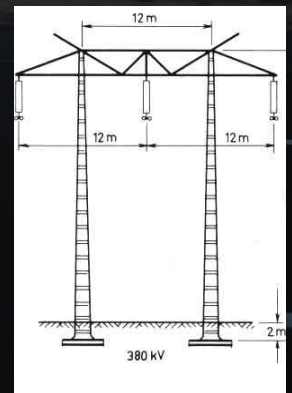


Föreläsningsmaterialet bygger på  
material av:  
Olov Samuelsson – Lund  
Tomas Jonsson – LiU/Scania

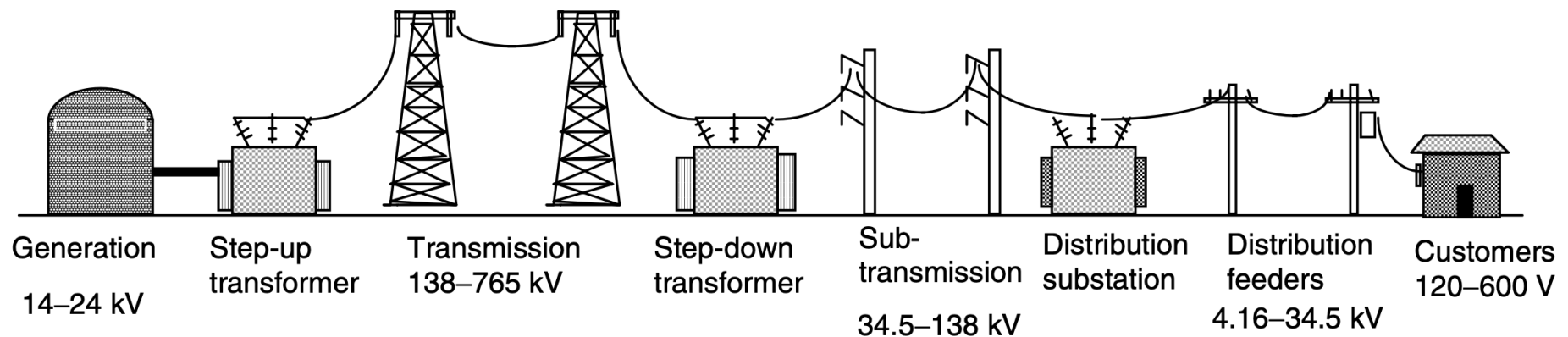
# TSFS17 Elkraftsystem Fö 3 Kraftöverföring AC HVDC

Lars Eriksson, professor  
ISY, Fordonssystem



# 1. AC Transmissionssystem och ledare

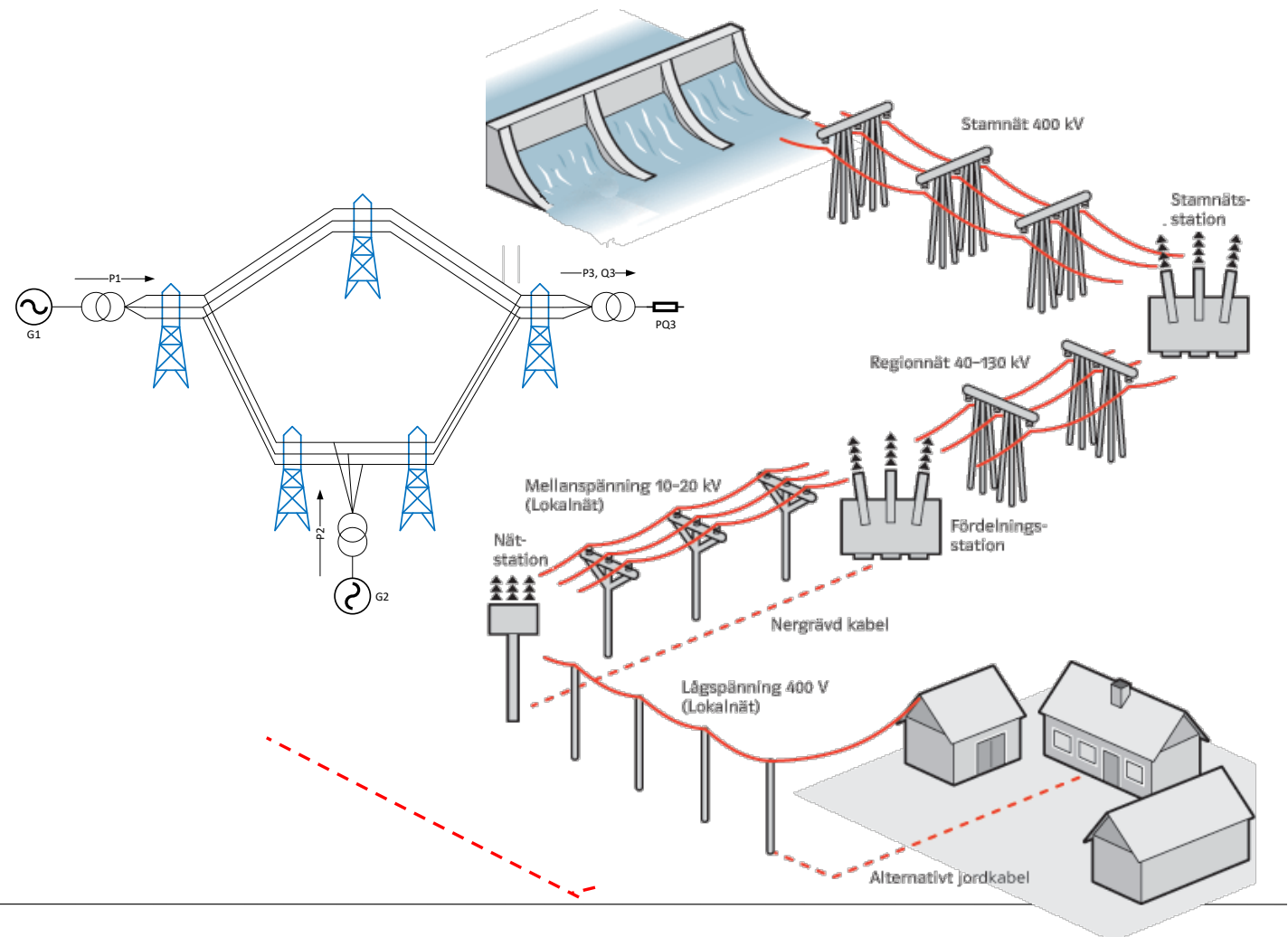
# En-dimensionell bild av Elkraftsystemet



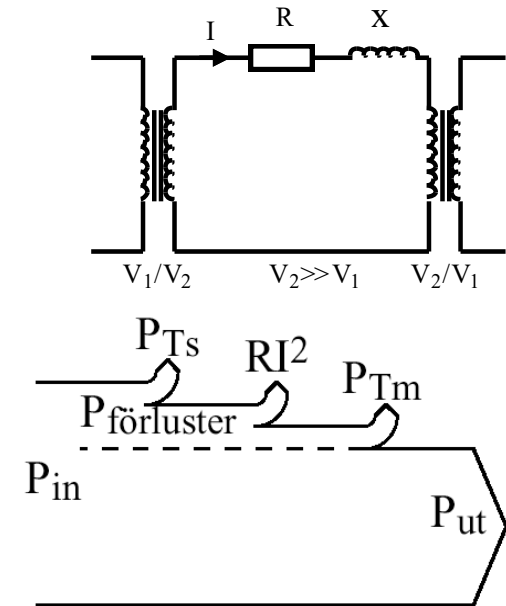
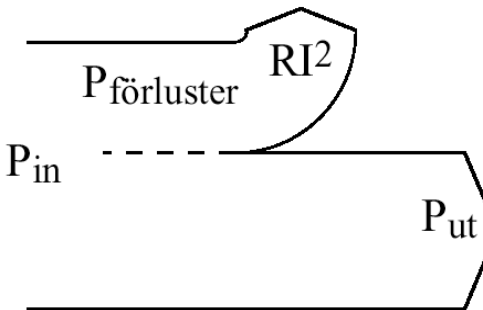
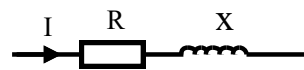
Transmissionsnätet i Sverige  
17 000 km ledningar  $\frac{3}{4}$  400 kV,  $\frac{1}{4}$  220 kV  
200 transformator och kopplingsstationer.

# Översikt

- Varför högspänning?
- Kraftledningsstolpen
- Kabel
- Effektöverföring
- Transformatorn
- Transmission
- Nätverksmodellering
- HVDC



# Högspänning lönsamt

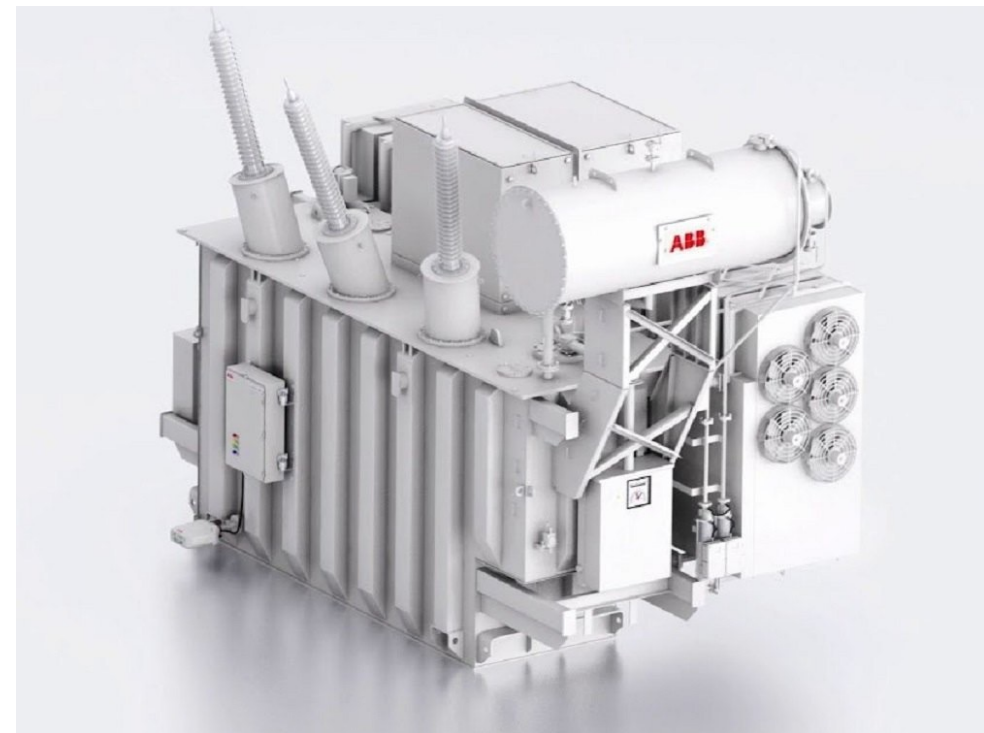


• Höjning av spänningen minskar ström och  $RI^2$ -förluster

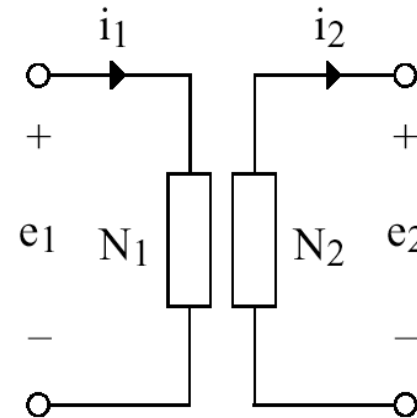
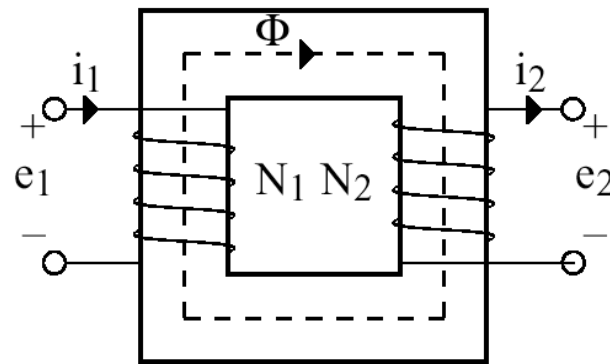
- Exempel: 400 V  $\rightarrow$  400 kV ger  $10^{-3}$  x ström och  $10^{-6}$  x förlusteffekt
- Exempel: 400 kV-ledning,  $r=14$  mm, 1000 A,  $\cos\phi=0.87 \rightarrow$  600 MW, 90 kW förluster
- 400 V,  $r=14$  mm, 600 MW,  $\cos\phi=0.87 \rightarrow$  1000 kA  $\rightarrow$  90 GW förluster
- 400 V, 600 MW,  $\cos\phi=0.87 \rightarrow$  1000 kA  $\rightarrow$  90 kW förluster om  $r=14$  m

# Transformator

- Byter spänningsnivå
- Ner till ca 0,5 % förluster
- För enfas och trefas
- Energiomvandling
  - El till el via magnetiskt flöde
- Järn och koppar
- I oljefylld tank för isolering och kylning



# Uppbyggnad enfastransformator



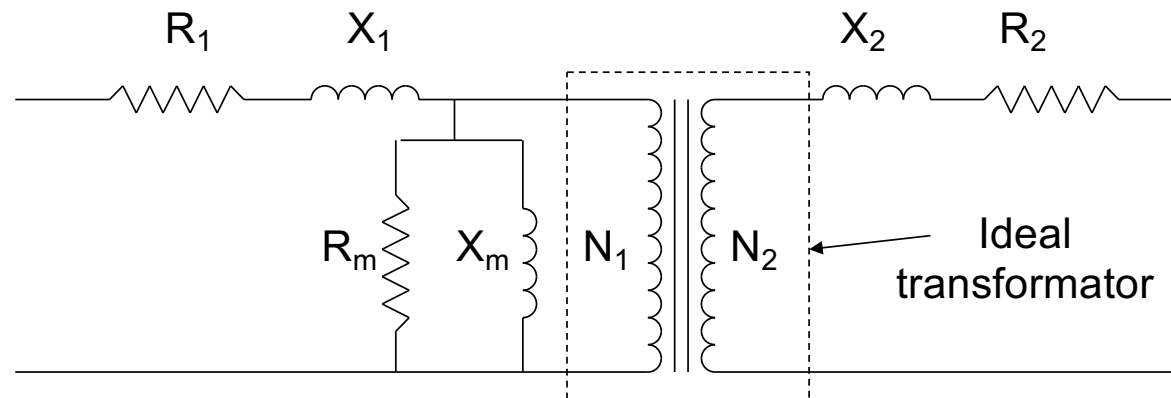
- Induktion bak- och framlänges
- MMK-balans (mmf)  $\mathcal{F} = N i$
- Om inga förluster, effekten bevaras

$$\frac{e_1}{N_1} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{e_2}{N_2} \Leftrightarrow \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \Leftrightarrow \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$e_1 i_1 = \frac{N_1}{N_2} e_2 \frac{N_2}{N_1} i_2 = e_2 i_2$$

