

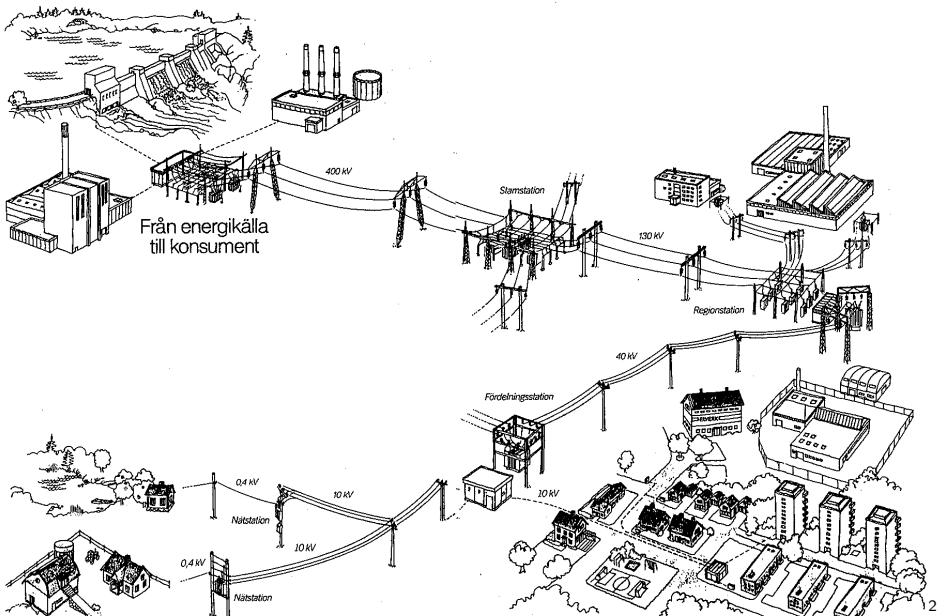
Fö 9 - TMEI01 Elkraftteknik

Elektrisk kraftöverföring och personfaran

Christofer Sundström

2 mars 2020

Elsystemet



- 1 Tekniska utmaningar
 - Matchning
 - Distribution
- 2 3-Fas kraftöverföring
 - Exempel på varianter
 - Egenskaper hos ledare
 - Modell av kraftledare
 - Spänningsfall
 - Beräkningsexempel
- 3 Högspänd likspänning
- 4 Personfaran

Tekniska utmaningar - Matchning

All energi som produceras måste konsumeras i princip samtidigt. Frekvensen i elnätet styrs av skillnaden mellan producerad och konsumerad effekt.

$$J\dot{\omega} = T_{\text{mek}} - T_{\text{el}}$$

Här är J är den totala tröghetsmassan hos alla anslutna synkronmaskiner.

Utmaning 1: Matchning

2010 fanns det i Sveriges elsystem ca 3100 generatoraggregat varav ca 1300 är vindkraftverk. Driften av dessa måste alltså på något sätt samordnas.

Utmaning 2: Maxeffekt

Maximalt effektbehov måste alltid finns tillgänglig som effektreserv i systemet

Vilka kraftverk körs normalt:

- Den kraft som är billigast att producera körs i princip alltid.
 - Den rörliga kostnaden för sol och vind är nära noll.
- För bränsleeldade kraftverk ligger priset i nivå med driftskostnaden.

Undantag: Driftkostnaden för vattenkraft är låg men den tillgängliga mängden är begränsad. Ägarna sparar gärna för att använda när priset är högt. Den totala magasinkapaciteten i Sveriges vattenkraft är ca 34 TWh (Jämför med 65 TWh/år totalt).

Vid mycket höga priser används ineffektiva kondenskraftverk någonstans i systemet. Att vattenkraften används vid högprislägen minskar användningen av dessa kraftverk.

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.

Benämning	Användning	Spänning	Typisk Effekt
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.

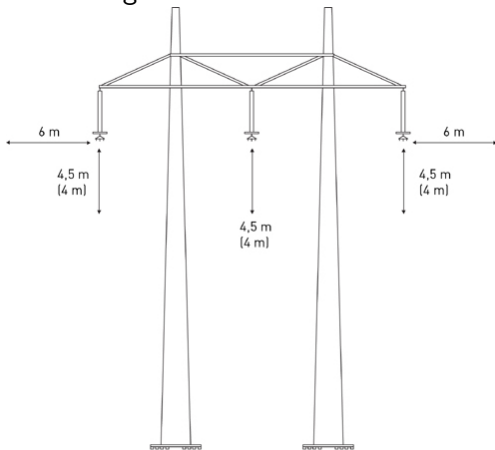
Exempel på krafledningar - Transmissionsnät

