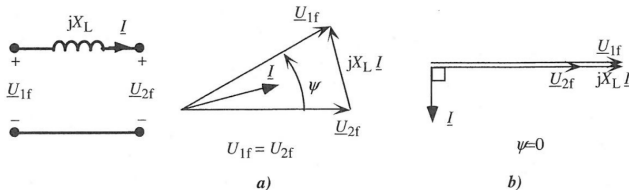
$$P_1 = P_2 + P_F = 28,6 \text{ MW}$$

$$Q_1 = Q_2 - 3 \cdot \left( \frac{U_1}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 2\pi \cdot f \frac{C_d}{2} + Q_F = 24,5 \text{ MVar}$$

**Notera:**  $Q_F$  är bara delen från ledningens reaktans,  $Q_{C_d}$  bokförs alltså separat. (I det här fallet i två delar för sig).

# Vinkelskillnad vid effektöverföring

Vi har sett ur seriereaktansen, som dominerar för långa ledare ger upphov till ett spanningsfall.



Figur 2.15 Effektöverföring på induktiv ledning: a) överföring av enbart aktiv effekt och b) överföring av enbart reaktiv effekt.

Ur figuren ser man att det krävs en **vinkelskillnad** för att överföra **aktiv** effekt och en **amplitudskillnad** för att överföra **reaktiv** effekt.

Serieinduktansen  $X_L$  begränsar alltså ledarens överföringsförmåga enligt

$$P = 3 \frac{U_{1f} \cdot U_{2f}}{X_L} \sin \Psi \implies P_{\max} = 3 \frac{U_{1f} \cdot U_{2f}}{X_L}$$

# Högspänd likspänning

- 3-fas kraftledningar kan inte läggas på havsbotten p.g.a. för hög shuntkapacitans.
  - HVDC som ju använder likspänning har inte detta bekymmer och kan därför även läggas på havsbotten.
  - Typiska data på HVDC länkar är f.n.  $\pm 400$ -500 kV och 1-1,5 kA vilket alltså ger 800-1500 MW
  - HVDC används framför allt på överföringar till havs, för överföring mellan osynkroniserade nät samt för mycket långa landförbindelser där de låga förlusterna väger tyngre än förlusterna för omriktningen.
- ⇒ Även installationskostnaden väger naturligtvis tungt