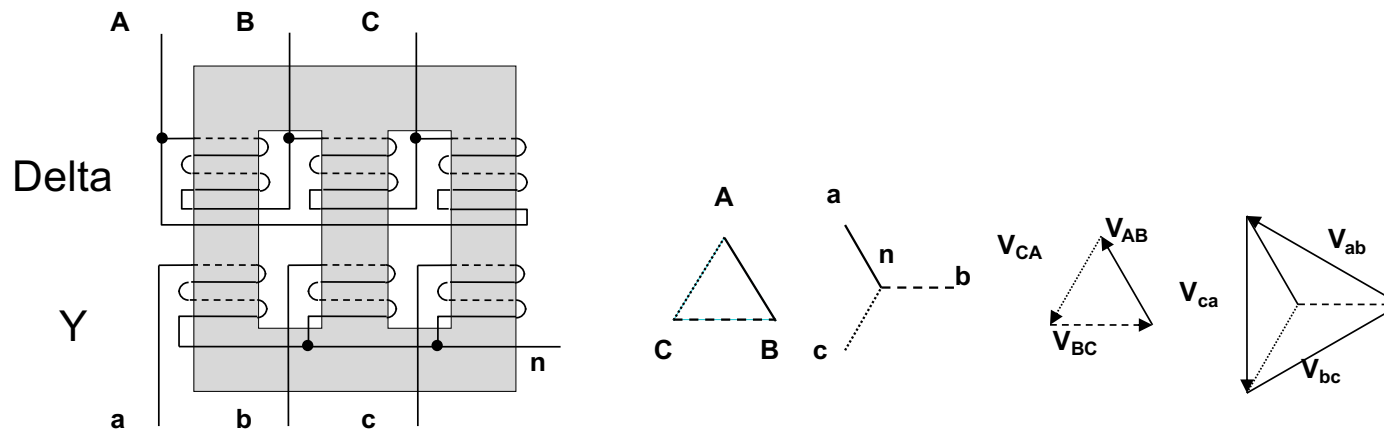
# Transformatormodell



Lindningsförluster	$\Leftrightarrow$	$R_1, R_2$
Läckflöden	$\Leftrightarrow$	$X_1, X_2$
Magnetiseringsförluster (järnförluster)	$\Leftrightarrow$	$R_m$
Huvudflöde (magnetisering kärnan)	$\Leftrightarrow$	$X_m$



# Trefastransformator



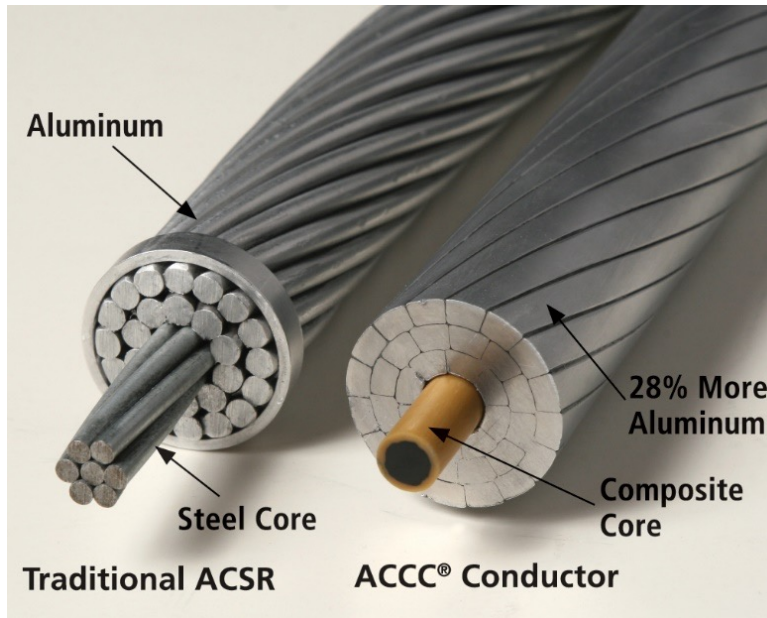
- För varje fas
  - Primär- och sekundärlindning på samma ben  
→ genomflyts av samma flöde
- Y-koppling och delta-koppling vanligast

# Kraftledningen

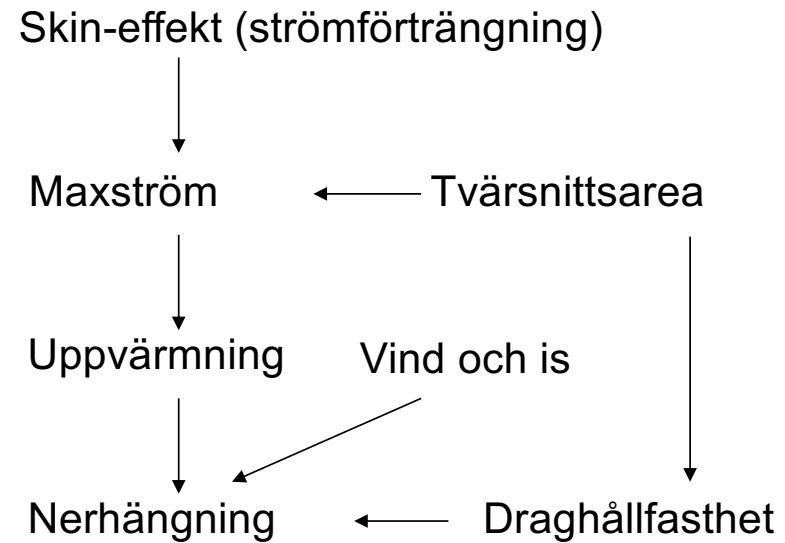


- Typ
  - ◀ • Friledning
  - Belagd ledning
  - Hängkabel
  - Kabel
- Överföra effekt
  - Ström (ledararea)
  - Spänning (isolation)

# Ström - Fasledaren



## Designfaktorer



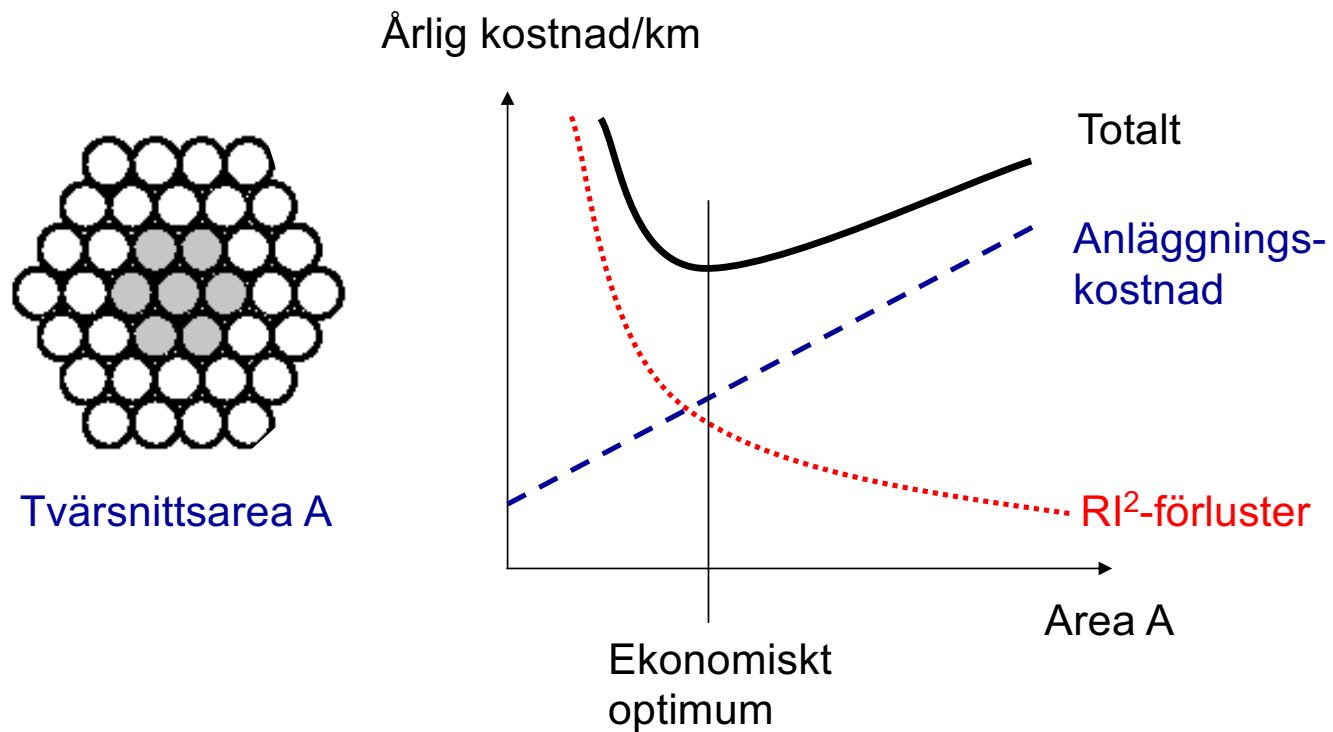
Aluminium → elektrisk ledare

Stål → mekanisk styrka

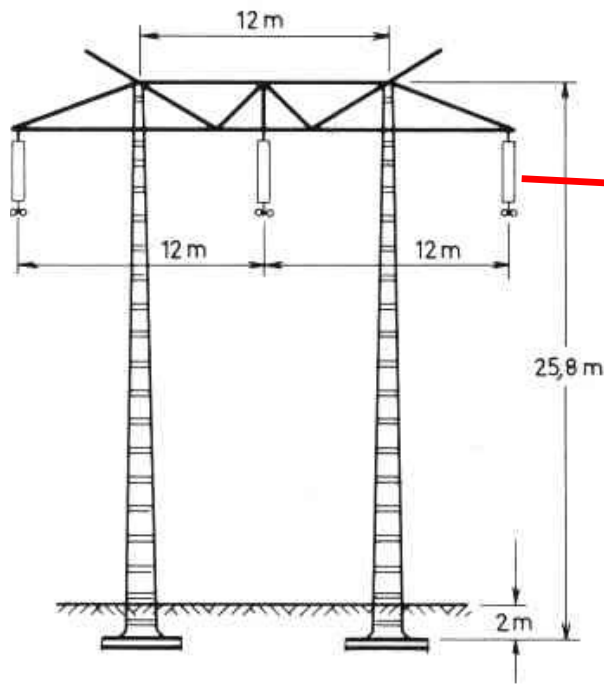
Traditionellt: ACSR= Aluminum Conductor Steel Reinforced (sv Feral)

Nytt: ACCC= Aluminum Conductor Composite Core klarar högre ström

# Ekonomisk fasledardimensionering



# Spänning - Isolation



Portalstolpe 400 kV



Keramisk tallriksisolator i isolatorkedja som fäst i stolpe (jordpotential) bär fasledare

Spänningsisolation



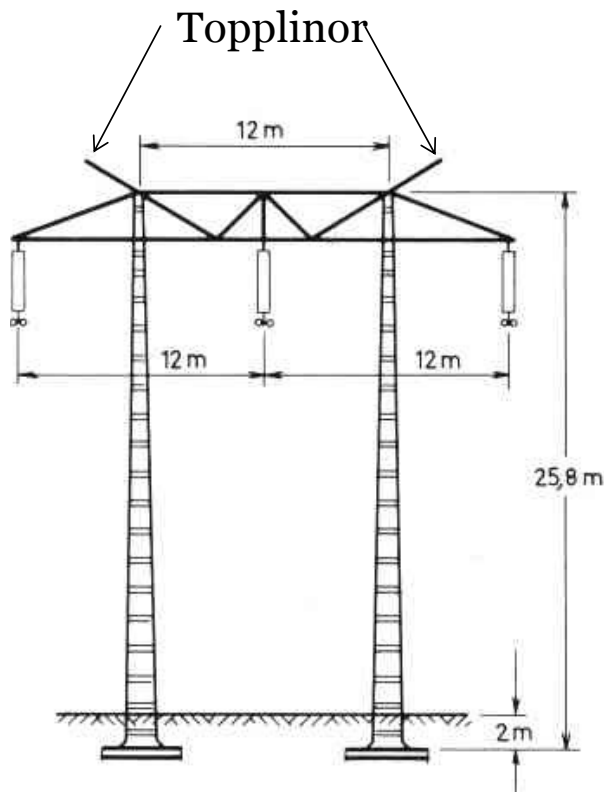
Avstånd

← Salt/fukt



Längd isolatorkedja (ca 4 m @ 400 kV)

# Spänning - Stolpen



Portalstolpe 400 kV

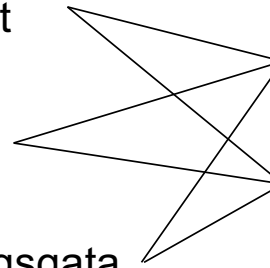
## Designfaktorer

E-fält, B-fält

Utseende

Kraftledningsgata

Blixtnedslag



Stolphöjd

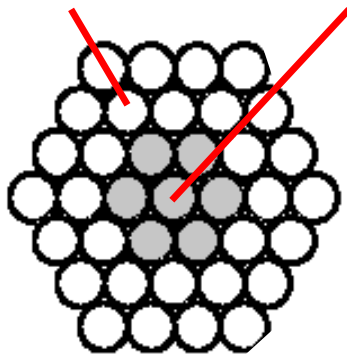
Geometri

Topplinor  
(jordpotential)

# Spänning - Fasledaren



Aluminium      Stål



Ferral-ledare (FeAl)