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

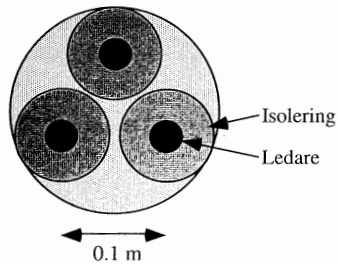
Siffror inom parentes anger 220 kV

Exempel på krafledningar - Transmissionsnät

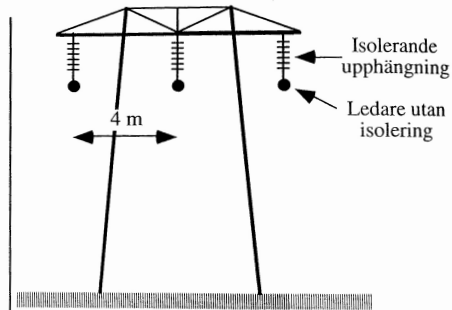
Dubbel 200 kV ledning



Exempel på krafledningar - Regionnät



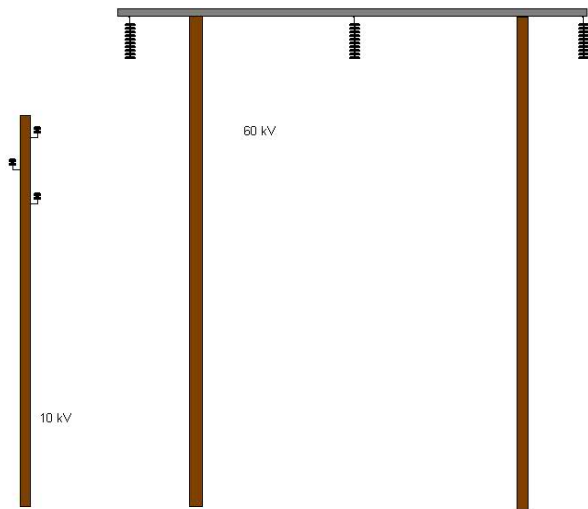
130 kV Jordkabel



130 kV Luftledning

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

Exempel på krafledningar - Distributionsnät / Regionnät



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. 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, μ_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

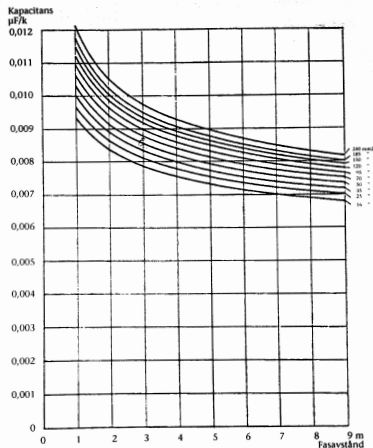
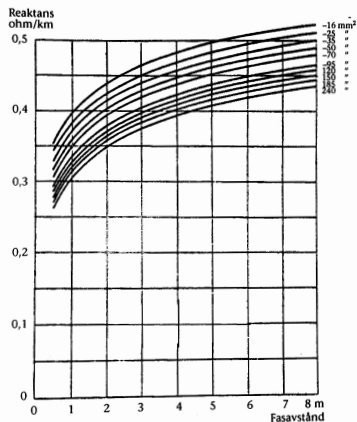
- Viss läckström uppstår genom isolatorerna vid högre spänningar. Denna väderberoende läckström är i stort sett försumbar under normala förhållanden.
- Högspänningsledningar kan även råka ut ett glimningsfenomen eller s.k. koronaeffekt som uppstår när luftens dielektriska hållfasthet överskrids.

Exempel på krafledning: Koronaeffekt

Exempel på Koronaeffekt på 500kV ledning



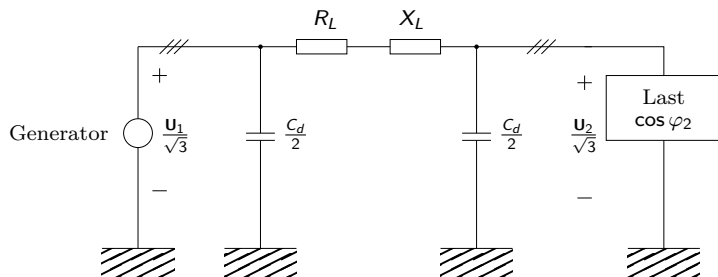
Egenskaper hos ledare: Två bilder



- 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 π , dvs Π)

