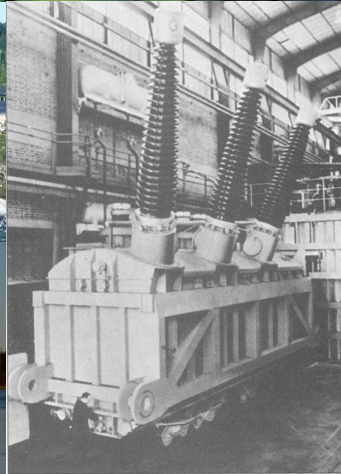


# TSFS17 Elkraftsystem Fö 1 Kursintroduktion repetition och elkrafthistoria

Lars Eriksson, professor  
ISY, Fordonssystem

Kursen har utvecklats med  
hjälp av:  
Olov Samuelsson – Lund  
Mikael Bergkvist – Uppsala



# 1. Kursintroduktion

## Översikt och innehåll

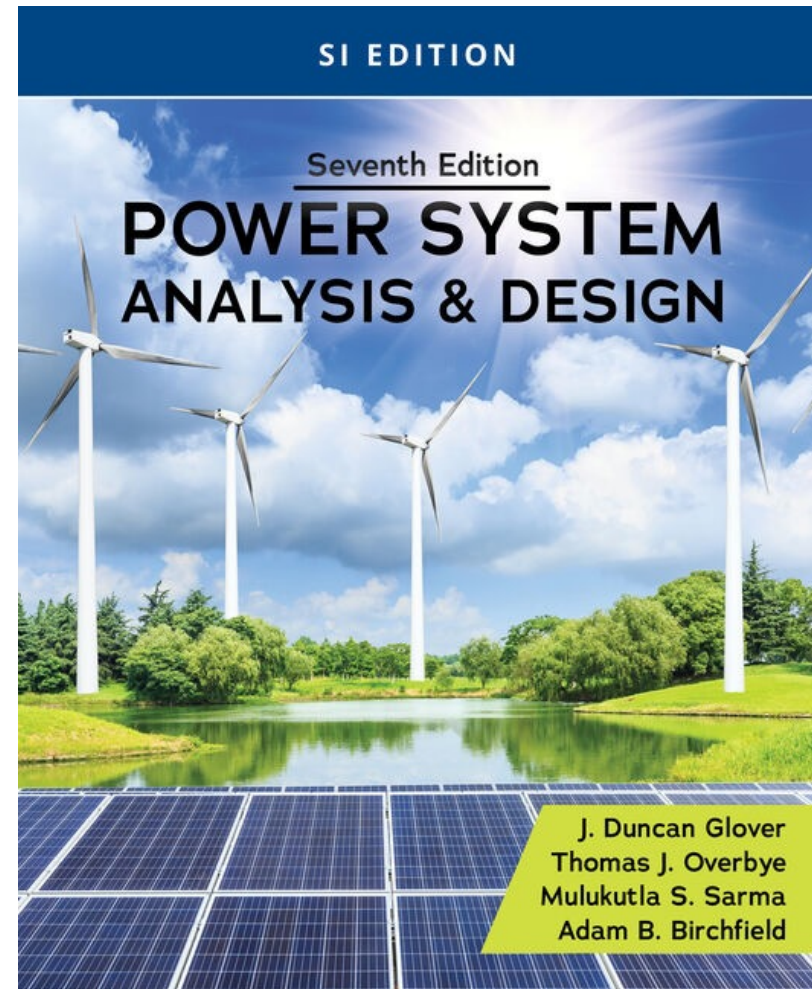
# Kursöversikt

TSFS17 - Elkraftsystemet	Lektioner	Laborationer
1 Introduktion elsystemet - stabilitet, frågeställningar, analysperspektiv historia, repetition		
2 Svenska energisystemet, Baskraft, Vatten-, kärn-, olja-, kol-, värme-kraft, trender och utmaningar	Förberedande repetitionsuppgifter	
3 Kraftöverföring, AC & HVDC	Kraftöverföring AC/HVDC	
4 Elnätsmodellering - transmissionsnätet	Transmissionsnätet	
5 Elnätsstabilitet och elmarknaden	Elnätsstabilitet & elmarknaden	Transmissionsnätet
6 Elnätsmodellering - distributionsnätet	Distributionsnätet	
7 Förnybar elproduktion (elnätsperspektiv)	Kraftproduktion	
8 Elanvändning och trender (stål, serverhallar, batteriproduktion, e-mobilitet...)	Elanvändning	Distributionsnätet
9 Batterier och batteriteknologier		
10 Batterier som energilager, i elnätsperspektiv (dynamik BMS, övervakning) (second life)	Batterier	Batterier
11 Vätgas/elektrobränslen	Elektrobränslen/vätgas	
12 Elsystemet - sammanfattning och trender		

- Planerade föreläsningar, lektioner och labbar
- Examination: labbar och tenta

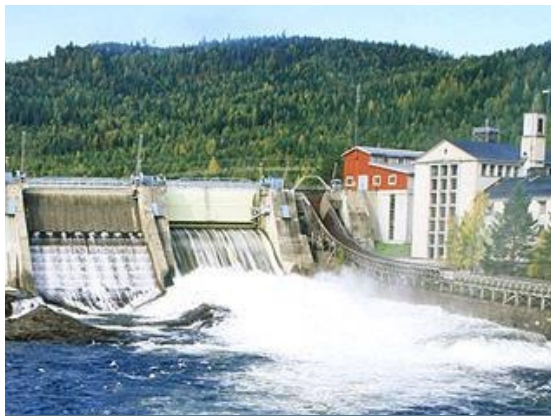
# Kursbok och material

- D. Glover, M. Sarma, T. Overbye  
Power system analysis & design  
7<sup>th</sup> edition (or 6<sup>th</sup> or 5<sup>th</sup>)
- Kursmaterial på Lisam och hemsidan  
Föreläsningar  
Övningar  
Labbar, simulation files
- Den mest använda läroboken i världen  
för Elkraftsystem.

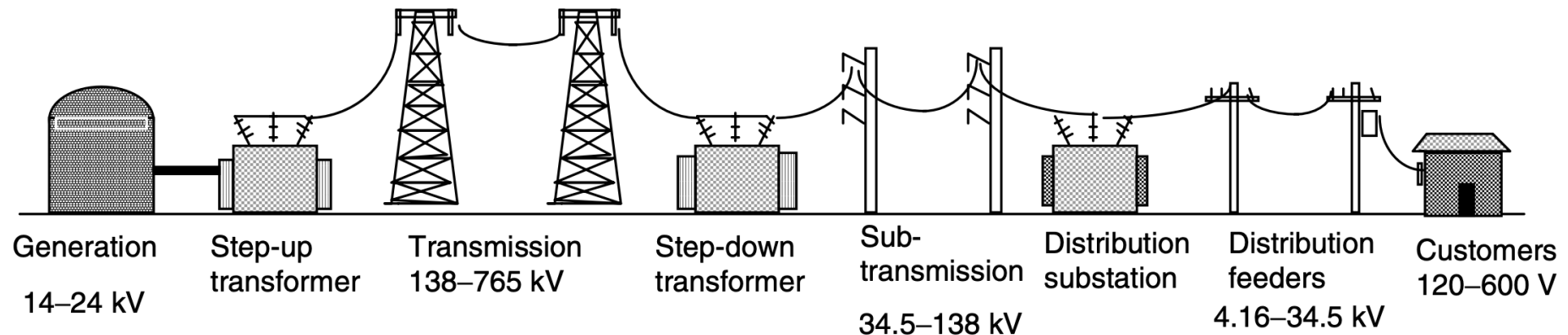




# Kursens delar i bilder.



# En-dimensionell bild av Elkraftsystemet



- Kommer att återvända till bilden för orientering i kursen
- Idag, repetition av komponenter som finns i kedjan.

# Drivkrafter

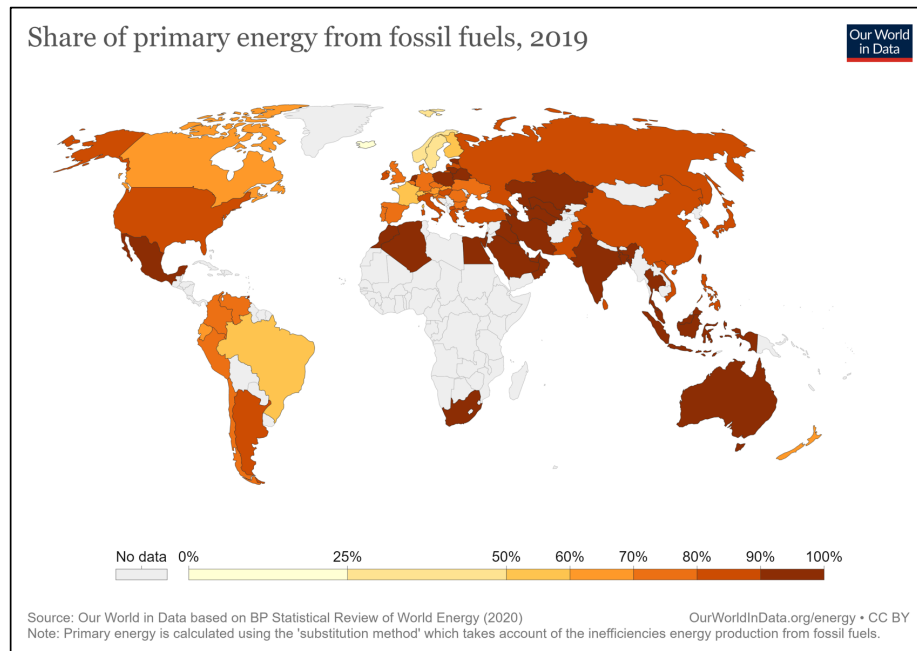
## Klimatmål förändrar energisystemet

- “Energiomställningen” enligt EU klimatmål 2030
  - 27% energi från förnyelsebart
  - 40% lägre CO<sub>2</sub>-utsläpp än 1990
  - 27% högre effektivitet (=27% mindre energi)
- Mer förnybart, mindre fossilt, mindre energi totalt. **Mer el OK!**
- Energimyndigheten ansvarar för energiomställningen i Sverige