Spänning

E-fält vid ledare  $\sim 1/\text{radie}$

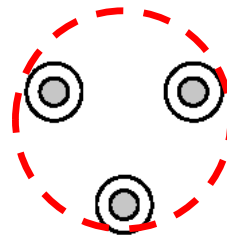
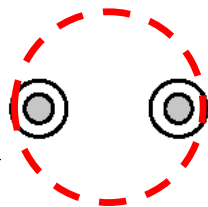
Corona-effekt

Ljud/ljus

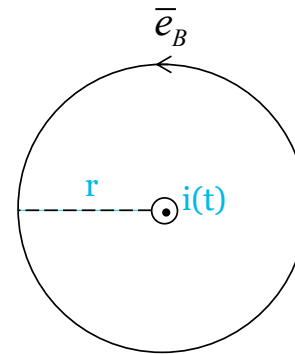
Öka ledardiametern

Tyngd +  
vindfång

Duplex (två ledare per fas) eller triplex  
ökar evivalent radie



# B-fält under kraftledning



$$\bar{B}(t, r) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \bar{e}_B$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (Vs/(Am))}$$

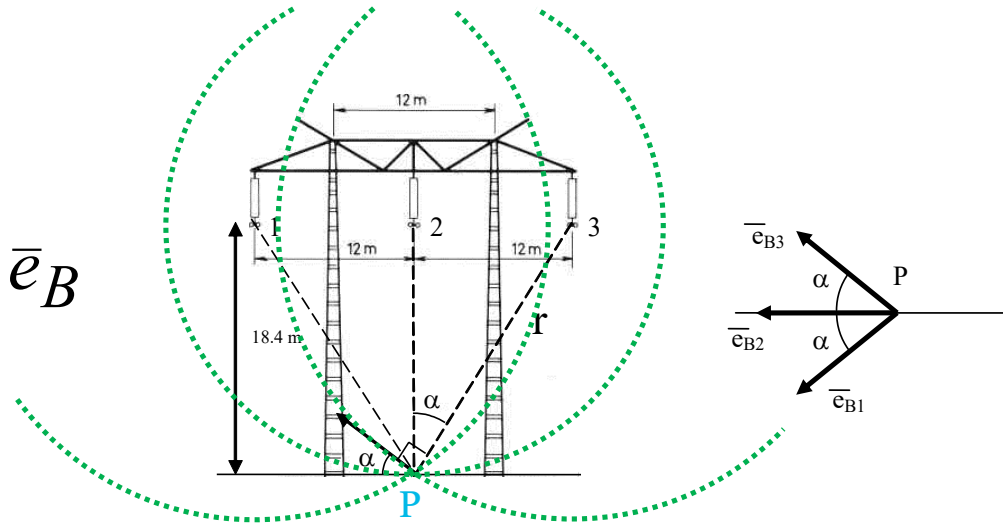
$i(t)$  ström (A)

$r$  avstånd (m)



# Fält från trefasig kraftledning

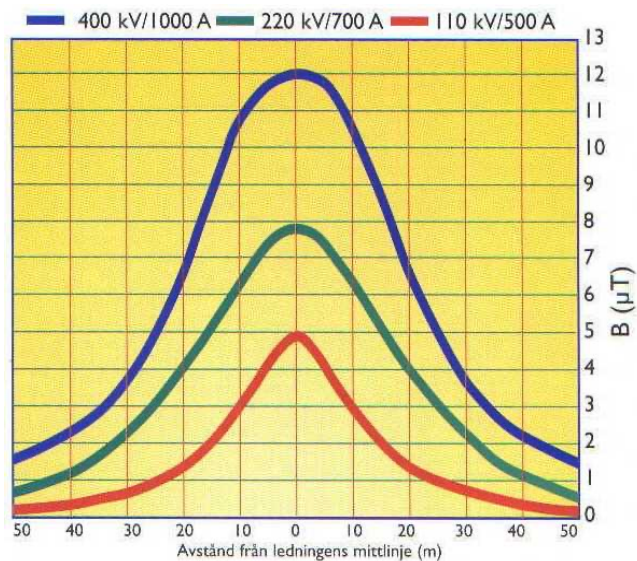
$$\bar{B}(t, r) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \bar{e}_B$$



- Fält i punkten P = summan av bidragen från de tre faserna
  1. Olika avstånd  $r$  till P från de tre fasledarna
  2. Olika  $i(t)$  i de tre fasledarna
  3. De tre fältbidragen har olika riktning  $e_B$

# B-fält

$$\bar{B}(t, r) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \bar{e}_B$$



Källa: Fingrid

- Avstånd
  - Avtar som  $1/r$
- Ström
  - Växelström
  - Trefas
  - Max(abs( $B_{\text{tot}}$ ))
- Gränsvärde Svenska Kraftnät
  - 0.4  $\mu\text{T}$  varaktig vistelse nytt
  - 4.0  $\mu\text{T}$  åtgärd befintlig ledn.

Kunskapsbank: <http://www.energiforsk.se/program/elektriska-och-magnetiska-falt/>

# E-fält

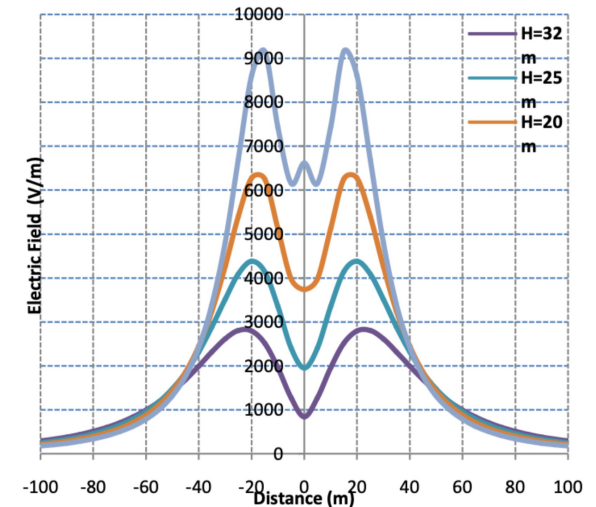
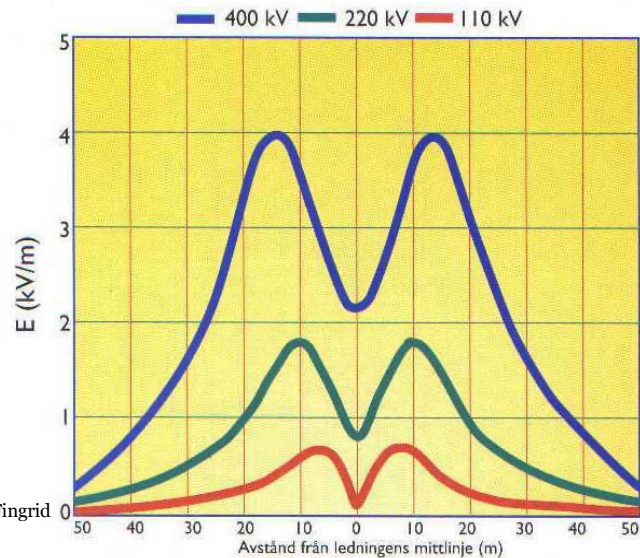


Fig. 6. Electric field distributions at one-meter above ground surface for the 1050-kV transmission line of Fig. 5 with varying height  $H_2$ .

$$\vec{E}(t, r) = \frac{\lambda(t)}{2\pi\epsilon_0 r} \vec{e}_r$$

$\lambda(t)$ =laddningar per längdenhet

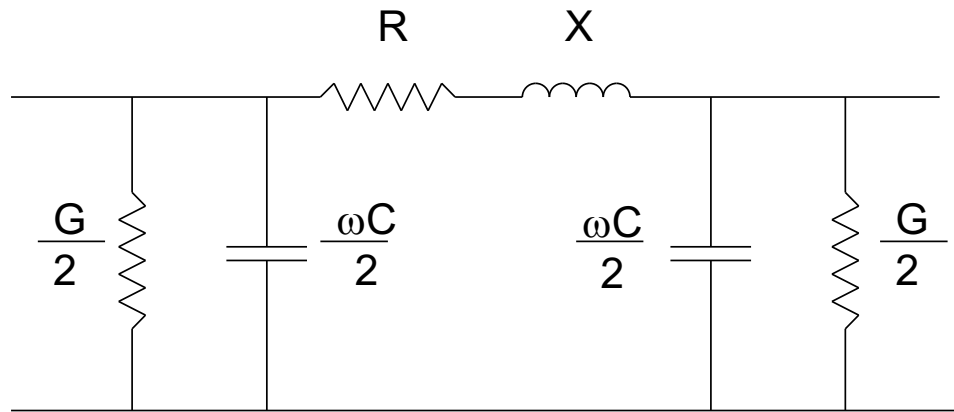
- Avtar som  $1/r$
- Fältlinjer radiellt riktade

- Spänning
  - Växelspänning
  - Trefas
  - $\text{Max}(\text{abs}(E_{\text{tot}}))$

# Kort repetition av motstånd och liknande storheter

- Resistans  $R$  [ $\Omega$ ]
- Kapacitans  $C$  [ $F$ ] Farad
- Induktans  $L$  [ $H$ ] Henry
- Reaktans  $X = \omega L$ ,  $X = \frac{1}{\omega C}$  [ $\Omega$ ]
- Impedans  $Z = R + i X$
- Konduktans  $G = \frac{1}{R}$  [ $\Omega^{-1}$ ] = [ $mho$ ] = [ $S$ ] Siemens
- Susceptans  $B$  [ $S$ ]
- Admittans  $\frac{1}{Z} = Y = G + j B$

# Ledningsmodell



nominal voltage in kV	230	345	500	765
$R'$ in $\Omega/\text{km}$	0.050	0.037	0.028	0.012
$X'_L = \omega L'$ in $\Omega/\text{km}$	0.407	0.306	0.271	0.274
$Y'_C = \omega C'$ in $\mu\text{S}/\text{km}$	2.764	3.765	4.333	4.148

**Viktigast**

Mellanviktig

Mellanviktig

*Minst viktig*

**induktans  $\rightarrow X$**

ledarresistans  $\rightarrow R$

kapacitans  $\rightarrow \omega C$

coronaförluster  $\rightarrow G$

[ $\Omega/\text{km}$ ]

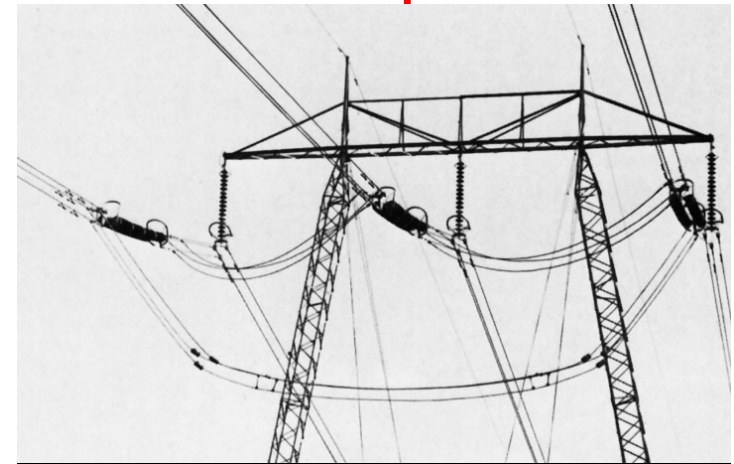
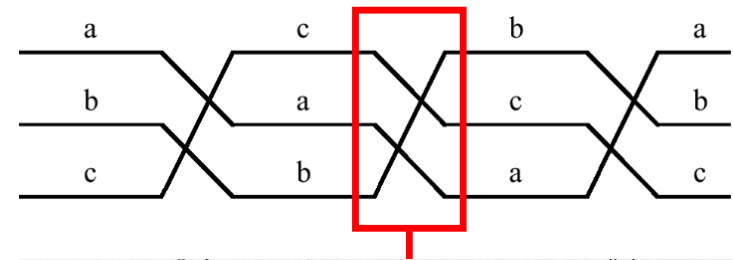
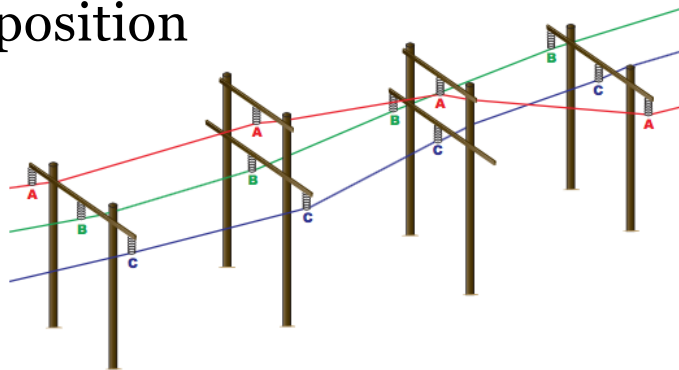
[ $\Omega/\text{km}$ ]

[ $\Omega^{-1}/\text{km}$ ]

[ $\Omega^{-1}/\text{km}$ ]

# Skruvning av fasledare ger symmetri

- Mitt≠Ytterläge
  - Faserna har olika induktans och kapacitans
- Byt plats
  - Skruvning
  - Även kallat transponering
  - Eng: Transposition



# Kabel

- Ledare isolerade
  - Från varandra
  - Från blix, snö, träd
- Stad
  - Nedgrävd
- Landsbygd
  - Nergrävd eller nerplöjd
  - Hängkabel