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

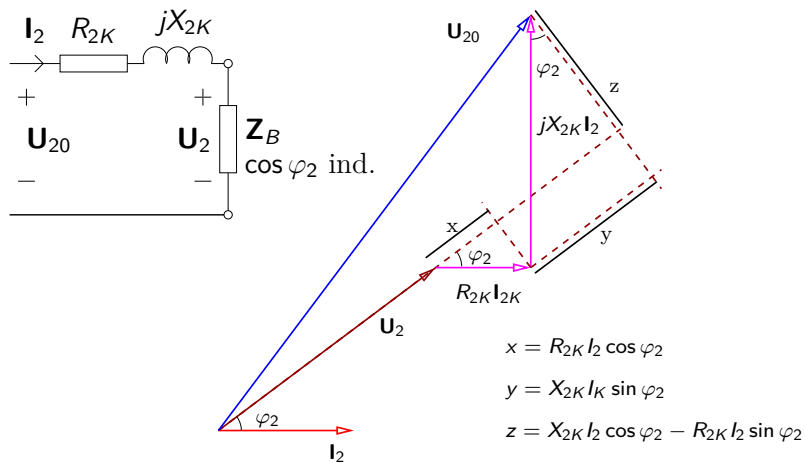


$0 \text{ km} < l \leq 50 \text{ km} \Rightarrow$ Kort ledare (Endast R_L och X_L)

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

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

Nicht ideal 1-fas Transformator: Spannungsfall



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

Spänningsfall (kort ledare): Härledning

Vi hade sedan tidigare spännings-sambanden för 3-fas-transformatorn. Vi insättning av $U_{20} = U_1$ fås

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

Vidare kan vi sätta in

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \cdot \cos \varphi_2 \implies$$

$$\implies I \cos \varphi_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2}$$

$$Q_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \cdot \sin \varphi_2 \implies$$

$$\implies I \sin \varphi_2 = \frac{Q_2}{\sqrt{3} \cdot U_2}$$

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.

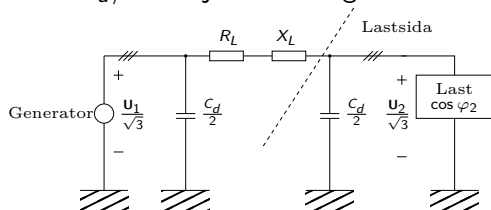
På så sätt kan fasförskjutningen som uppstår p.g.a. ledningskapacitansen härförs till lasten.

Ett pappersbruk förbrukar 40 MVA, $\cos \varphi = 0,85$ ind. Matningen till bruket är en 80 km lång trefas luftledning av koppar och med ledararea 100 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 120kV.
- 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 Π -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

$$P_2 = 40 \cdot 0,85 = 34 \text{ MW}$$

$$\begin{aligned} Q_{2,\text{Tot}} &= Q_{\text{Load}} + Q_{C_d/2} = P_2 \tan \varphi - 3 \cdot \left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \frac{C_d}{2} = \\ &= 21,07 - 1,81 = 19,26 \text{ MVar} \end{aligned}$$

Beräkningsexempel: Lösning a)

Vidare har vi att

$$R_L = 17,2 \cdot 80/100 = 13,76 \Omega$$

$$X_L = 0,4 \cdot 80 = 32 \Omega$$

Instoppat i spänningsfallsformeln får vi då

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \sqrt{\left(1 + \frac{P_2 \cdot R_L + Q_{2,\text{Tot}} \cdot X_L}{U_2^2}\right)^2 + \left(\frac{P_2 \cdot X_L - Q_{2,\text{Tot}} \cdot R_L}{U_2^2}\right)^2} \\ &= 120 \text{ kV} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{34 \cdot 10^6 \cdot 13,76 + 19,26 \cdot 10^6 \cdot 32}{120000^2}\right)^2 +} \\ &\quad + \left(\frac{34 \cdot 10^6 \cdot 32 - 19,26 \cdot 10^6 \cdot 13,76}{120000^2}\right)^2} \approx 129,2 \text{ kV} \end{aligned}$$

Beräkningsexempel: Lösning b), c)

Börja med att räkna ut strömmen ur den skenbara effekten enligt

$$S_{2,\text{Tot}} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \quad \text{och} \quad S_{2,\text{Tot}} = \sqrt{P_2^2 + Q_{2,\text{Tot}}^2} \implies$$
$$\implies I = \frac{\sqrt{34^2 + 19,26^2} \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 120 \cdot 10^3} = 188 \text{ A}$$