# Elkraft i energiomställningen

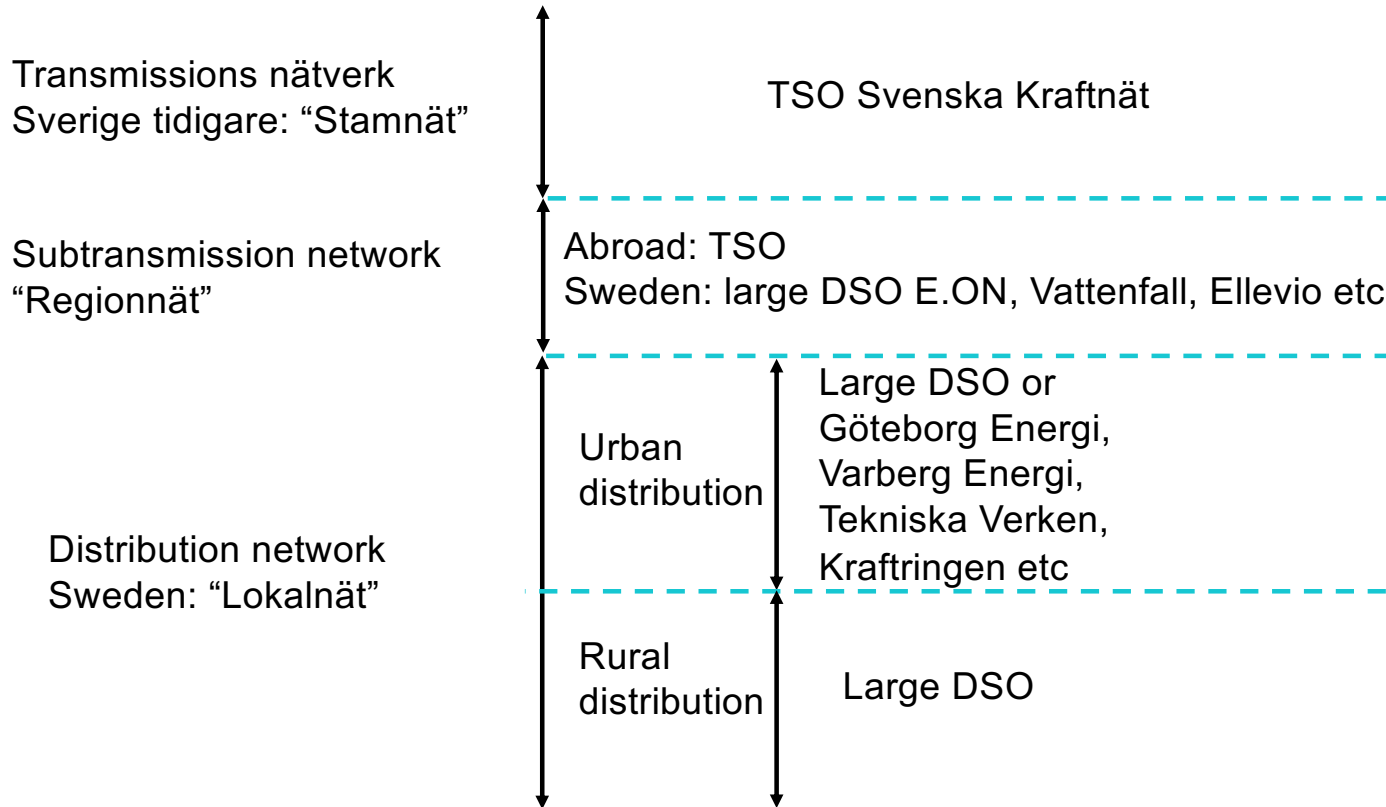
1. Elproduktion: Ersätt fossilt med förnybart
2. Elanvändning: Energieffektivisera och elektrifiera
  - Industri: Varvtalsreglera och elektrifiera
  - Uppvärmning: Värmepumpar och fjärrvärme
  - Transporter: Ersätt fossila bränslen med el
3. Där elektrifiering inte är lämplig
  - Förnybara bränslen för flyg och sjöfart

-Vilka är världsledande?

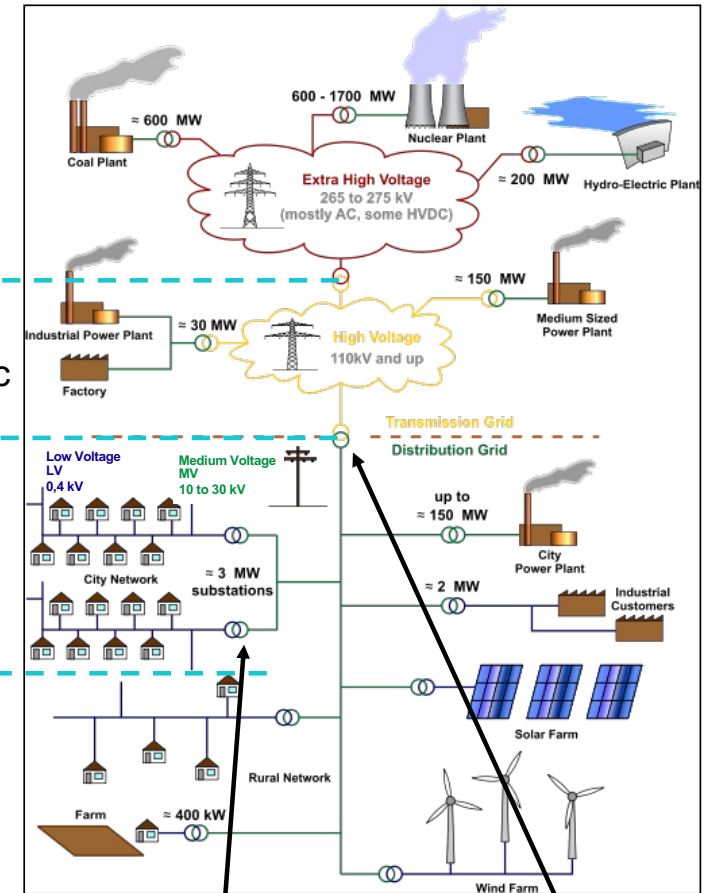




# Nätet uppdelat efter spänningsnivåer



Transformer symbol:

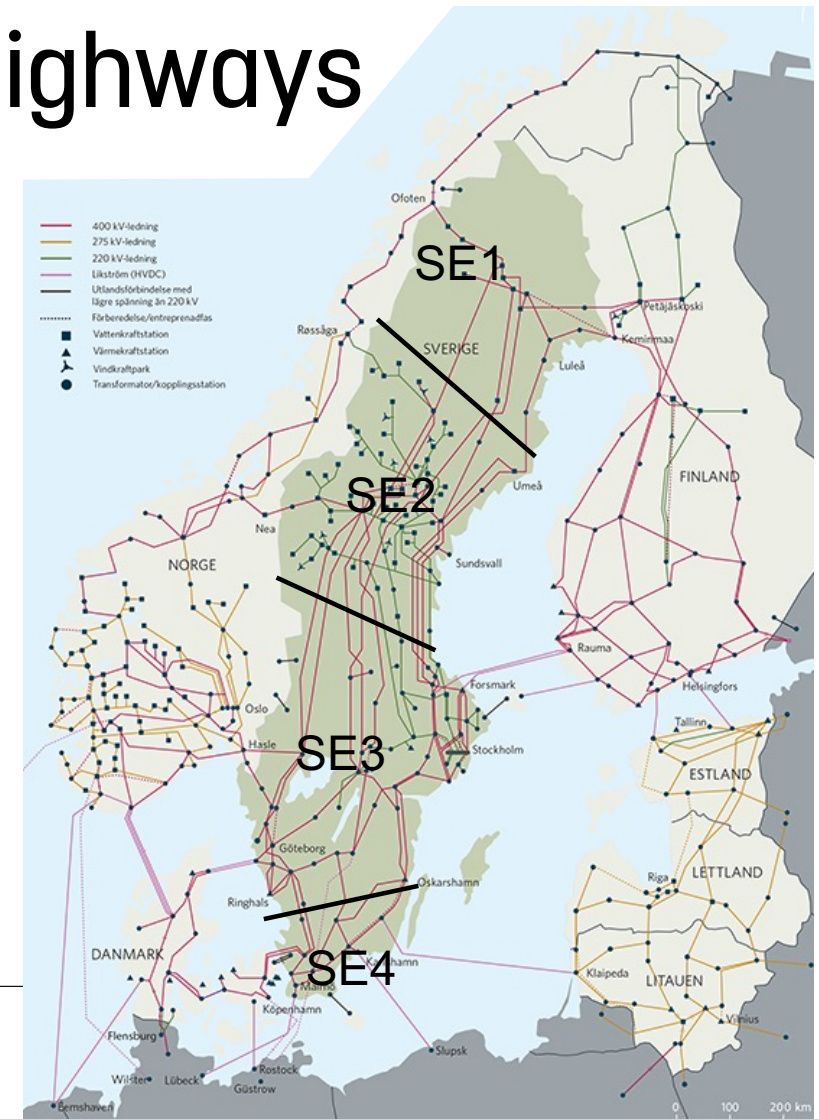


Secondary substation  
"Nätstation"

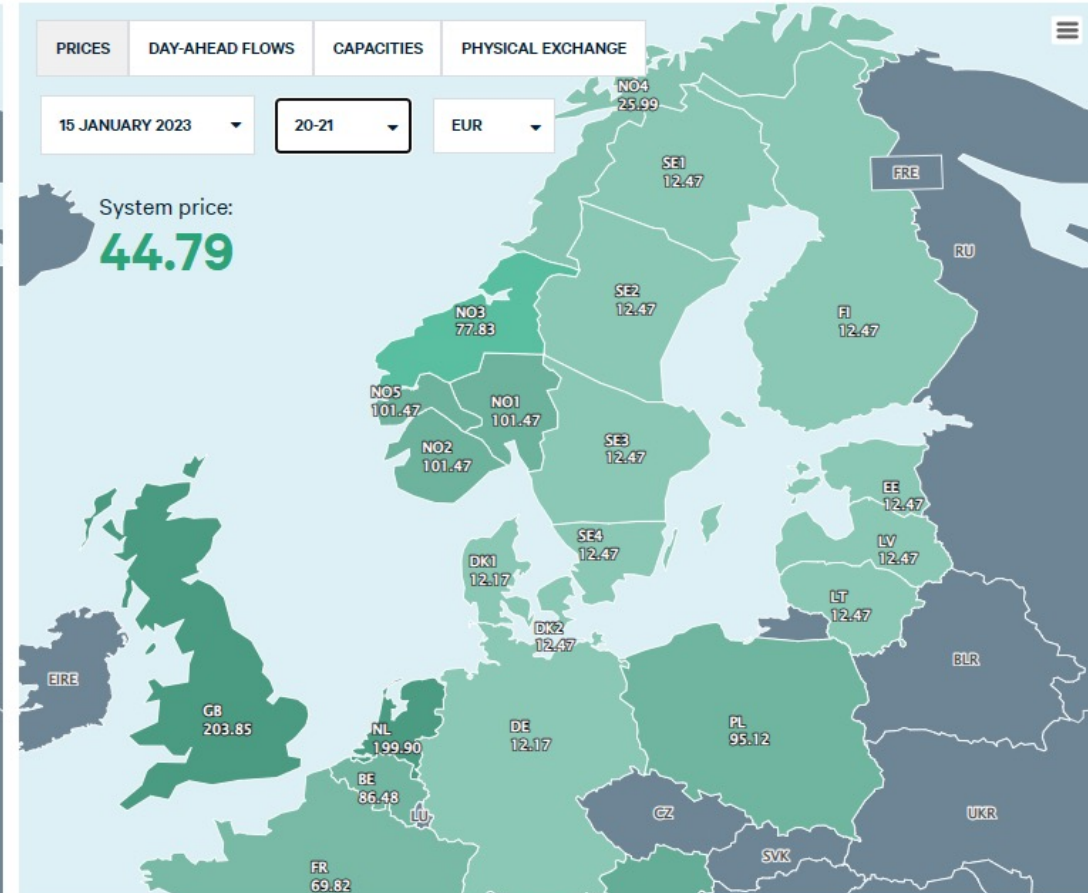
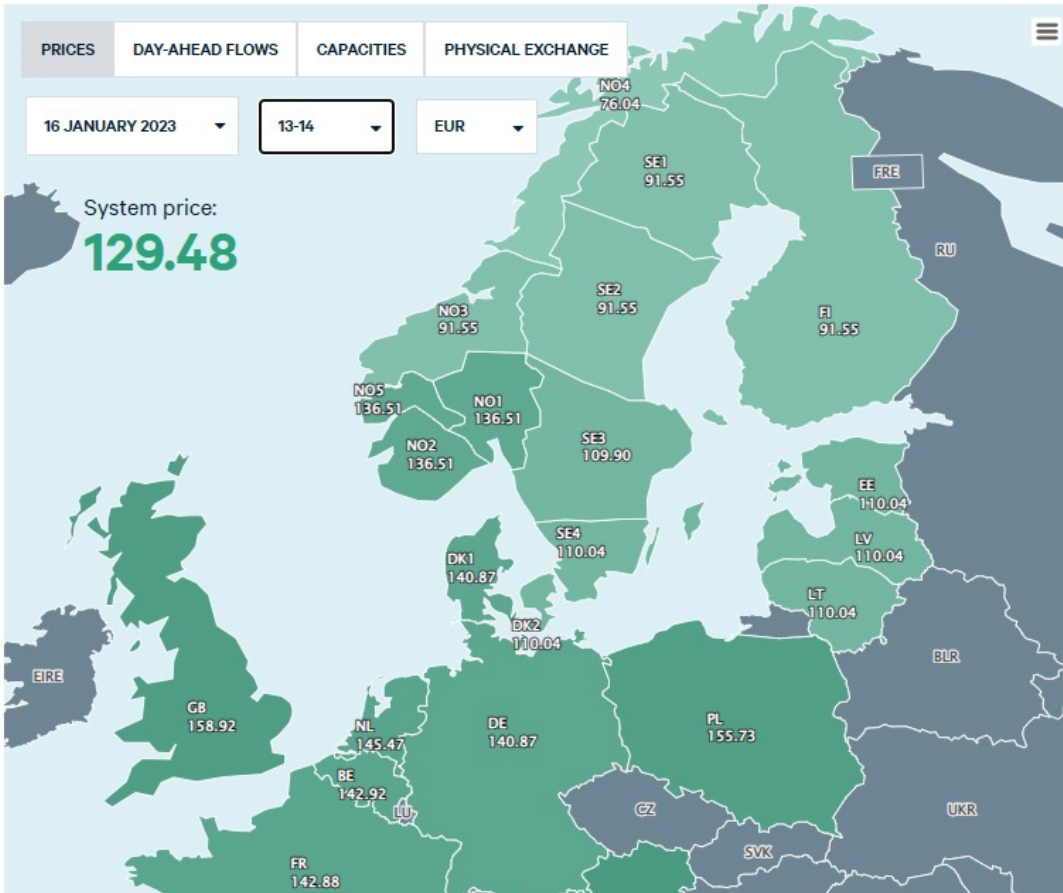
Primary substation  
"Fördelningsstation"