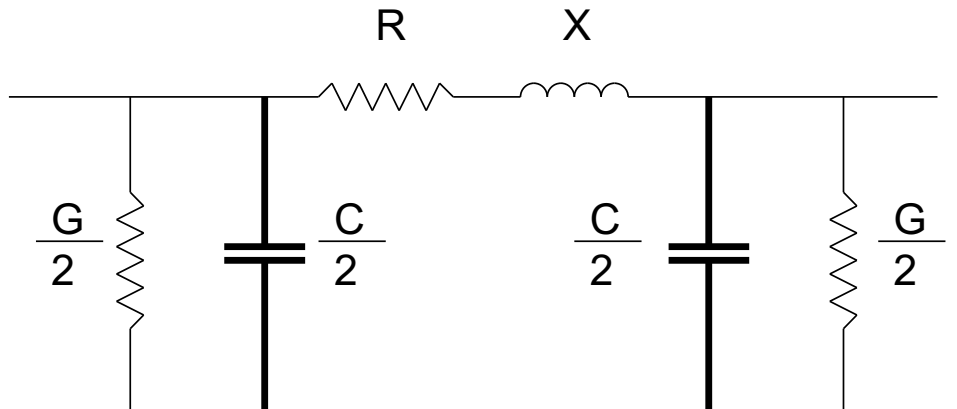
Källa: Draka (3 x) enfaskabel



Källa: Draka

Trefaskabel

# Kabelmodell



Kabel:

nominal voltage in kV	115	230	500
$R'$ in $\Omega/\text{km}$	0.059	0.028	0.013
$X'_L = \omega L'$ in $\Omega/\text{km}$	0.252	0.282	0.205
$Y'_C = \omega C'$ in $\mu\text{S}/\text{km}$	192.0	204.7	80.4

Luftledning:

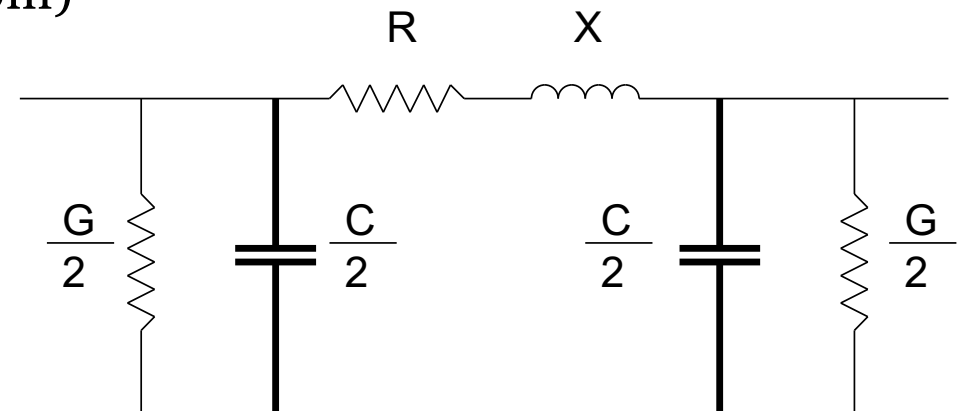
230
0.050
0.407
2.764

- Mellanviktig X seriereaktans [ $\Omega$ ]
- Mellanviktig R ledarresistans [ $\Omega$ ]
- Viktigast C kapacitans [F]**
- Minst viktig G coronaförluster [ $\Omega^{-1}$ ]*



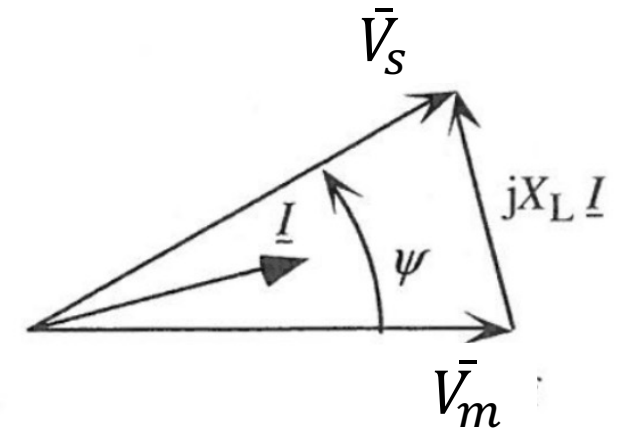
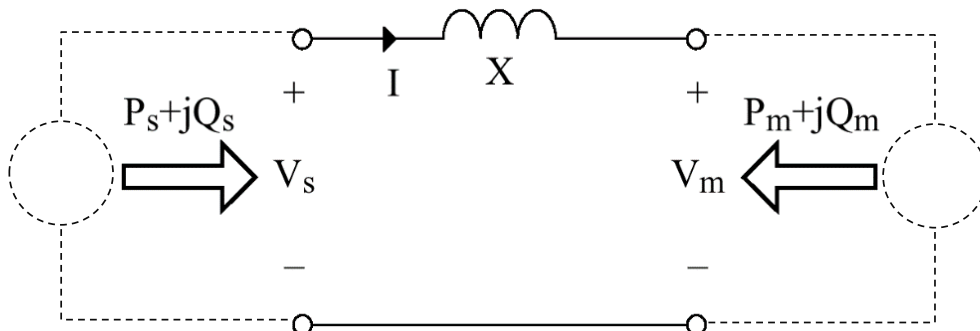
# Maxlängd AC-kabel

- C genererar  $Q_C$  varje km
- P och Q genom R och X
- $Q_C \sim$  längd, S begränsat (kabelns maxström)
  - Mindre utrymme för P
- Vid maxlängd (några mil)
  - Hela kapaciteten för Q
  - Inget utrymme för P
- DC fördelaktigare (HVDC)



# Princip för långdistans effektöverföring

X har inga aktiva förluster  $\rightarrow P_m = -P_s$



$$\bar{S}_s = P_s + jQ_s = 3 \frac{\bar{V}_s}{\sqrt{3}} \bar{I}_s^*$$

$$\bar{S}_s = 3 \frac{\bar{V}_s}{\sqrt{3}} \left( \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_m}{\sqrt{3}jX} \right)^* = j \frac{\bar{V}_s \bar{V}_s^*}{X} - j \frac{\bar{V}_s \bar{V}_m^*}{X} = j \frac{V_s^2}{X} - j \frac{\bar{V}_s \bar{V}_m^*}{X} = j \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_m}{X} (j \cos \Psi + \sin \Psi)$$

$$|P_s| = |P_m| < P_{max} = \frac{V_s V_m}{X}$$

Termen  
rent imaginär  
ingår i  $Q_s$

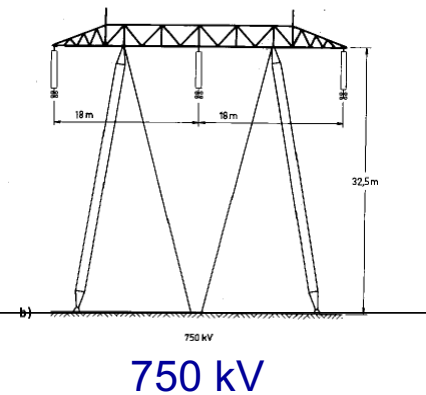
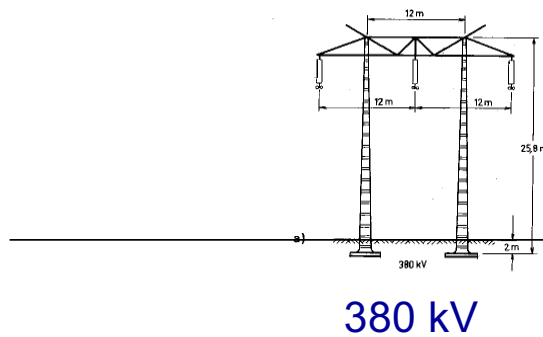
Om  $V_s = V_m$ ,  $\Psi > 0$  aktiv effekt överförs.

Om  $|V_s| > |V_m|$  överförs reaktiv effekt från s till m, och vice versa.

Frekvens styr aktiv effekt, spänning styr reaktiv effekt

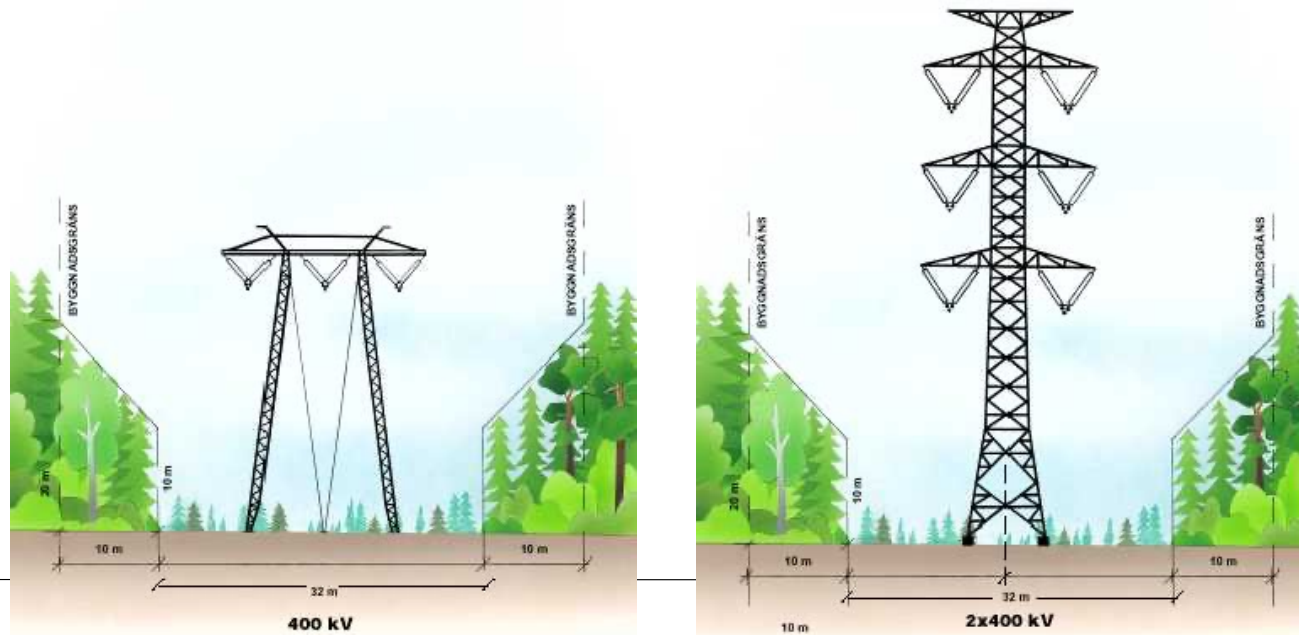
# Ökad överföringskapacitet: Höjd spänning

- Högre spänningar har införts
  - 130 kV
  - 220 kV 1936 i Sverige och världen
  - 380 kV 1952 i Sverige och världen
- Justera spänningarna
  - 380 kV blir 400 kV blir 410 kV
- 750 kV planerat på 1970-talet
  - Starkare nät för kärnkraft
  - Provsträcka N om Mälaren
  - Drivs idag som 2x400 kV

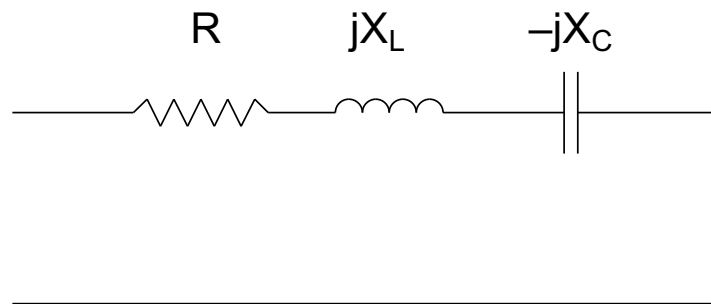


# Ökad överföringskapacitet: Fler fasledare

- Lägre serieimpedans kräver större tvärsnittsarea
- Fler ledare bättre än tjockare ledningar



# Ökad överföringskapacitet: Reaktiv seriekompensering



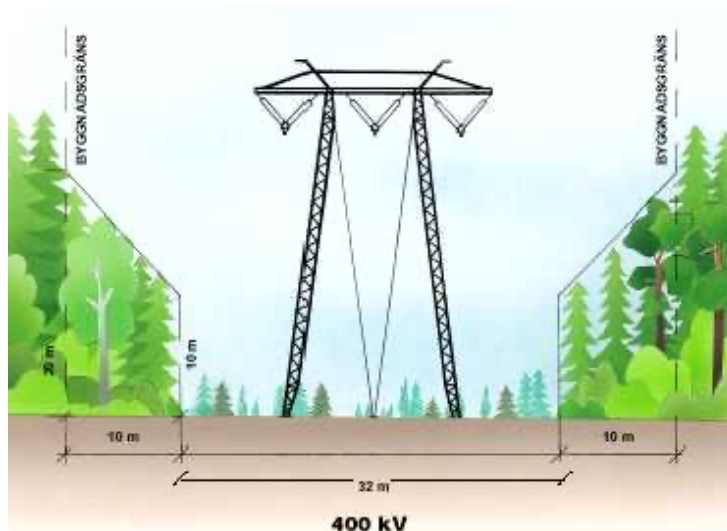
- Seriereaktans har impedans  $jX_L$
- Inför seriekondensator med  $-jX_C$
- Totalt:  $jX_L - jX_C < jX_L \approx$  Kortare ledning
- 50 % kompensation Norrland-Svealand

FACTS: Flexible AC Transmission System

Modern styrbar variant för att kompensera vid variabel last på linan.