Vi får då

$$P_F = \text{Resistansförlust} = 3 \cdot R_L \cdot I^2 = 1,46 \text{ MW}$$

$$Q_F = 3 \cdot X_L \cdot I^2 = 3,39 \text{ MVAr}$$

Den totalt avgivna aktiva och reaktiva effekten blir

$$P_1 = P_2 + P_F = 35,46 \text{ MW}$$

$$Q_1 = Q_{2,\text{Tot}} - 3 \cdot \left(\frac{U_1}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 2\pi \cdot f \frac{C_d}{2} + Q_F = 20,84 \text{ MVAr}$$

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

- 3-fas kraftledningar svåra att lägga på havsbotten p.g.a. för hög shuntkapacitans.
 - HVDC som använder likspänning har inte detta bekymmer.
 - Typiska data på HVDC länkar är f.n. ± 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

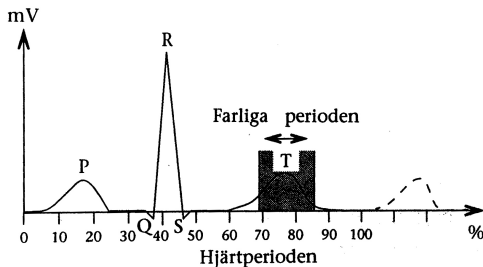
Elolycksfall - Varför vi har bestämmelser kring elinstallationer

- Olycksfall delas in i tre huvudgrupper
 - Ljusbågar
 - Strömgenomgång (vid beröring)
 - Höga temperaturer
- Ljusbågar uppstår när två spänningssatta delar kommer tillräckligt nära för att överslag ska ske. (Luften klarar ca 3MV/m beroende på geometri)
- Höga temperaturer uppstår p.g.a. förluster i ledare eller annan underdimensionerad del och medför främst brandrisk men även risk för brännskador. Även ljusbågar vid glappkontakt ger höga temperaturer.
- Strömgenomgång kan t.ex. uppstå när en person samtidigt får kontakt med två spänningsförande delar med olika potential.

- Farlig spänning anses vara en spänning vid växelström och direkt jordat system som överskrider 75V mellan ledare och jord.
- Skadetyperna delas ofta upp enligt
 - Vävnadsskador som uppstår p.g.a. strömvärme $W = RI^2 \cdot t$.
 - Funktionsstörningar som uppstår p.g.a. att strömmen slår ut kroppens signaler
- De skador som uppstår i människokroppen beror på strömmens storlek och strömmens varaktighet
 - Muskelkramp 10-20mA
 - Andningsbesvär 20-30mA
 - Hjärtkammerflimmer 50-100mA
 - Inre skador vid strömmar kring några A.

Funktionsstörningar

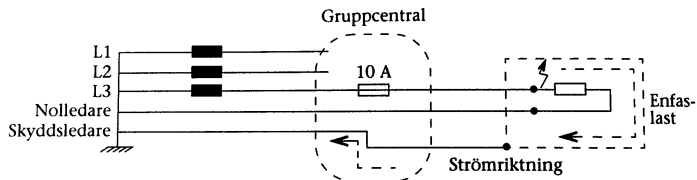
- Likspänning är i det närmaste ofarligt när det gäller funktionsstörningar (dock ej strömvärme!)
- Kritiska frekvenser för kroppen är ca 15-100 Hz
 - Kramptillstånd
 - Hjärtflimmer
 - Nervskador



Figur 12.2 EKG: P förmakskontraktion, Q-R-S kammarkontraktion, T återställning. Vulnerabla fönster är streckat i figuren.

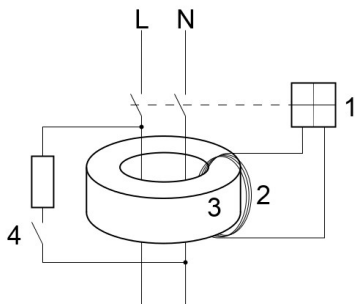
Skydd mot farlig spänning

Ex: Skyddsjordning



Figur 11.4 Skyddsjordning av en enfaslast.

- En Y-kopplad transformator med utdragen nolledare matar en gruppcentral med en inkopplad säkring på 10A.
- Nolledaren hos transformatorn är förbunden med marken
- En extra-ledare med samma potential som nolledaren agerar skyddsjord.
- Höljet till den elektriska lasten ansluts till skyddsjorden och kan därmed aldrig få farlig potential.



Copyright (GFDL) - Markus Matern
(Converted from SVG)

- 1 Elektromagnet och hjälpelektronik
 - 2 Strömtransformatorns sekundärspole
 - 3 Kärna
 - 4 Testbrytare
- L Fasledare
N Neutralledare

- En Jordfelsbrytare mäter summaströmmen mellan en eller fler faser och nolla, och bryter om det saknas ström i kretsen.
- För personskydd bryter jordfelsbrytaren vanligen vid 30mA och för brandskydd vanligen 300mA