# Transmissions nätverk $\Leftrightarrow$ highways

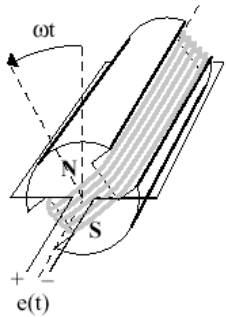
- Långa avstånd – hundratals km
- Effekt hundratals MW
- Extra hög spänning, i Sverige 130, 220, 400 kV
- Hög tillförlitlighet krävs  $\rightarrow$  maskad nätstruktur
- Nationellt intresse – typiskt statsägd
- Transmissionsnätverk – ett naturligt monopol
- Nord-Syd flaskhalsar definierar elområden



# Elpriset



# Kursen har fokus på "Hur funkar det?"



- Så här ser det ut
- Naturlag eller liknande
- Ansätt uttryck

Faradays induktionslag

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -B \frac{dA(t)}{dt}$$

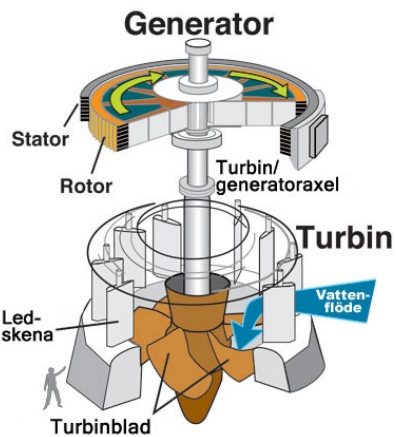
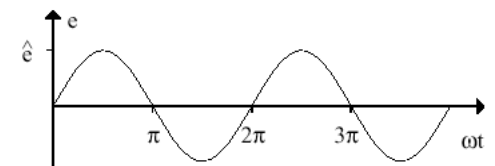
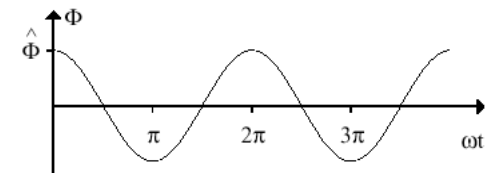
$$A(t) = 2 r L \cos(\omega t)$$

- Utveckla

$$e(t) = -\frac{d}{dt} [B2rL\cos(\omega t)]$$

$$e(t) = -\frac{d}{dt} [\hat{\Phi}\cos(\omega t)]$$

$$e(t) = \omega\hat{\Phi}\sin(\omega t) = \hat{e}\sin(\omega t)$$



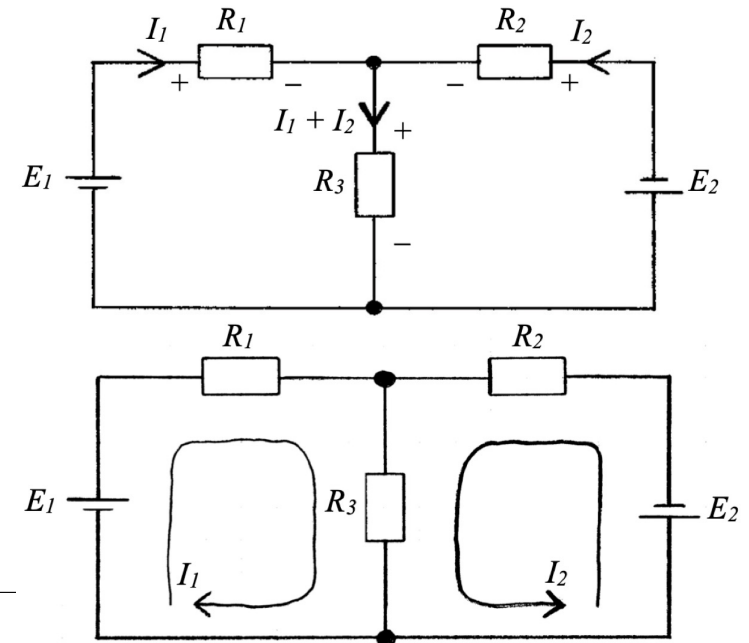
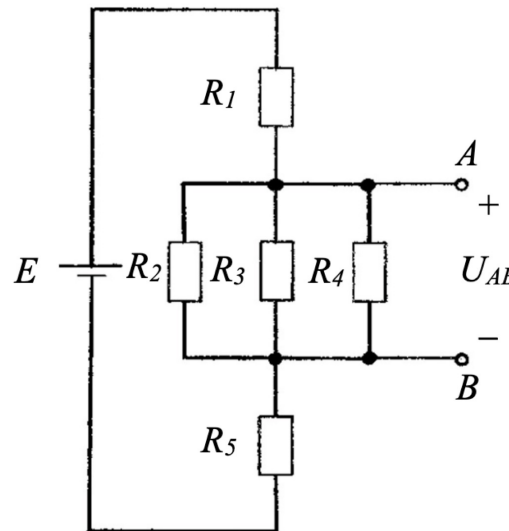
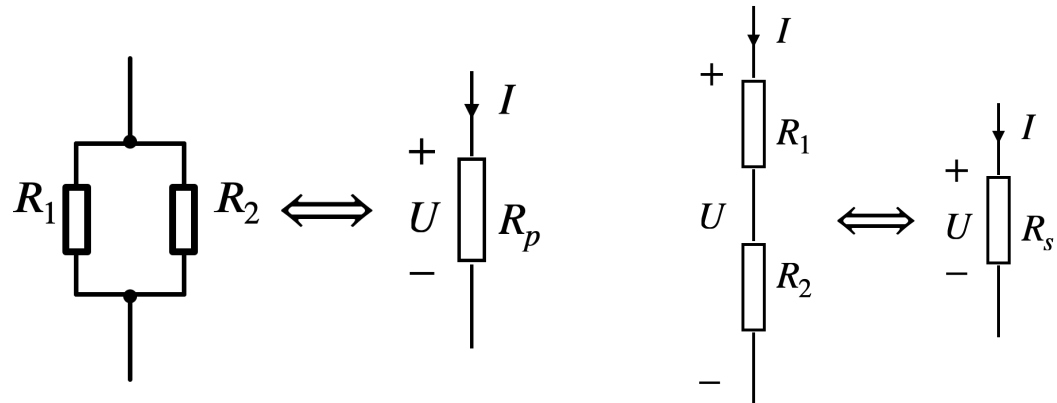


## 2. Repetition

Viktiga principer och koncept från TSFS16

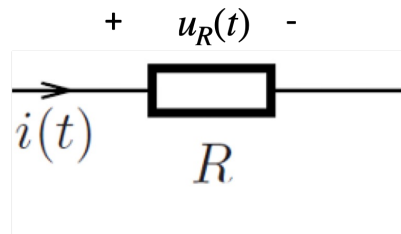
# Likström DC

- Komponenter och principer
  - Resistor - Resistans
  - Kondensator - Kapacitans
  - Spole - Induktans
- Kretsanalys
  - Parallellkoppling
  - Seriekoppling
  - Kirchofs spänningslag
  - Kirchofs strömlag
  - Slinganalys



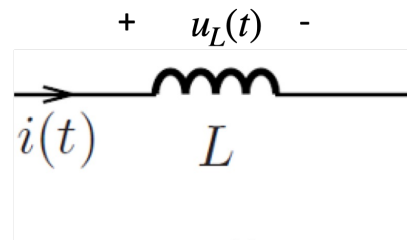
# Resistans, induktans och kapacitans

Resistans:



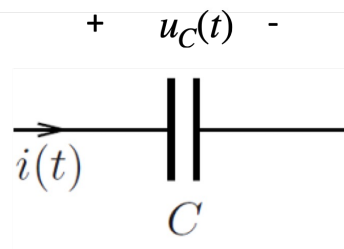
$$u(t) = Ri(t)$$

Induktans:

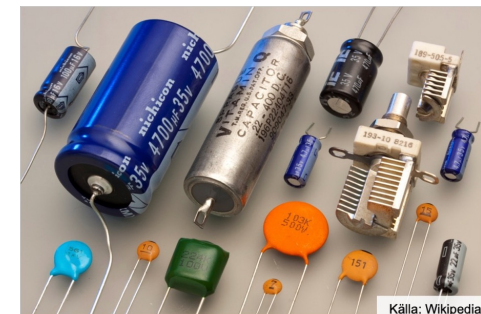


$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

Kapacitans:



$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$



Källa: Wikipedia

# Växelström AC

- Sinusformad spänning och ström
- Konstant frekvens  $f$  [Hz]
- $j\omega$  metoden,  $\omega = 2\pi f$  [rad/s]
- Komplex vektorrepresentation  $\bar{U}$
- Effektivvärde  $U = \hat{u}/\sqrt{2}$
- Komplex impedans  $\bar{Z}$
- Samma grundprinciper för kretsanalys som för DC

Ström och spänning över resistans

$$u(t) = \hat{u} \cos \omega t$$

$$i_R(t) = \frac{\hat{u} \cos \omega t}{R} = \hat{i}_R \cos \omega t$$

Representation

$$u(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi)$$

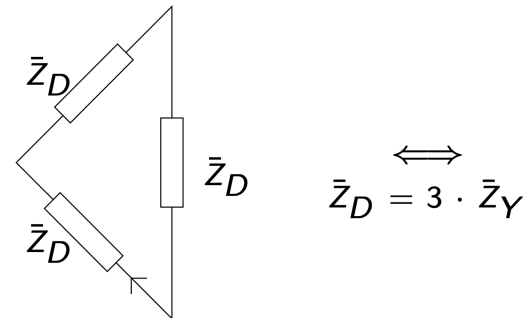
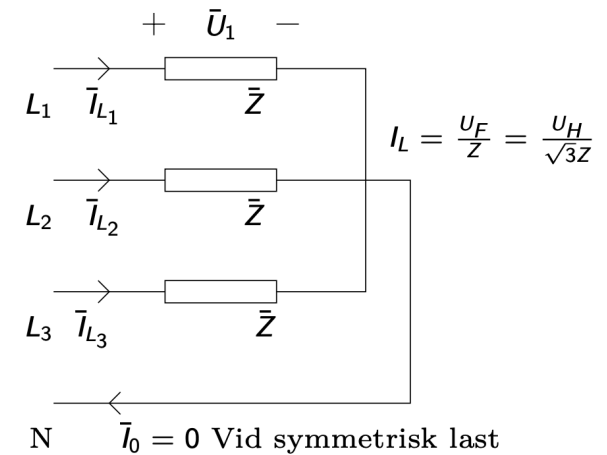
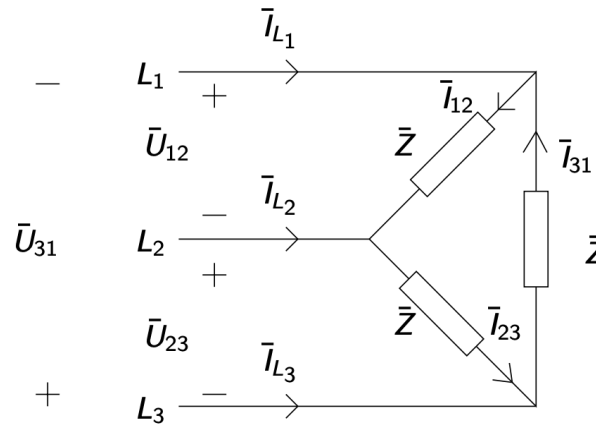
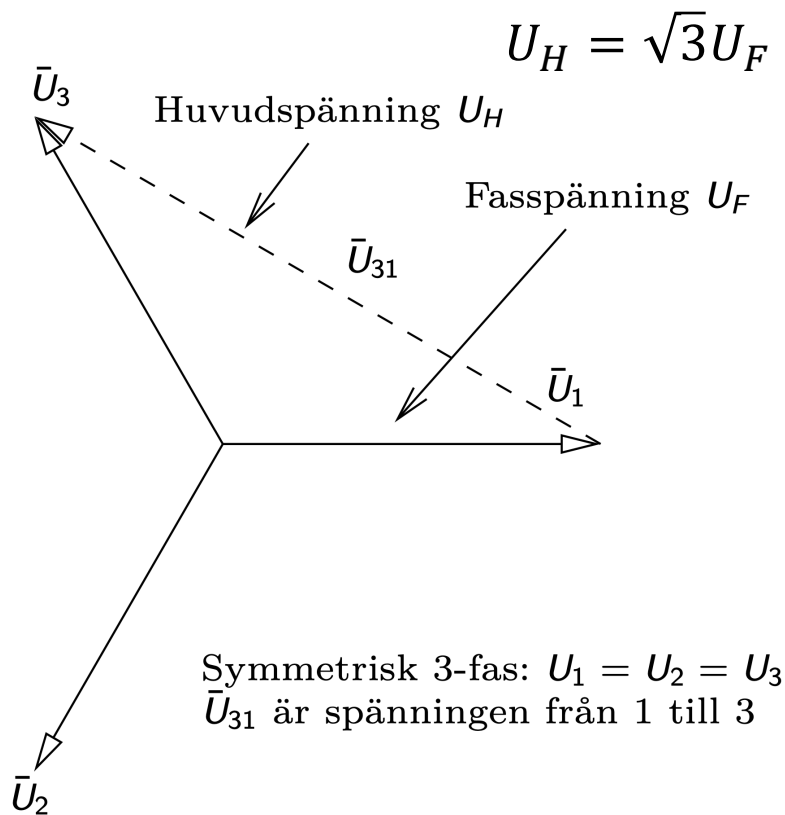
$$\bar{U} = U \angle \varphi = U e^{j\varphi}$$

$$\bar{U} = U \cos \varphi + j U \sin \varphi$$

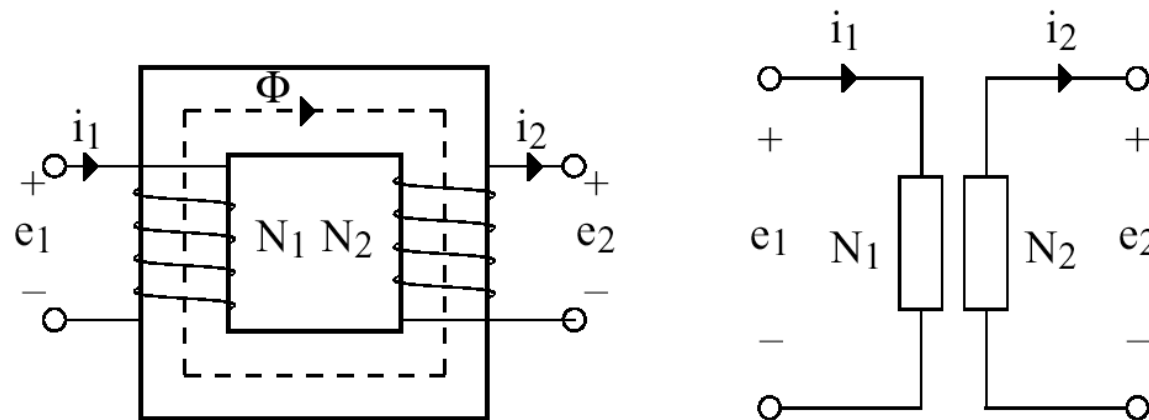


# Trefas AC

## D (delta/triangel), Y (stjärn)

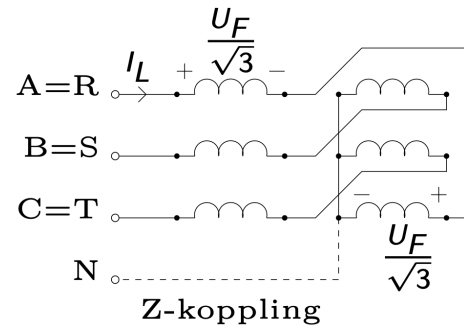
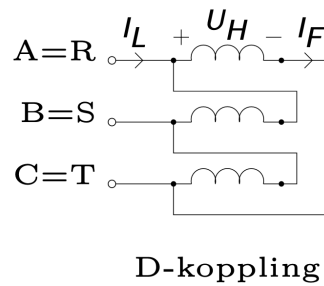
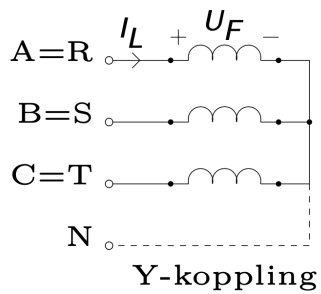
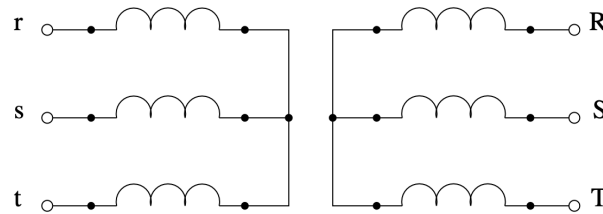
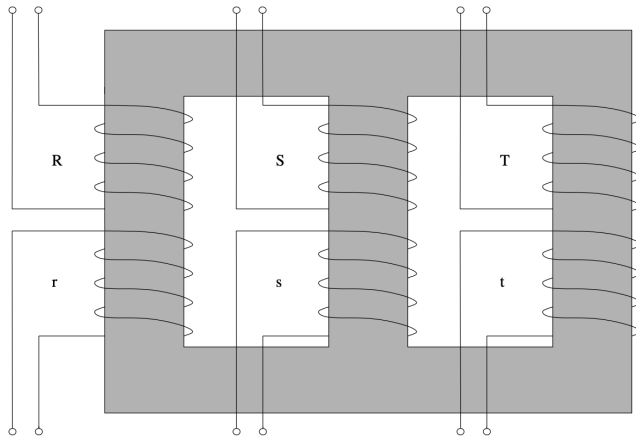


# Ideal enfas transformator



- Faraday's lag  $E_1/E_2 = N_1/N_2 = \text{turns ratio } N$
- MMF balans  $N_1 I_1 = N_2 I_2$  or  $I_1/I_2 = N_2/N_1$
- Antar förlustfri: Effekten bevaras  $S_1 = E_1 I_1 = E_2 I_2 = S_2$