## 2. Allt är inte styrt av teknisk utveckling och val

# Kraftledningsgata



- Begränsad yta, men totalt 1000 km<sup>2</sup> i Sverige
- Ängsmark som måste skötas, ger biologisk mångfald!
- Nyckeltal MW/m bredd



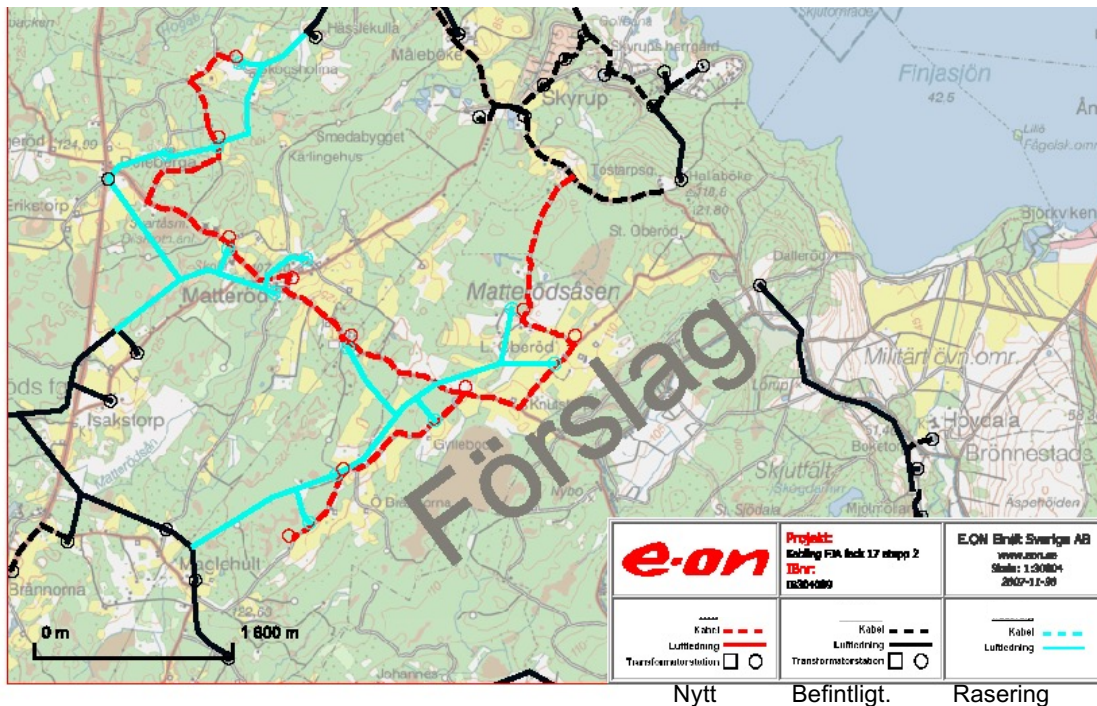
# Nytänkande



E14 vid Are



# Kabel ersätter 10 & 20 kV friledning



## Stormen Gudrun

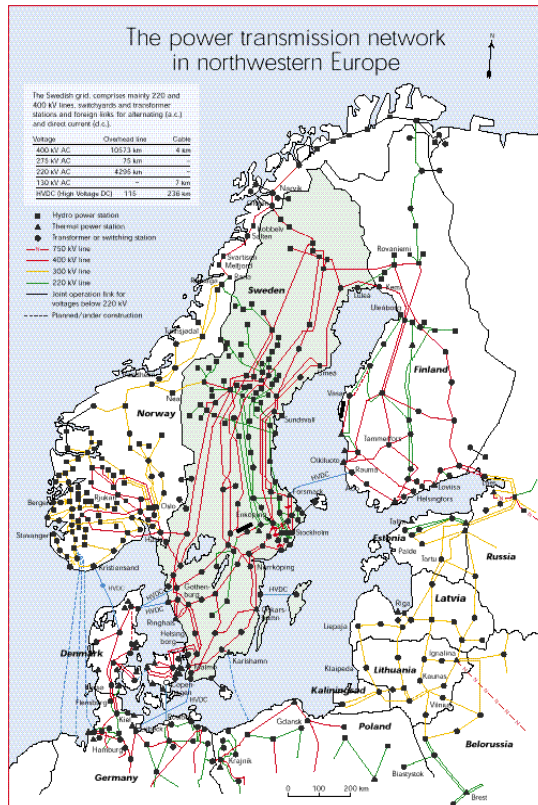
Som mest var 730 000 elabonnenter utan ström och nio människor miste livet.

Gudrun skadade 30 000 kilometer av ledningsnätet samt tvingade energi- och elbolagen att tänka om. Arbetet med att säkra elledningarna hade redan inletts, men den här stormen fick alla inblandade att öka takten. Lagändring, strömavbrott mer än 24 timmar olagligt.

Mellan 2004 och 2018 tillkom nära 7 000 mil jordkabel i högspänningsnätet. Det nät som drabbas mest vid storm.

- Efter stormen Gudrun 2005: E.ON 260000 kunder, kostnad 1.2 Mdr SEK
- Vattenfall och Ellevio har genomfört liknande projekt

# Transmissionsnät: Överbrygga avstånd



## Transmission

- Avstånd hundratals km
- Effekt hundratals MW
- Ekonomiskt  $V \approx 15\sqrt{P}$
- SE: 130, 220, 400 kV\*
- Höga tillförlitlighetskrav
- Svenska Kraftnät äger

\*) Spänningarna idag 145, 230 och 415 kV men kallas ändå ofta 130, 220 och 400 kV

# Distributionsnät: Nå adresser

## Distribution

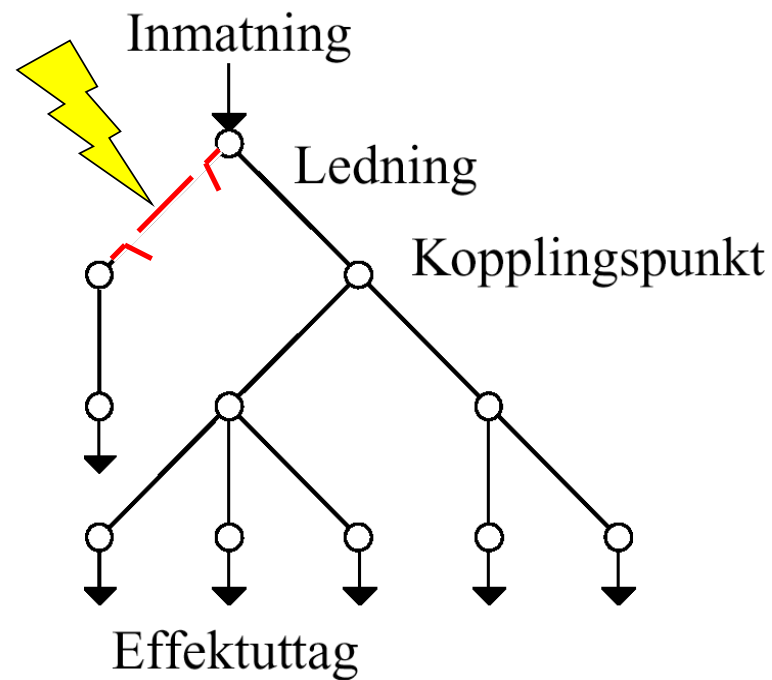
- Avstånd några km
- SE: 10, 20, 30, 50 kV
- Kommunalt elbolag (i Lund Kraftringen, Linköping TekniskaVerken) äger i staden
- Regionelbolag (i Skåne E.ON) äger på landsbygden



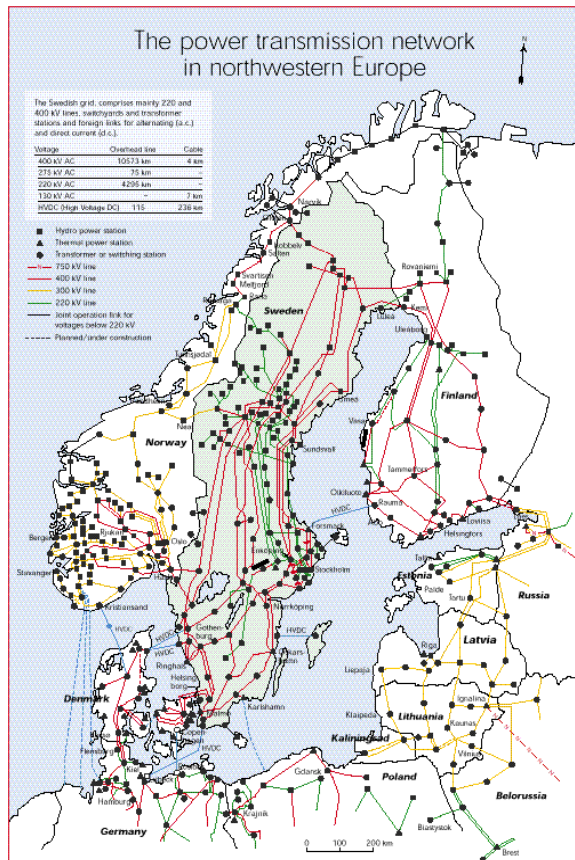
\*) Idag 11, 22, 33 och 55 kV

# Radiellt nät

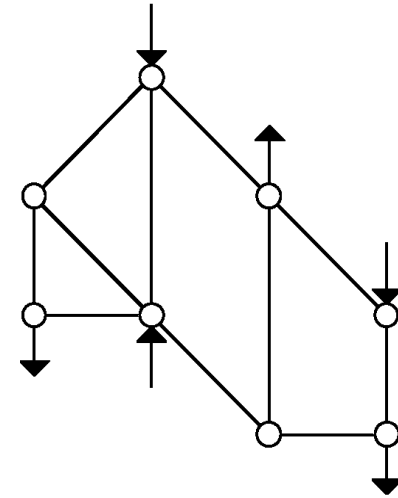
- Distribution
- Trädform
  - En inmatning
  - Många uttag
- Tillförlitlighet
  - Varje fel ger strömavbrott



# Maskat nät



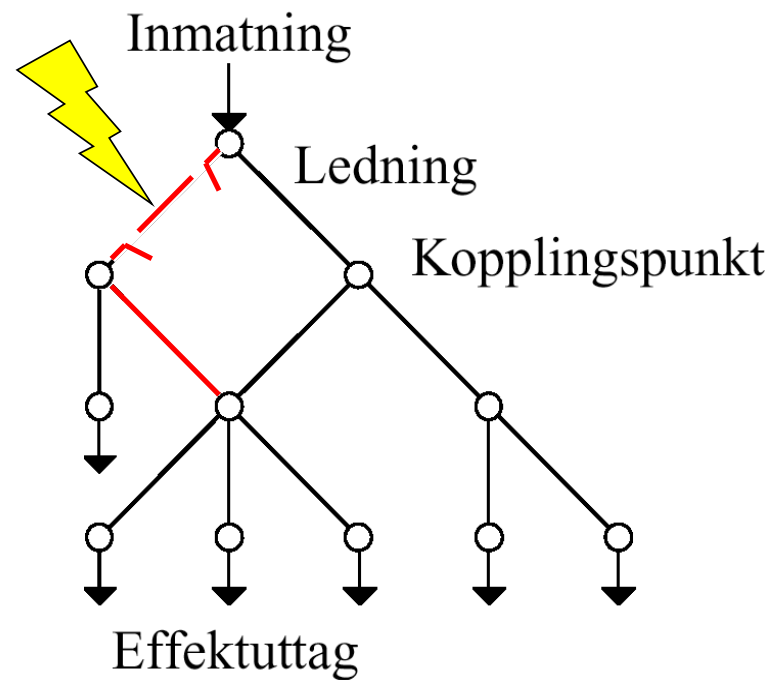
- Transmission
- Maskning
  - Flera inmatningar
  - Många uttag
  - Många strömvägar
- Tillförlitlighet
  - Inget ensamt ledningsfel ger strömavbrott
  - N-1 (alt M-1) kriterium inget godtyckligt fel får leda till avbrott.
  - I vissa ställen (städer) kan man ha N-2





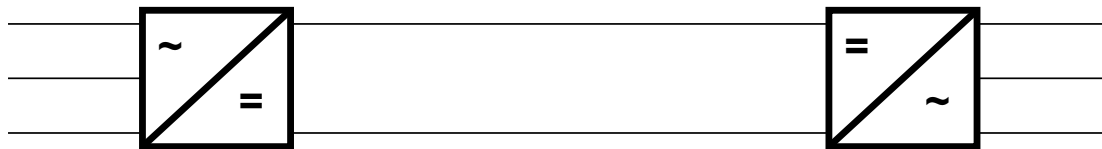
# Mellanting

- Bygg maskat
- Driv radiellt
- Tillförlitlighet
  - Varje fel ger strömavbrott
  - Snabb omkoppling
- Stadsnät

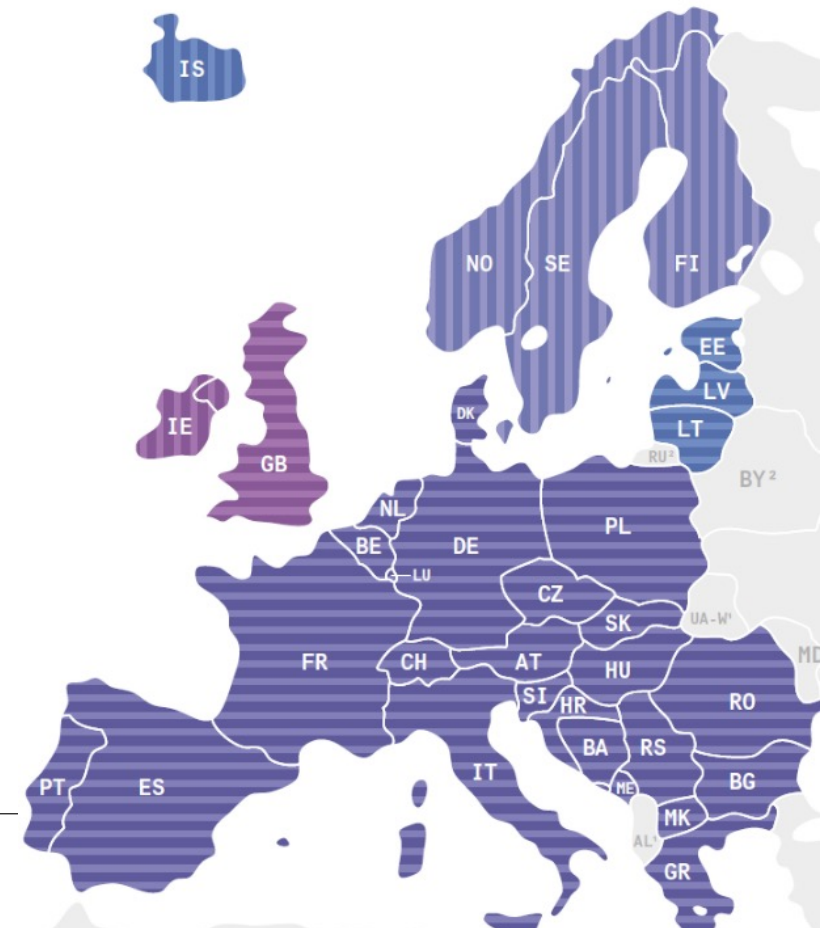


## 2. HVDC en översikt

# HVDC - High Voltage Direct Current



- Passar långa avstånd
  - AC-kabel ej möjlig (för mycket reaktiv effekt)
  - Luftledning DC billigare än trefas AC
- Passar mellan system med olika frekvens och fas
  - Japan har 50 och 60 Hz
  - Norden - kontinentaleuropa
- Goda styrmöjligheter jämfört med AC
- Kostnad för stationer dock hög

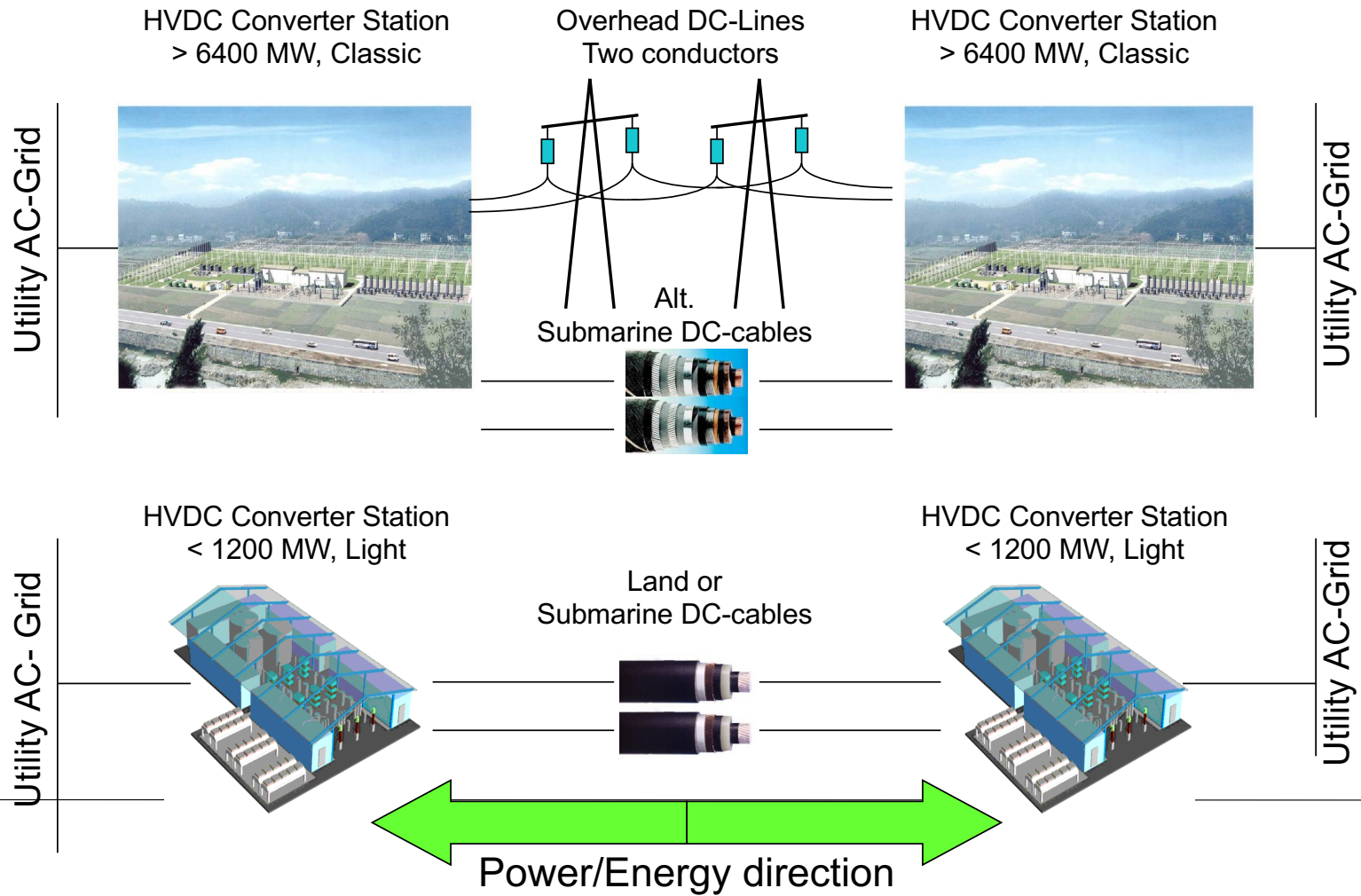




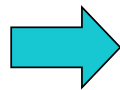
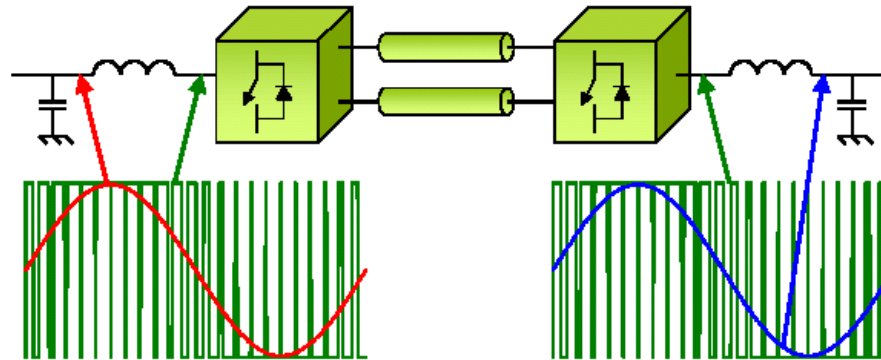
# 1st HVDC power link Gotland 20 MW subsea link 1954 av ASEA (ABB)



# Vad är ett HVDC transmissionssystem?

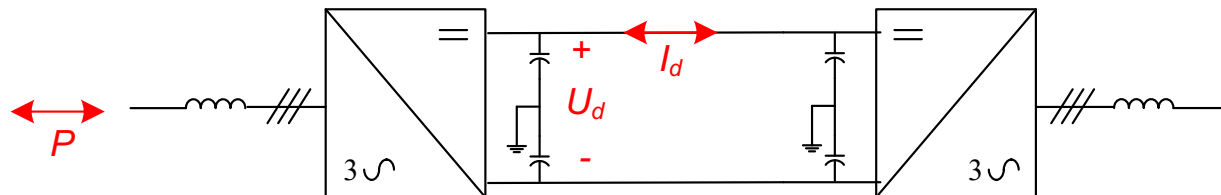


# Pulsbreddsmodulation skapar växelström

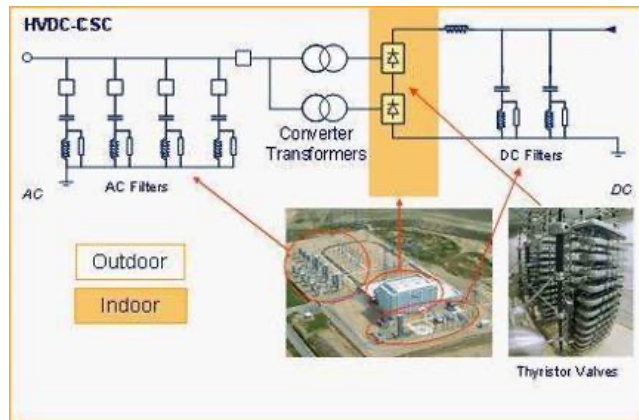


**Små filter, på både AC och DC sidorna**

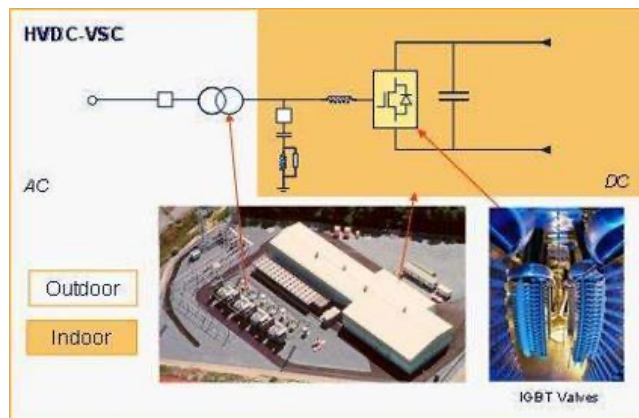
Effektriktningen styrs av DC strömmens riktning



# HVDC Tekniker

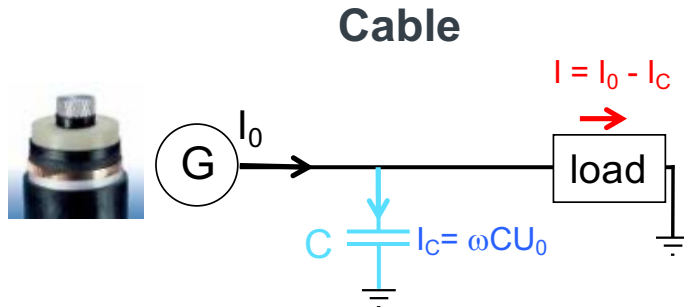


- HVDC Classic
  - Current source converters
  - Line-commutated **thyristor valves**
  - Requires 50% reactive compensation
  - Converter transformers
  - Minimum grid short circuit capacity > 2x converter rating



- HVDC Light
  - Voltage source converters
  - Self-commutated **IGBT valves**
  - Requires no reactive power compensation
  - “Standard” transformers
  - No minimum short circuit capacity, black start

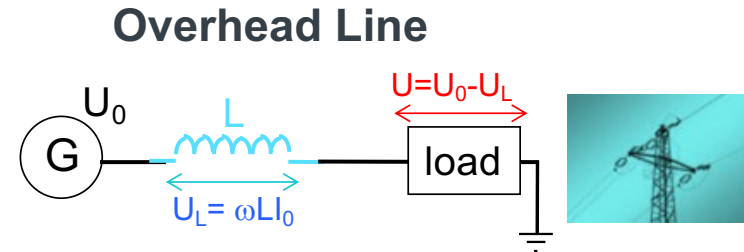
# Varför passar HVDC för långa avstånd? -Kapacitans och Induktans i transmissionskablarna



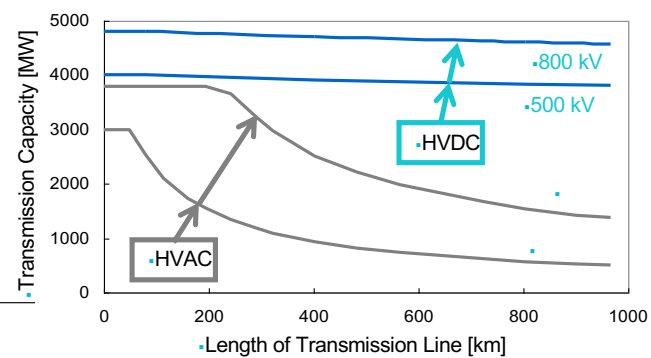
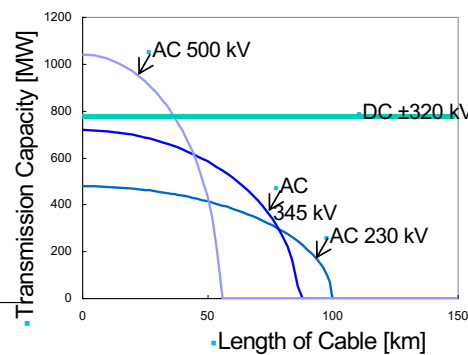
In cable > 50 km, most of AC current is needed to charge and discharge the “C” (capacitance) of the cable

⇒ C & L can be compensated by reactors/capacitors or FACTS

⇒ or by use of DC, which means  $\omega = 2\pi f = 0$



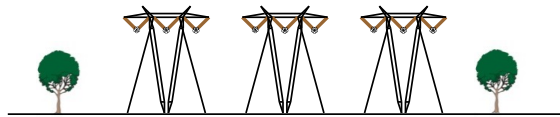
In overhead lines > 200 km, most of AC voltage is needed to overcome the “L” (inductance) of the line



# The transmission grid becomes increasingly important

## Continued development of AC and DC technologies

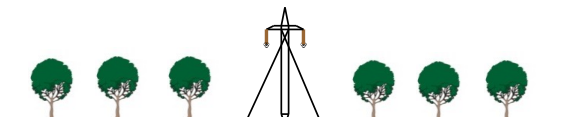
**Different technologies :Same power transmitted**



Traditional overhead line with AC



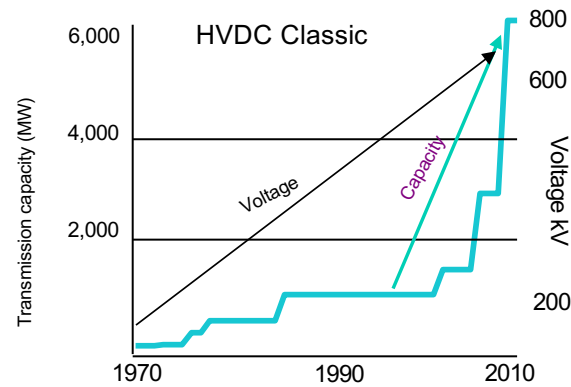
Overhead AC line with FACTS\*



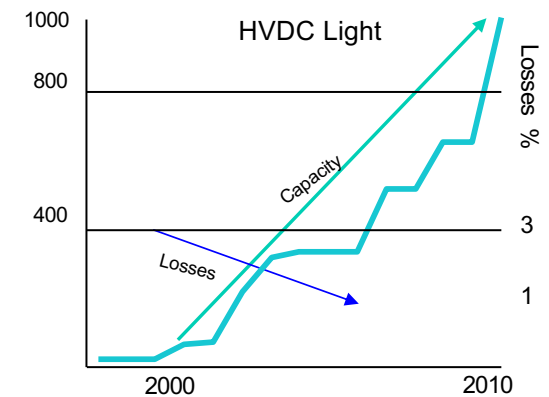
HVDC (high voltage direct current) Classic overhead line