# Transformatorn: tre-fas

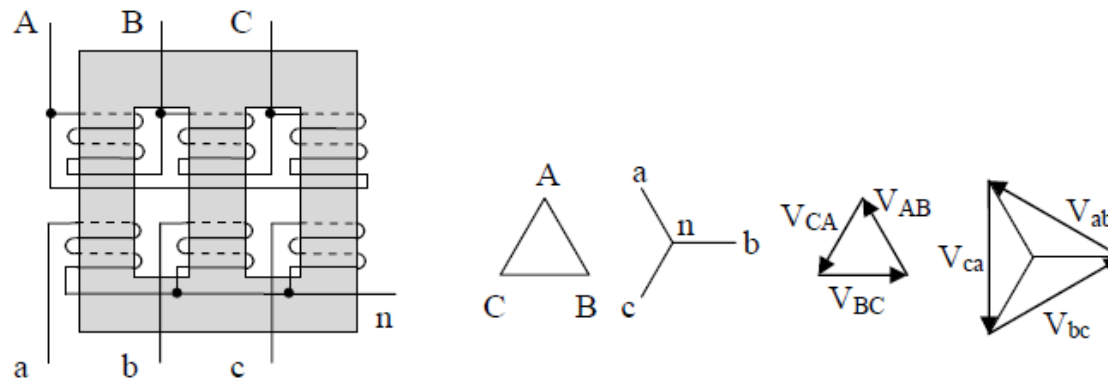


100 MVA transformator



# Three-phase transformer phase shift

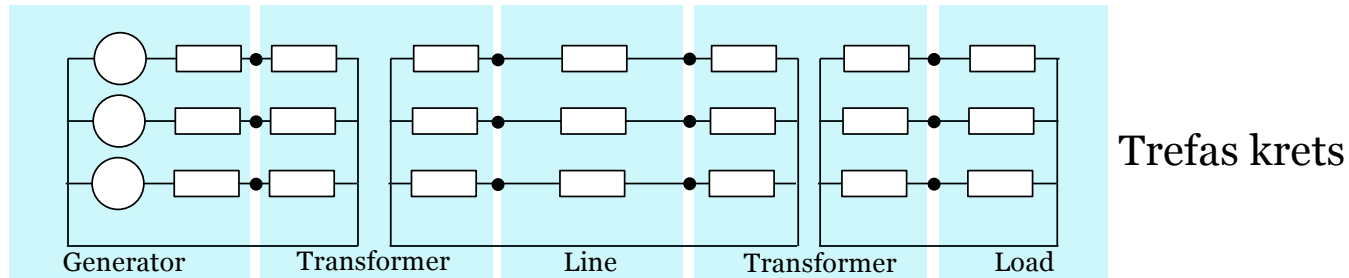
- For each phase  
Same flux in primary and secondary windings  
Same phase angle in primary and secondary windings
- Mostly Y-connected (here terminals abc<sub>n</sub>) or delta-connected (here ABC)



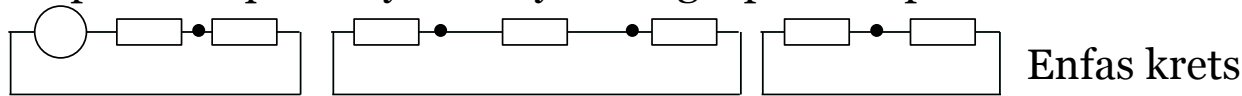
- Y-Δ:  $30^\circ$  phase lag on Δ side
- Variable in phase shifting transformer
- Phase shift represented in model *by complex* turns ratio  $\mathbf{N}$

See examples on Slide 1

# Single line diagram (Sw enlinjeschema)



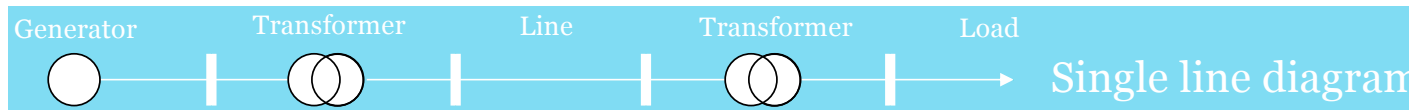
All three phases equal = symmetry → single phase represents all three:



1. Skip impedances and return conductor

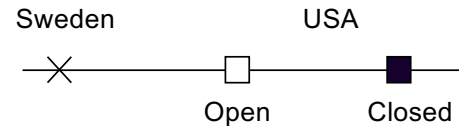
2. Nodes are "bus bars" in substations

3.

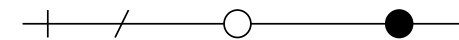


Transformer also:

Circuit breaker:



Disconnecter:

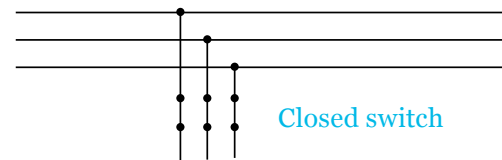


# Bus (bar) (Sv samlingskena, skena)

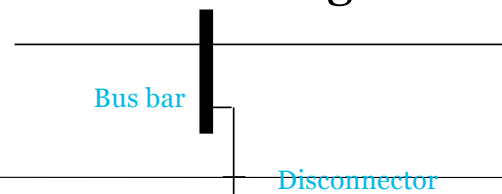


- Reality: bus bars  
Aluminum pipes on porcelain support

- Circuit diagram: Three-phase node

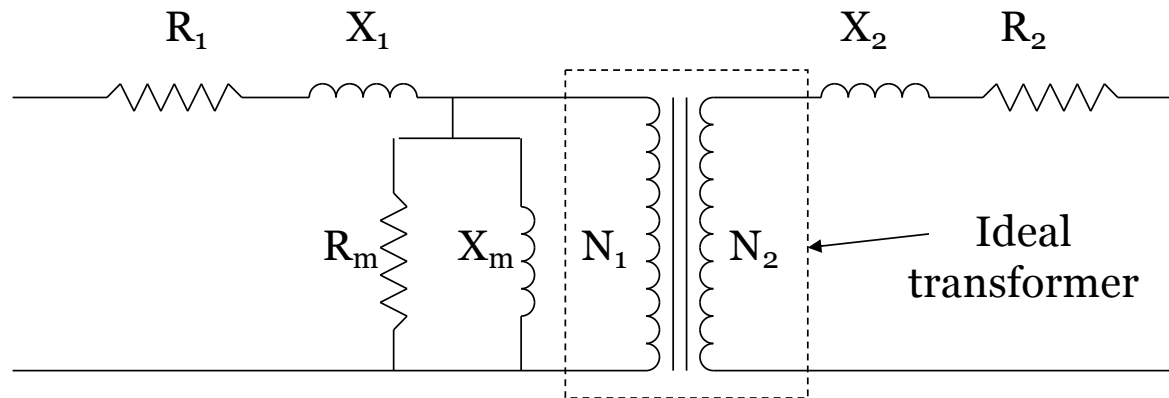


- One line diagram: bus bar (with 0 Ω)



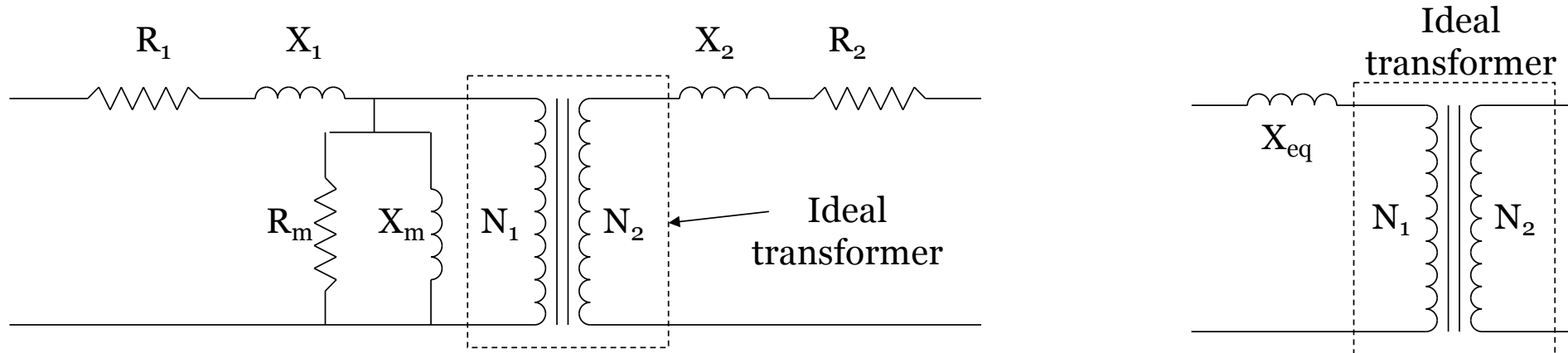


# Transformatormodell - En fas



- Praktisk transformator  
Läckage flöde  $X$  och lindningsresistans  $R_1$   $R_2$   
Kärnans reluktans representeras av  $X_m$   
Hysteres och (eddy currents) virvelströms förlust  $R_m$
- Transformator modell  $\approx \pi$  modell + ideal transformator

# Enklaste transformatormodellerna

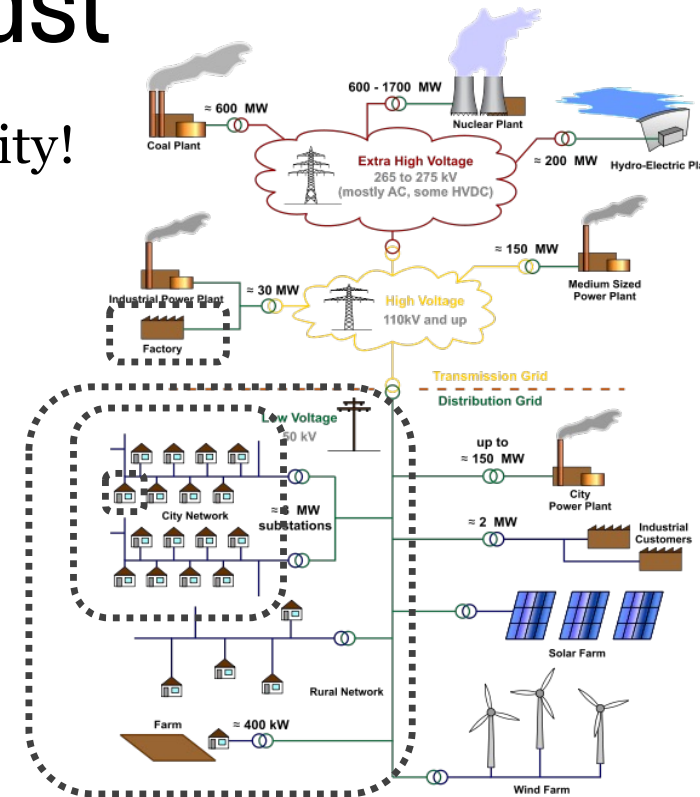
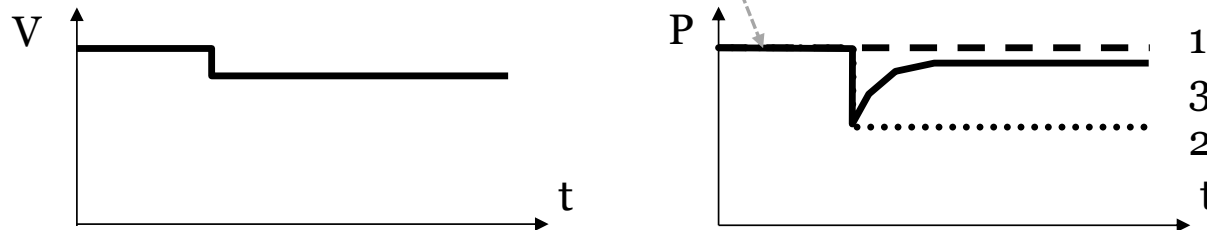


- Förenkla transformatorns beteende
  - $X_{eq} = X_1 + X_2$ ,
  - $R_1 = R_2 = 0$ ,
  - $R_m = X_m = \infty$
- Citat: Alla modeller är förenklingar, vissa är användbara