Underground line with HVDC Light or AC cable



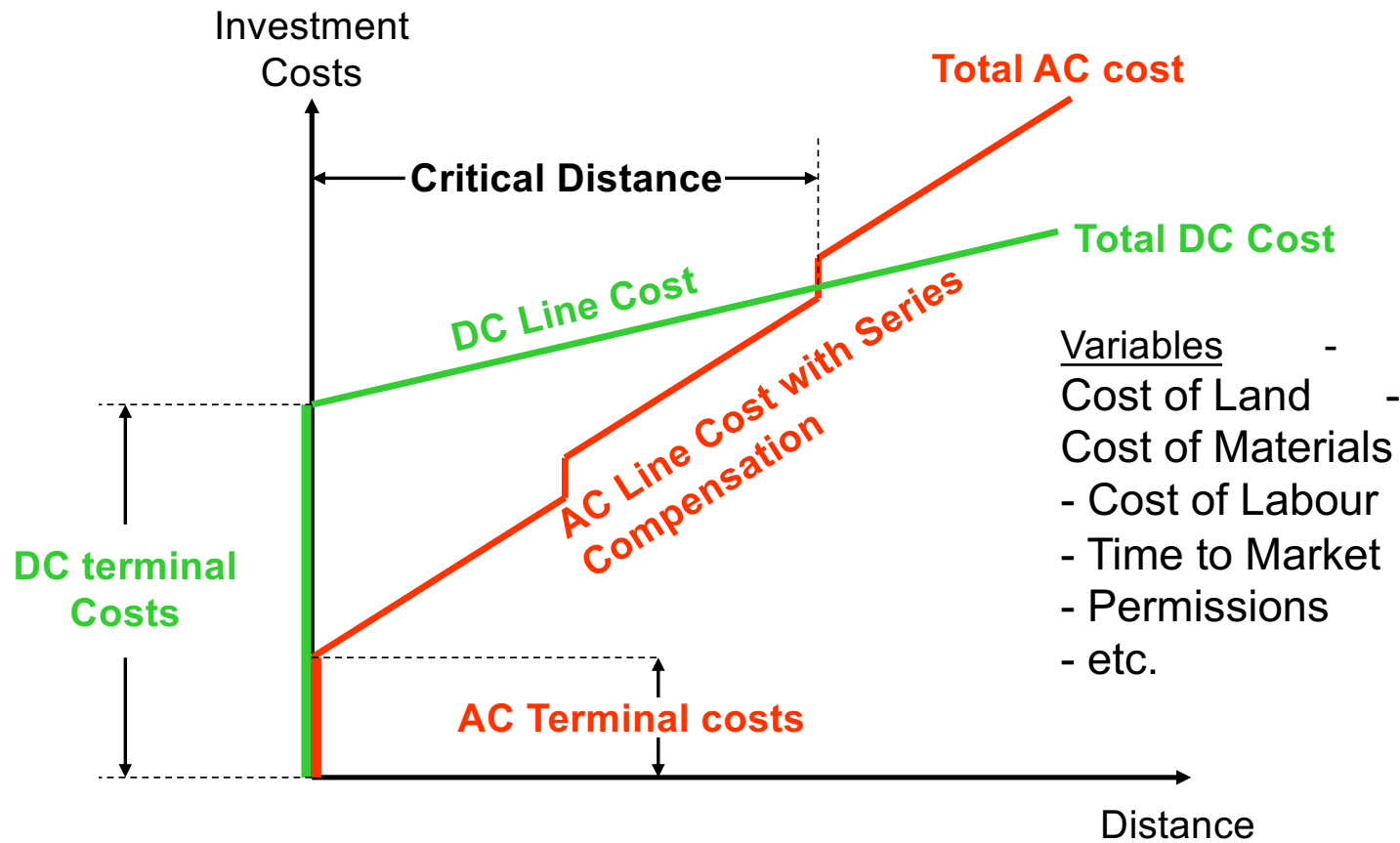
Capacity up 6x since 2000; Voltage up from +/- 100kV to +/- 800kV since 1970



Capacity up 10x ; losses down from 3% to 1% per converter station since 2000

- Longer transmission distances
- More power - lower losses - reduced cost per megawatt (MW)
- Development of power electronics, cable and semiconductor technology

# Investment cost versus distance for HVAC and HVDC





# HVDC applications



## HVDC Classic, thyristor based

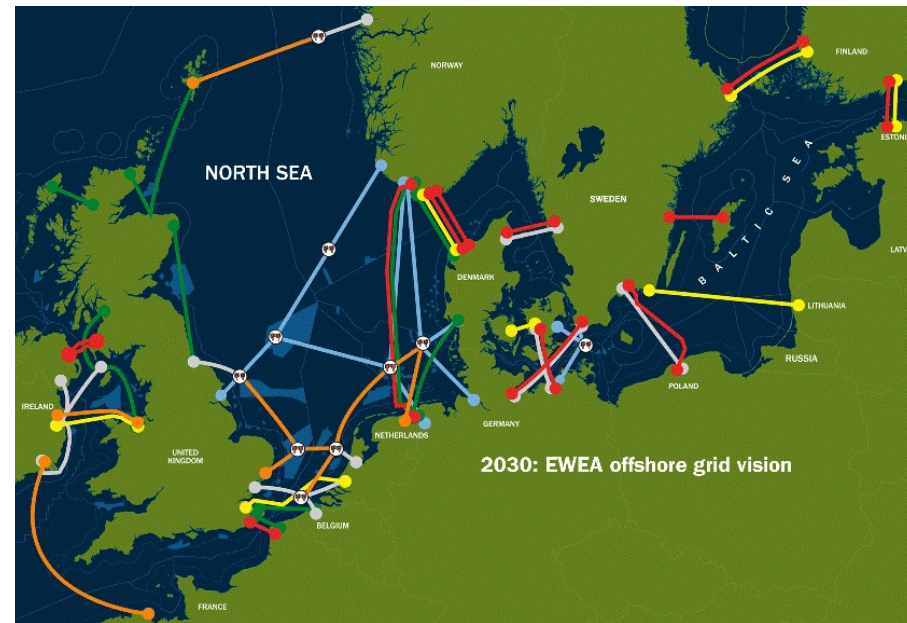
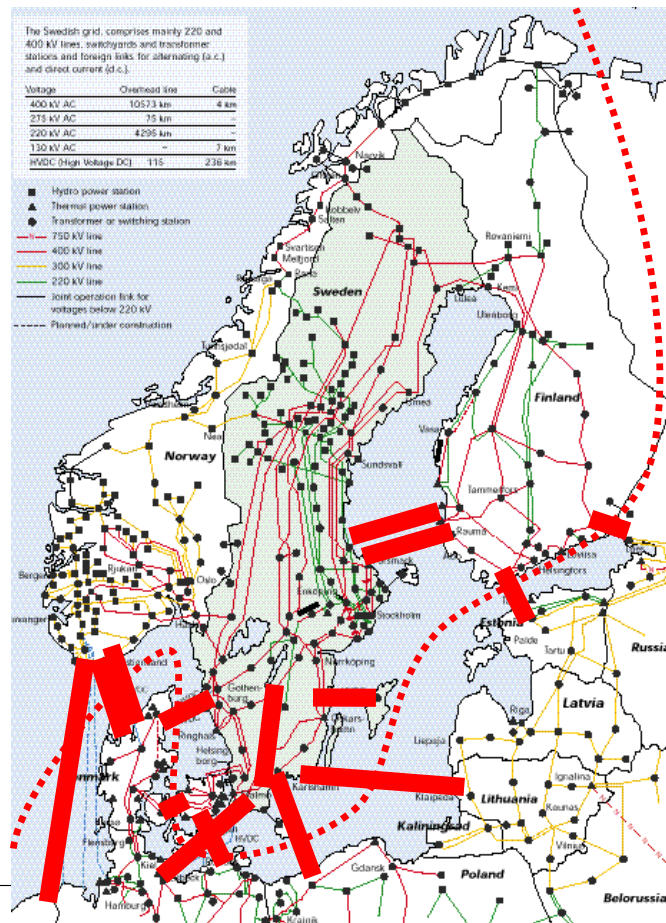
- Very long sub sea transmissions
- Very long overhead line transmissions
- Very high power transmissions



## HVDC Light, IGBT based

- Offshore power supply
- Wind power integration
- Underground transmission
- DC grids

# HVDC förbinder olika 50 Hz

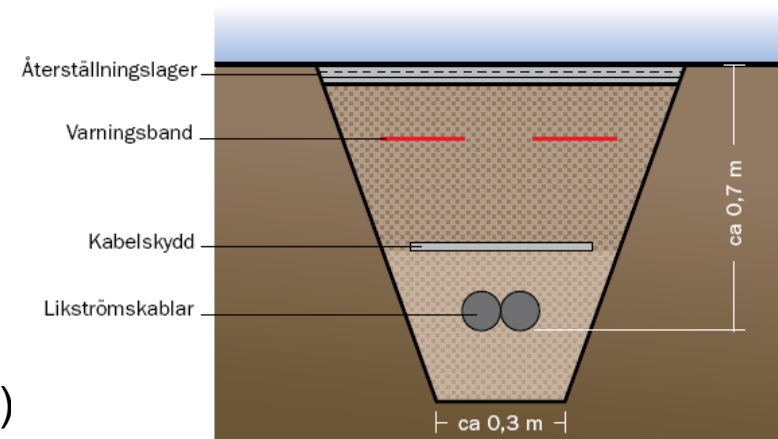


Ljusblått = HVDC-nät ansluter havsbaserad vindkraft och flera länder

# Sydvästlänken HVDC Barkeryd-Hurva

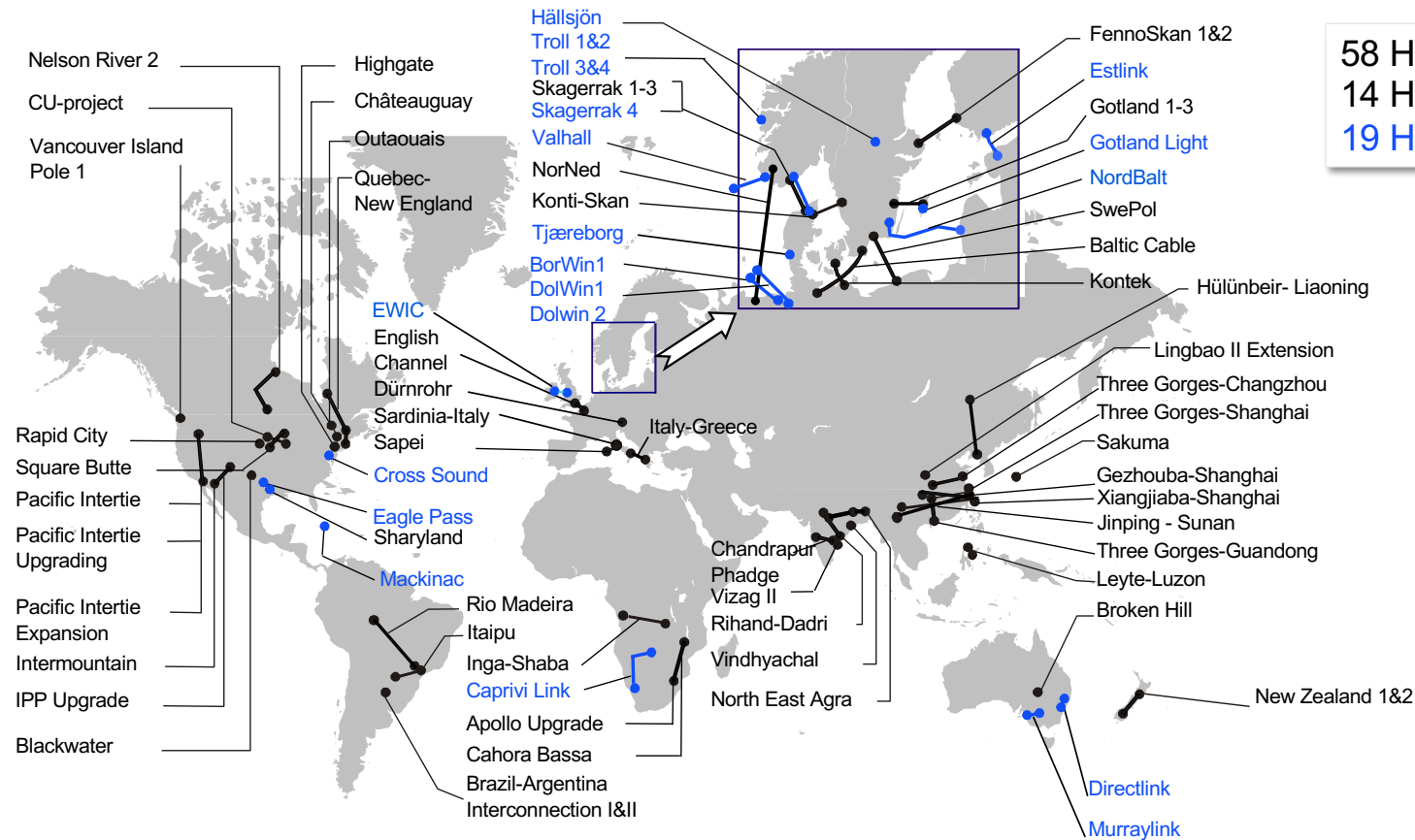


- Transistorteknik
- Markkabel – se skyltar längs E4
- Mycket smal kraftledningsgata
- 2x600 MW (som nedlagda Barsebäcks kärnkraftverk)





# Worldwide HVDC projects



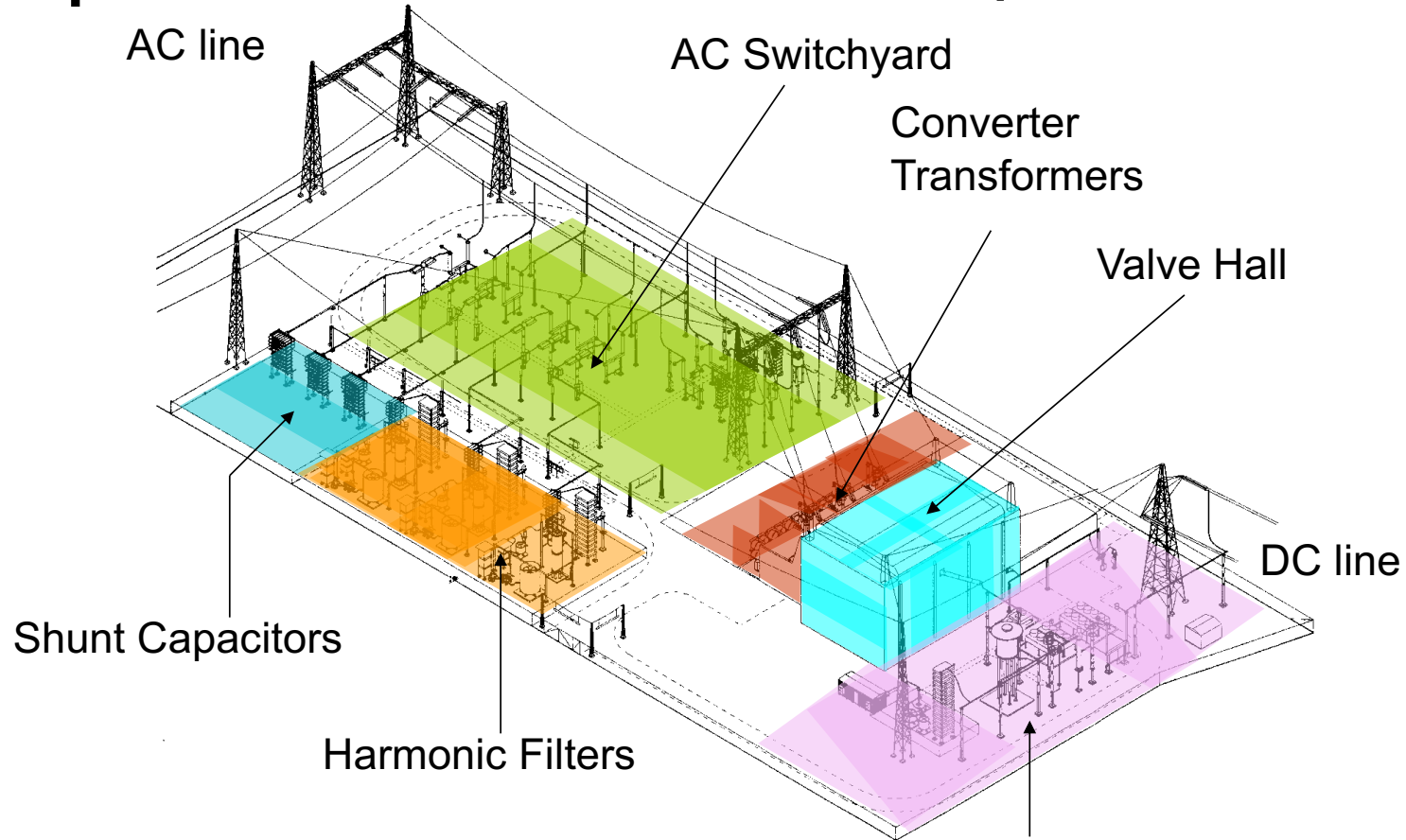
58 HVDC Classic Projects since 1958  
14 HVDC upgrades since 1990  
19 HVDC Light Projects since 1997

© ABB Group  
November 3, 2023 | Slide 52

# Baltic Cable 600 MW HVDC link



# Monopolar Converter station, 600 MW



Approximately 80 x 180 meters

DC Switchyard

# Första 1 MV HVDC stationen

- 1000 kV
- 12 GW
- 3000 km





# Offshore Wind Power Connectors

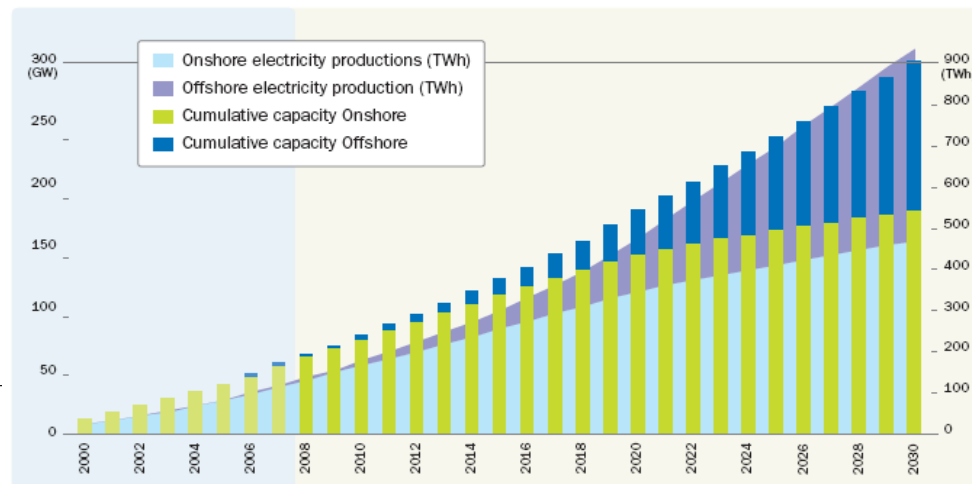
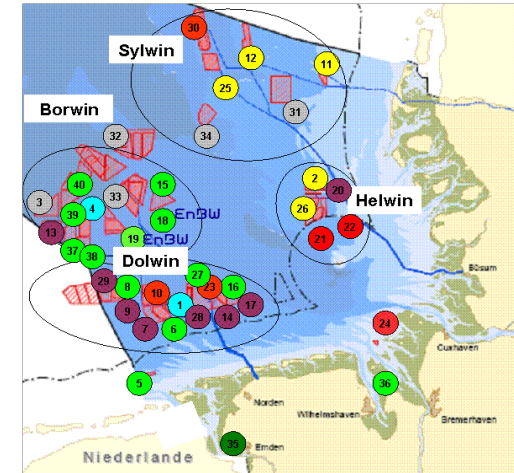
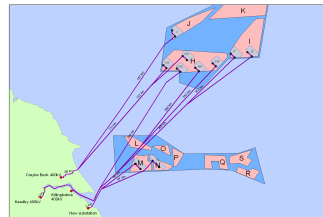
## Planned installations – Europe

Wind farms increase in size.

Most of them above 300 MW.

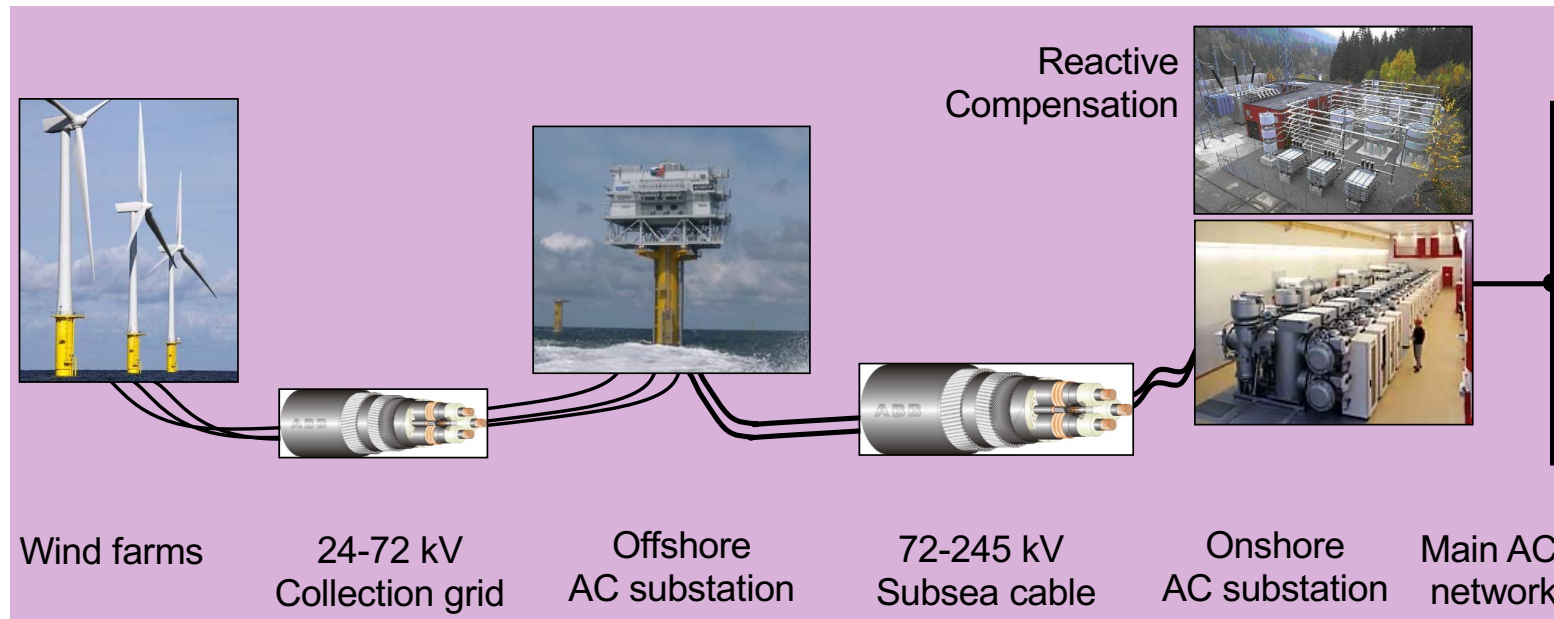
Larger farms will require massive delivery of AC-cables, both export cables and array cables

Longer distance from shore and increased size favors HVDC connectors (planned up to 1100 MW)



# Overview

## Offshore AC wind power connectors



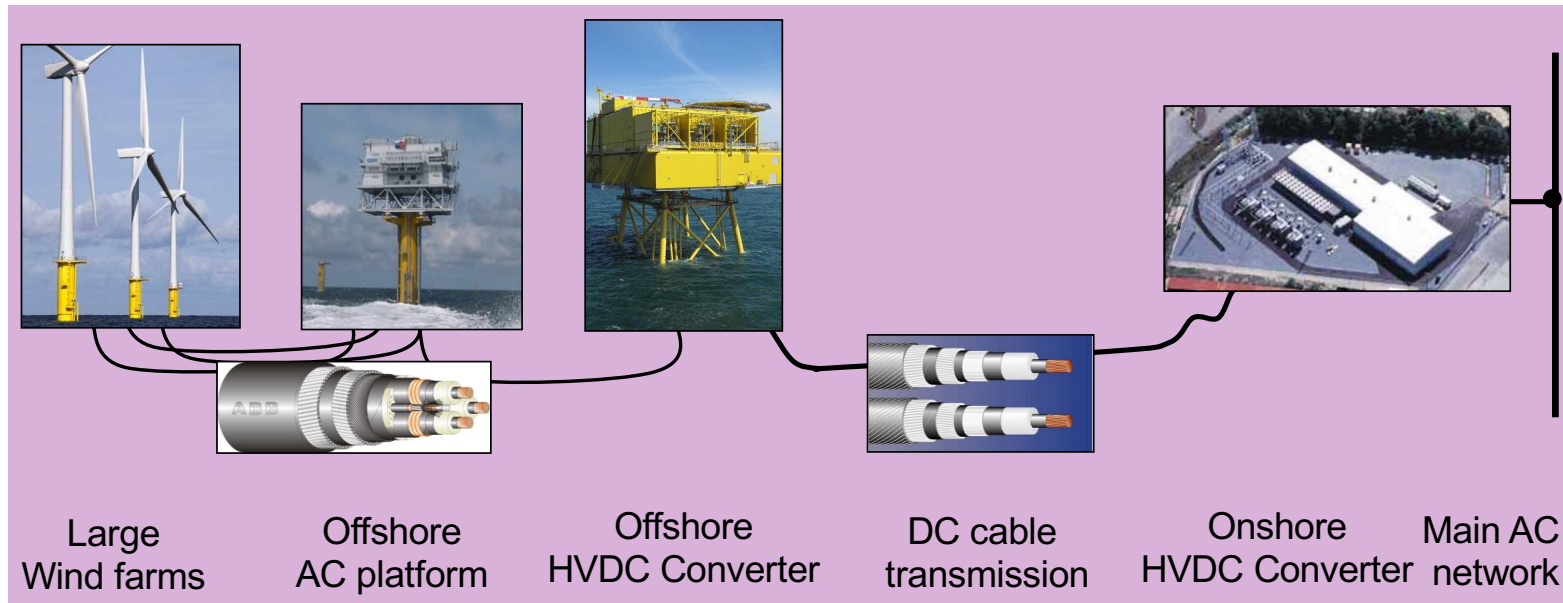
50 – 300 MW: 72-150 kV  
 200 – 500 MW: 150-245 kV

Traditional AC-substations located off-shore  
 Key issue is to fulfill grid code compliance

(Longest AC subsea cable is the Isle of Man connector – 104 km, 90kV / 40 MW)

# Overview

## Offshore HVDC wind power connectors



100 – 300 MW:  $\pm 80$  kV HVDC Light (VSC)  
 300 – 500 MW:  $\pm 150$  kV HVDC Light  
 500 – 1000 MW:  $\pm 320$  kV HVDC Light

VSC technology for compact solutions. ABB with 10 years experience ( 13 references)

# Sammanfattning

- Med oförändrad effekt ger X ggr högre spänning ... ström och ... förluster
- Fyledning har luft som isolation: ... indikerar spänningsnivå
- Magnetfält från kraftledningar beror på avståndet  $r$  som ...
- Viktigast parameter i en  $\pi$ -modell av en 400 kV fyledning är ...
- Kabel är väderskyddad men kapacitansen är ... och längden är ...
- För att öka en lednings överföringskapacitet kan man ... och ...
- Verkningsgraden på en transformator kan vara upp till ...
- DC är lämpligare än AC för ... och ...
- Transmission används för ... och har ett nät som är byggt ...
- Distribution används för ... och har ett nät som är byggt ...
- HVDC passar för ... avstånd och för att koppla samman system med olika ... och ...

# Sammanfattning

- Med oförändrad effekt ger X ggr högre spänning  $\frac{1}{X}$  ström och  $\frac{1}{X^2}$  förluster
- Friledning har luft som isolation: längd på isolatoerkedjor indikerar spänningsnivå
- Magnetfält från kraftledningar beror på avståndet r som  $\frac{1}{r}$
- Viktigast parameter i en  $\pi$ -modell av en 400 kV friledning är seriereaktans X
- Kabel är väderskyddad men kapacitansen är högre och längden är begränsad
- För att öka en lednings överföringskapacitet kan man öka spänningen och öka antal fasledare
- Verkningsgraden på en transformator kan vara upp till 99.5%
- DC är lämpligare än AC för mycket långa avstånd och att förbinda system med olika frekvenser
- Transmission används för långa avstånd och har ett nät som är byggt maskat
- Distribution används för att nå adresser och har ett nät som är byggt radiellt
- HVDC passar för stora avstånd och för att koppla samman system med olika frekvens och fas

# TSFS 17 Elkraftsystem

Föreläsning

<https://isy.gitlab-pages.liu.se/fs/courses/TSFS17/>

Lars Eriksson, Professor  
ISY, Fordonssystem