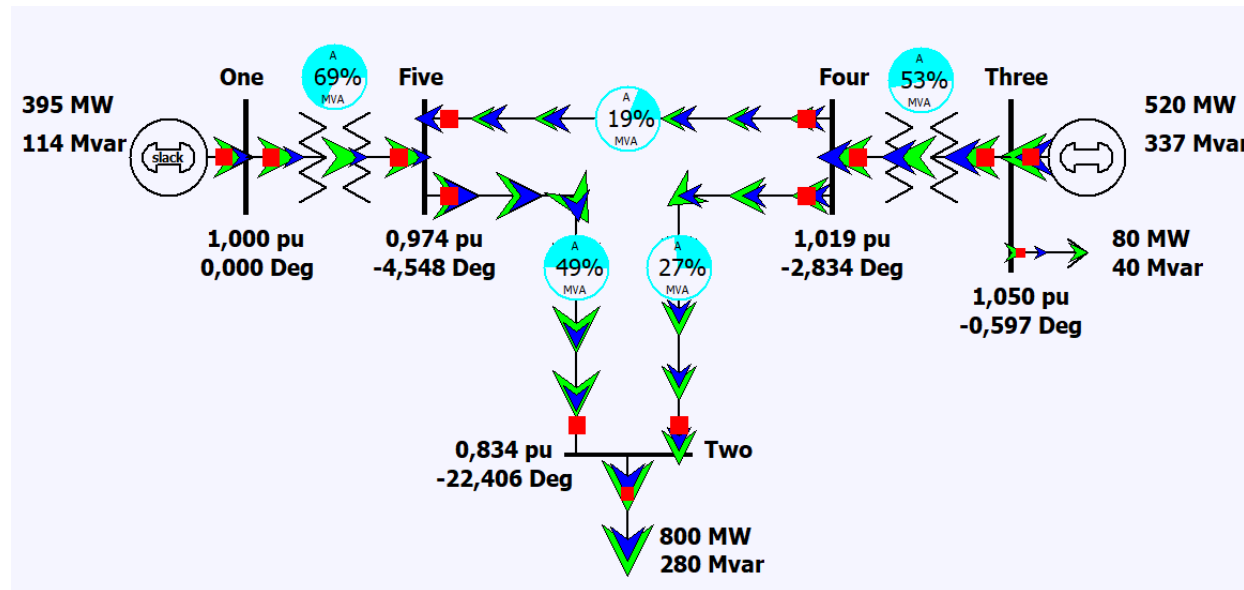
# Förbrukarna kallas vanligtvis last

In a national system model one load may represent a city!

1. No voltage dependence - constant power  $P$  and  $Q$   
True for motors and power electronics
2. Voltage dependent - constant impedance  $Z$   
True for heating
3. Load with recovery time constant  
Fast for motors, slow for thermostats  
First like constant  $Z$ , then recovers to  $P$



# Single line diagram in PowerWorld

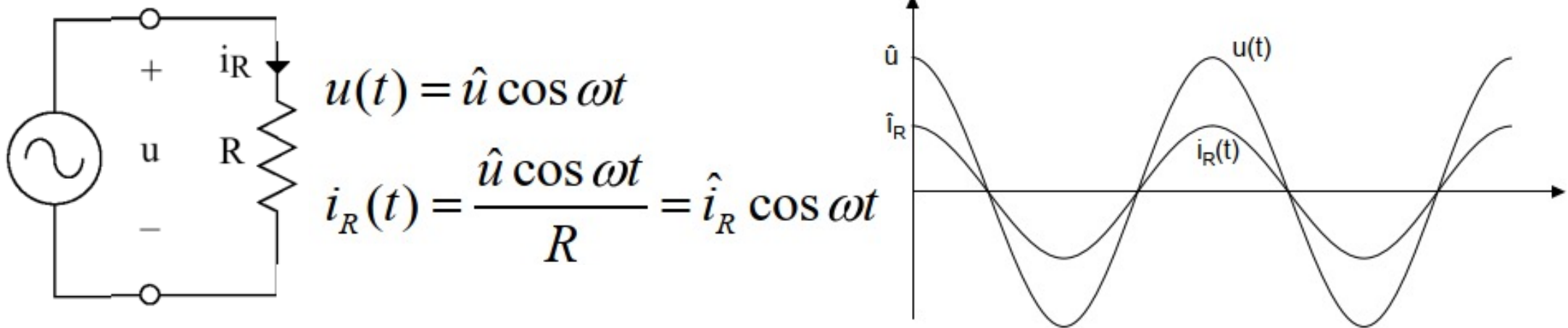


- Voltage (here normalized) and power standard in power system monitoring
- Specific to PowerWorld simulator:  
Pie charts and animated arrows visualize line flows

## 2. Repetition

Viktiga principer och koncept från TSFS16

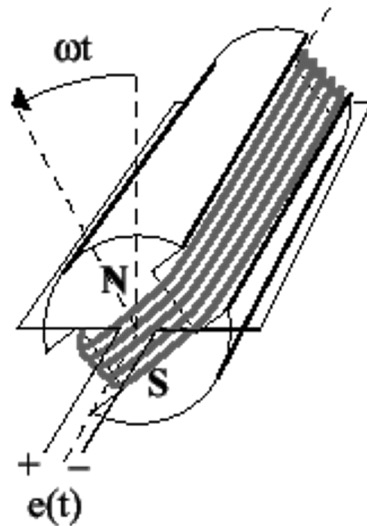
# Synkrongeneratorn en växelspänningskälla



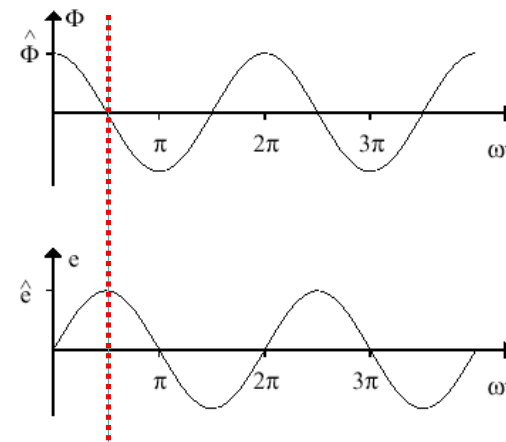
- Rotationen ger en (co)sinusformad spänning
- Toppvärde  $\hat{u}$  och (vinkel)frekvens  $\omega(\text{rad/s})=2\pi f(\text{Hz})$
- Sinusformad spänning över  $R$  ger sinusformad ström



# Rotation inducerar spänning statorlindning



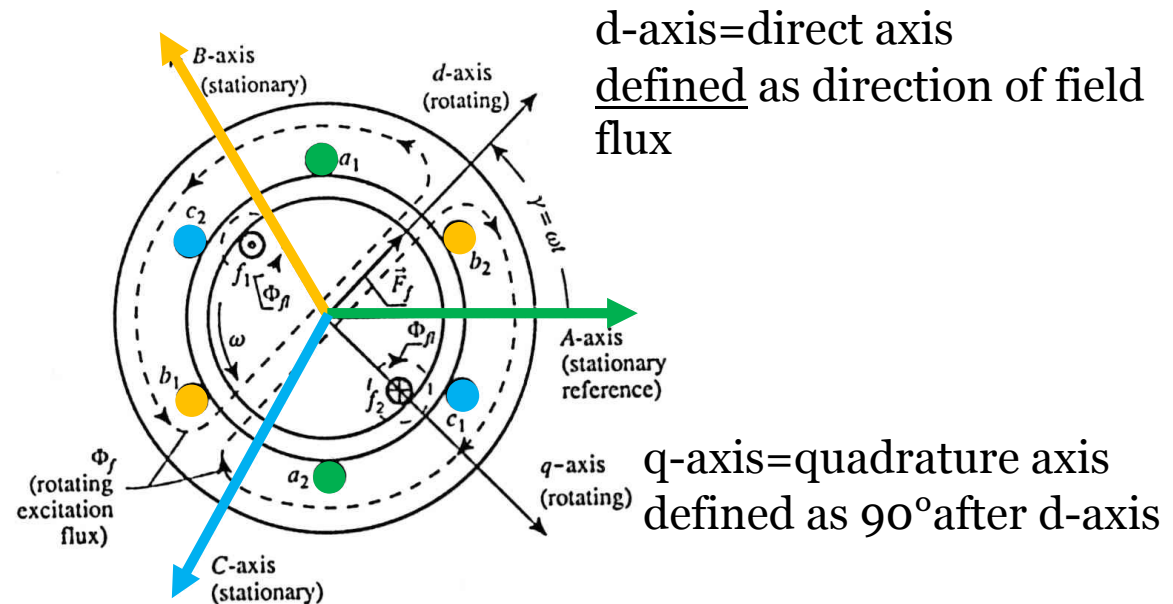
$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(BA \cos \omega t)}{dt}$$



- Rotation → sinusoidal (here cosine) flux variation
- $e(t)$  is ElectroMotive Force (EMF), like a voltage
- $e(t)$  peaks as rotor pole passes winding conductor

# Synchronous machine - no-load

- Rotor
  - One field winding  $f_1$ - $f_2$  fed with DC current
- Stator
  - Three windings  $a_1$ - $a_2$ ,  $b_1$ - $b_2$ ,  $c_1$ - $c_2$   $120^\circ$  apart in space



Animation:

<http://people.ece.umn.edu/users/riaz/animations/alternator.html>

# RMS - Effektivvärde

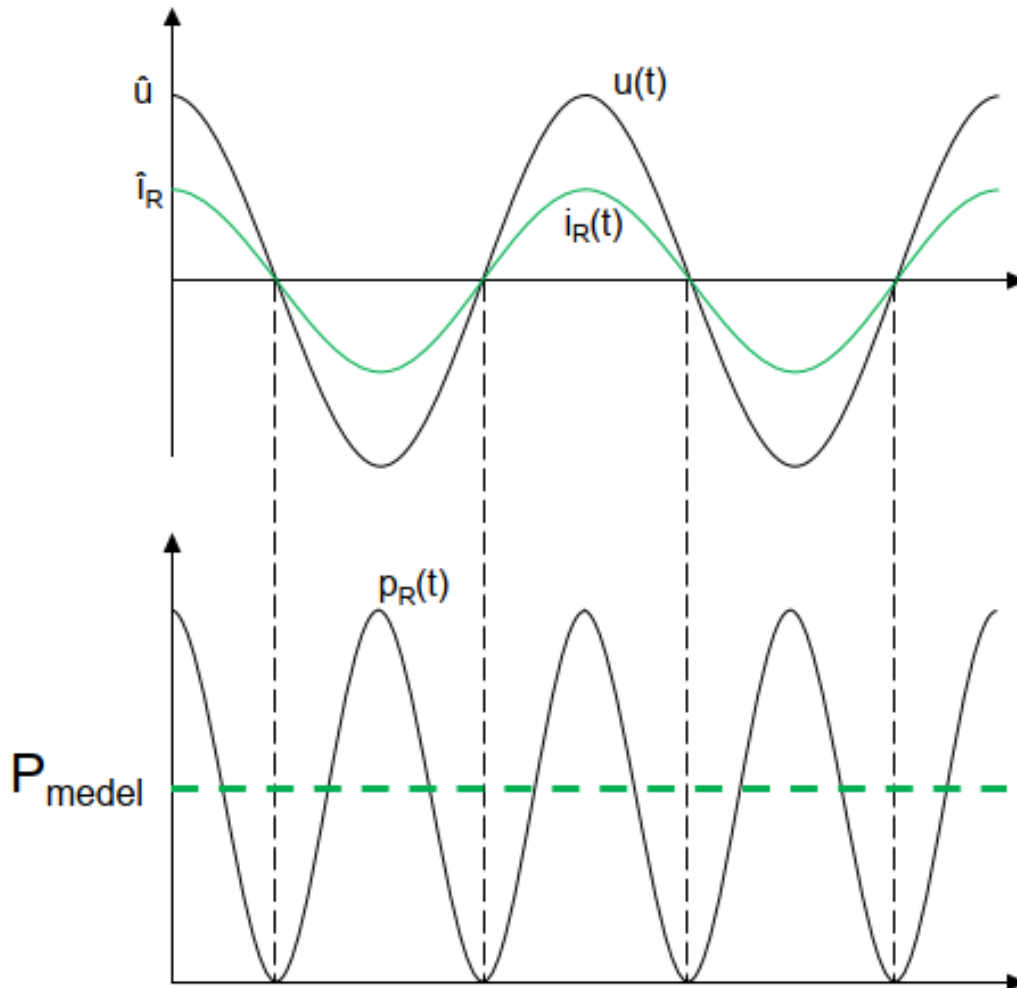
- Amplituden  $\hat{u} = U_0$ ,  $\hat{i} = I_0$  kallas också toppvärde.
- **Effektivvärde**  $U$ : Det kvadratiska medelvärdet av en elektrisk storhet kallas effektivvärde. RMS (Root Mean Square).

$$\begin{aligned}
 U &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_0^2 \sin^2(\omega t) dt} = \sqrt{\frac{2U_0^2}{T} \int_0^{T/2} \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}} \\
 &= \sqrt{\frac{2U_0^2}{T} \int_0^{T/2} \frac{1}{2} dt - \frac{2U_0^2}{T} \int_0^{T/2} \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt} = \sqrt{\frac{2U_0^2}{T} \left[ \frac{t}{2} \right]_0^{T/2} - \frac{2U_0^2}{T} \left[ \frac{\sin(2\omega t)}{4\omega} \right]_0^{T/2}} \\
 &= \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{\frac{\omega U_0^2}{\pi} \left[ \frac{t}{2} \right]_0^{\pi/\omega} - \frac{\omega U_0^2}{\pi} \left[ \frac{\sin(2\omega t)}{4\omega} \right]_0^{\pi/\omega}} = \sqrt{\frac{\omega U_0^2}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2\omega} - 0 \right] - \frac{\omega U_0^2}{\pi} [0 - 0]} = \sqrt{\frac{U_0^2}{2}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}
 \end{aligned}$$

- $\hat{u} = U_0 = \sqrt{2}U$
- Jämför med effekt för likström i resistans  $P = U I = \frac{U^2}{R} = R I^2$ . Medelvärdesbildar något som är proportionellt mot effekt kan enkelt användas vid effektberäkningar.

# Effekten i R:

$$p_R(t) = \hat{u} \hat{i}_R \cos^2 \omega t = \hat{u} \hat{i}_R \frac{\cos 2\omega t + 1}{2}$$



- Toppvärde  $\hat{u} \hat{i}_R$
- Medelvärde

$$\frac{\hat{u} \hat{i}_R}{2} = P_{medel} = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt$$

- Definitionen av aktiv effekt P!

- $p_R(t)$  är energin per tidsenhet som lämnar R som värme
- $p_R(t)$  varierar med 100 Hz
- P anger medelvärdet av  $p_R(t)$

# DC-U som ger samma $P_{medel}$ som $\hat{u} \cos \omega t$ ?

- Man kan också skriva  $p_R(t) = u^2(t)/R$ :

$$P_{medel} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt = P_{DC} = \frac{U^2}{R}$$

Förra sidan:

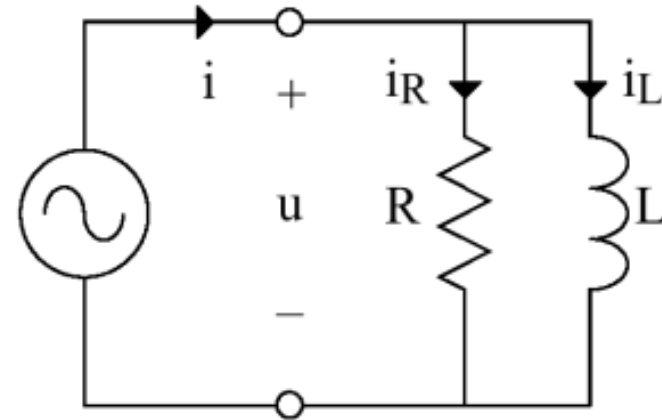
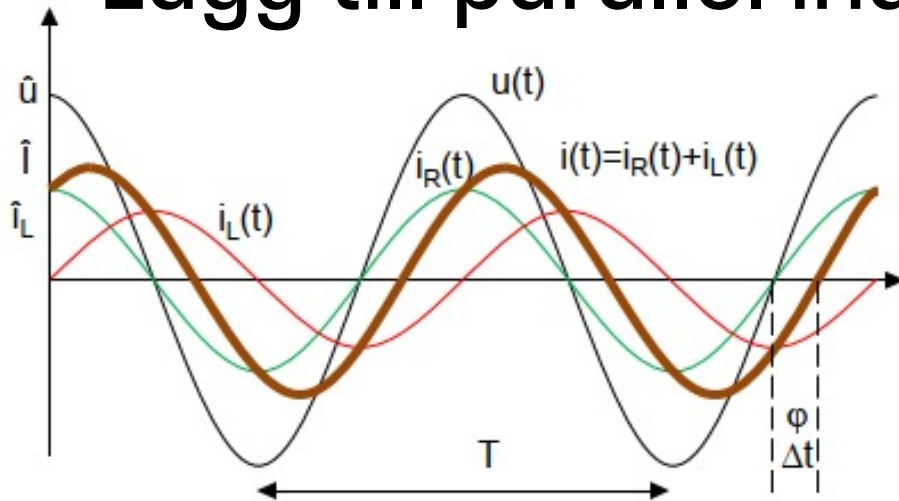
$$P_{medel} = \frac{\hat{u} \hat{i}_R}{2}$$

- För att koppla samman  $u(t)$  med  $U$  behövs inte  $R$ :

$$\begin{aligned}
 U &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \hat{u}^2 \cos^2 \omega t dt} = \hat{u} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{\cos 2\omega t + 1}{2} dt} \\
 &= \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{T} \left[ \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} + t \right]_0^T} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{0 + T}{T}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}
 \end{aligned}$$

- $\hat{u}/\sqrt{2}$  är rms-värdet eller effektivvärdet av  $u(t)$  och  $I = \frac{\hat{i}_R}{\sqrt{2}}$   $P_{medel} = \frac{\hat{u} \hat{i}_R}{2} = UI_R$

# Lägg till parallel induktans



$$u(t) = \hat{u} \cos \omega t$$

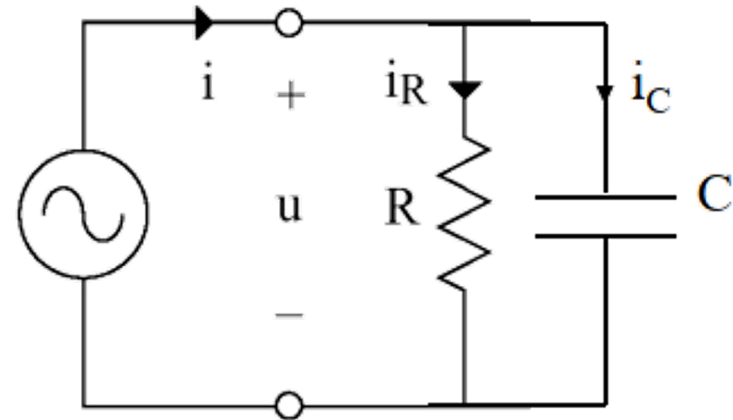
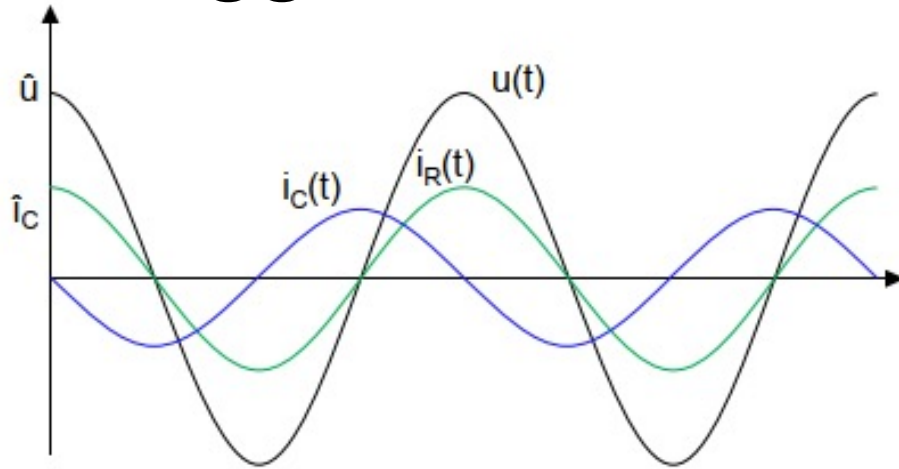
$$L \frac{di_L(t)}{dt} = u_L(t) = u(t) \Rightarrow i_L(t) = \frac{\hat{u}}{\omega L} \sin \omega t = \hat{i}_L \sin \omega t$$

$$i(t) = i_R(t) + i_L(t) = \hat{i}_R \cos \omega t + \hat{i}_L \sin \omega t = \hat{i} \cos(\omega t - \varphi) \quad \hat{i} = \sqrt{\hat{i}_R^2 + \hat{i}_L^2}$$

- RL-lastens ström  $i(t)$  är vinkeln  $\varphi$  senare än spänningen  $u(t)$
- Fäsförskjutningen  $\varphi = \text{atan}(\hat{i}_L/\hat{i}_R)$  eller  $\varphi = (\Delta t/T)360^\circ$



# Lägg till parallel kapacitans



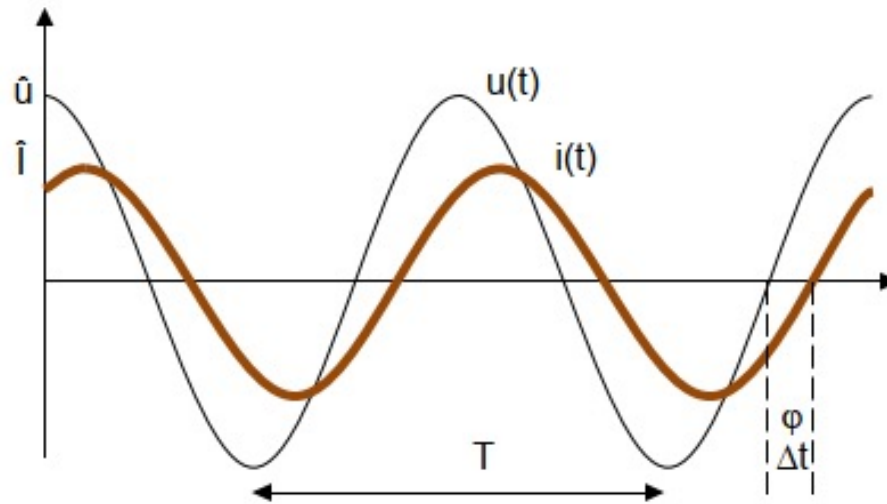
$$u(t) = \hat{u} \cos \omega t$$

$$C \frac{du_C(t)}{dt} = i_C(t) \Rightarrow i_C(t) = -\omega C \hat{u} \sin \omega t = -\hat{i}_C \sin \omega t$$

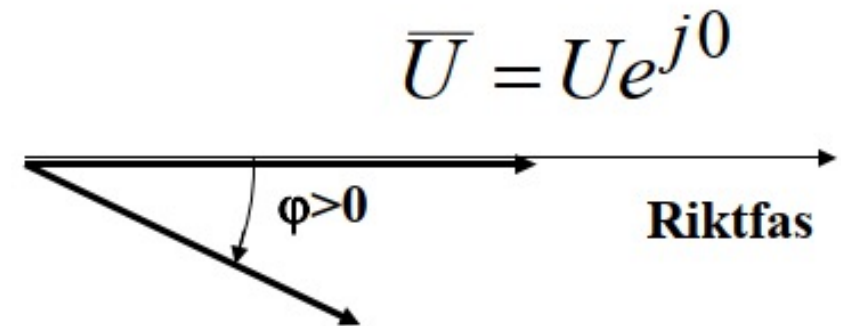
$$i(t) = i_R(t) + i_C(t) = \hat{i}_R \cos \omega t - \hat{i}_C \sin \omega t$$

- 180° fasskillnad mellan  $i_C(t)$  och  $i_L(t) \Leftrightarrow$  olika tecken
- RC-lastens ström  $i(t)$  är en vinkel före spänningen  $u(t)$

# Definition: Komplex spänning och ström



- Komplex storhets belopp  $U, I$ 
  - **Effektivvärde i denna kurs**
- Komplex storhets argument  $\varphi$ 
  - Riktfas  $0^\circ$ , oftast en spänning
  - Fas relativt referensfas (riktfas)
  - $\varphi :=$  fasvinkeln  $i(t)$  är efter  $u(t)$



$$\bar{U} = Ue^{j0}$$

$$\bar{I} = Ie^{-j\varphi}$$

$$|\bar{U}| = U = \hat{u} / \sqrt{2}$$

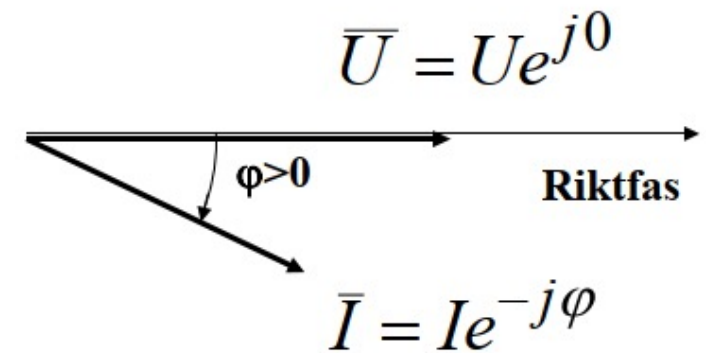
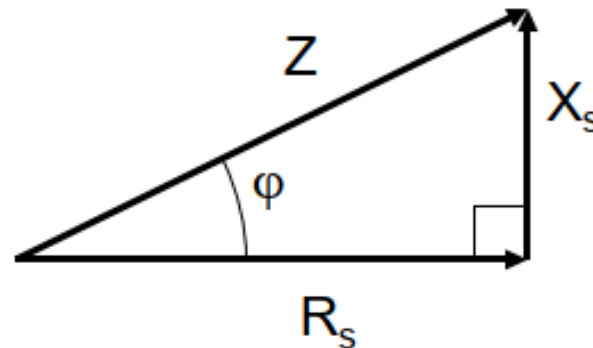
$$\arg(\bar{U}) := 0^\circ$$

# Komplex impedans och ström

- Ohm's lag gäller även komplext

$$\bar{U} = \bar{Z} \bar{I}$$

$$\bar{Z} = R_s + jX_s$$



- Tecken på strömmens fasvinkel
  - - Induktiv krets,  $\bar{Z} = R + j\omega L = Ze^{j\phi}$ ,  $\phi$  **positivt**
  - - Strömmen  $\bar{I} = \bar{U}/\bar{Z} = Ie^{-j\phi}$ , med själva  $\phi$  **positivt**
  - - INTE  $\bar{I} = Ie^{j\phi}$  med negativt  $\phi$

# Förut parallellkoppling nu seriekoppling?

- Serieimpedans (vanligast)

$$\bar{Z} = R_s + jX_s$$

- Samma I i R och X
- Spänningsdelning

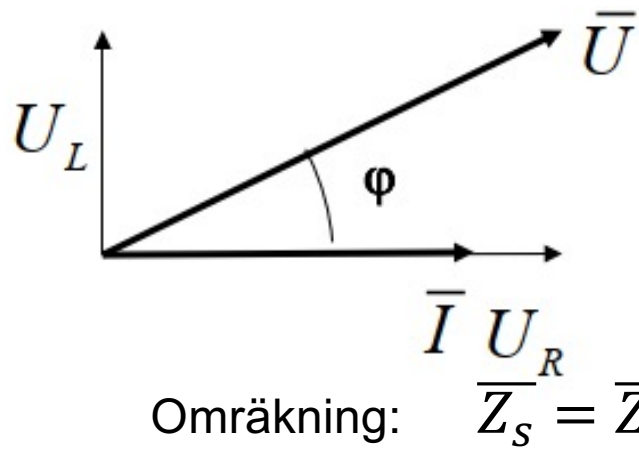
$$\bar{U} = U_R + jU_L = R_s I + jX_s I$$

- Parallelimpedans

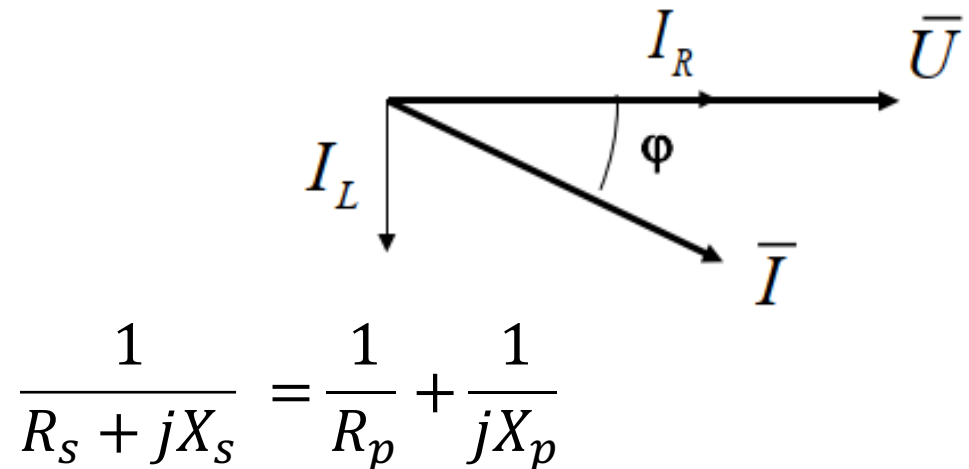
$$\bar{Z} = R_p // jX_p$$

- Samma U över R och X
- Strömdelning

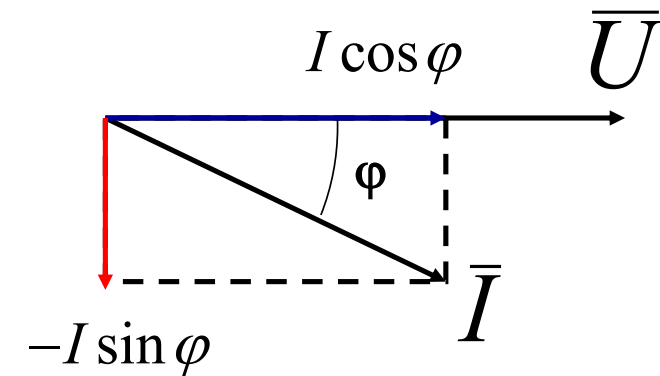
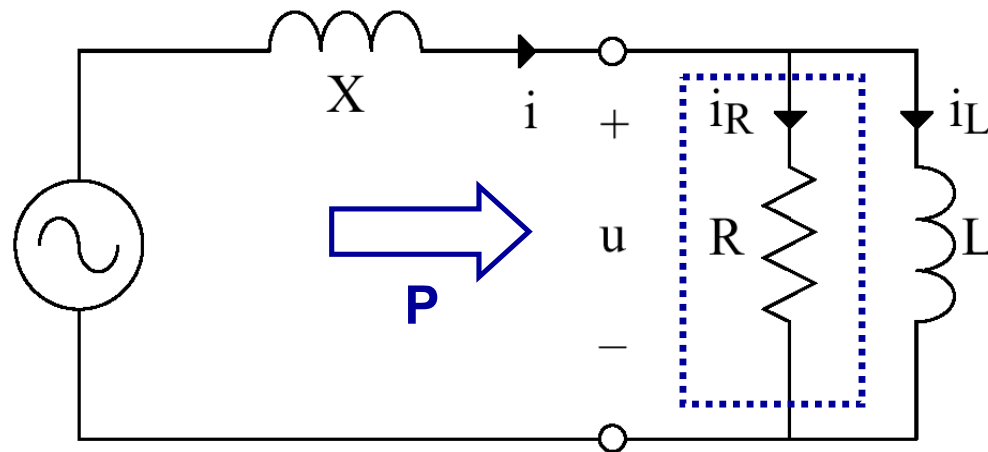
$$\bar{I} = I_R + jI_L = \frac{U}{R_p} + \frac{U}{jX_p}$$



enklast



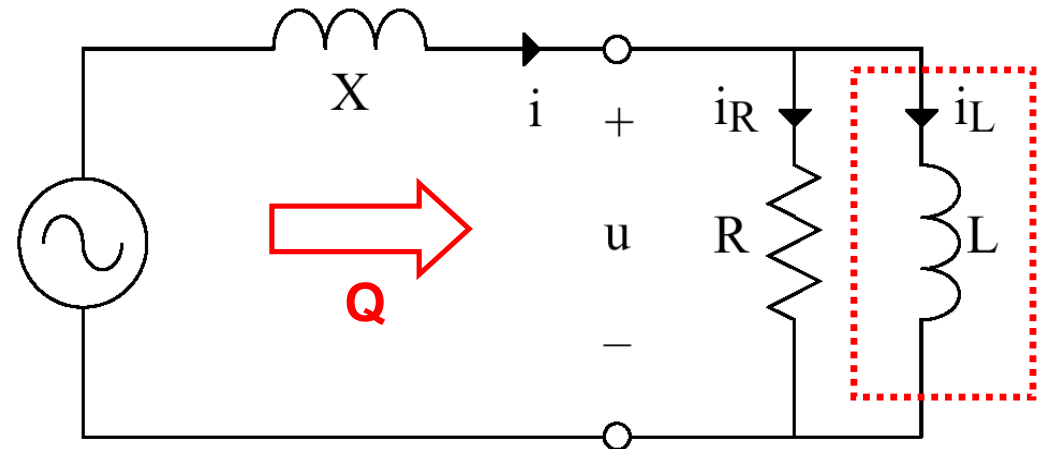
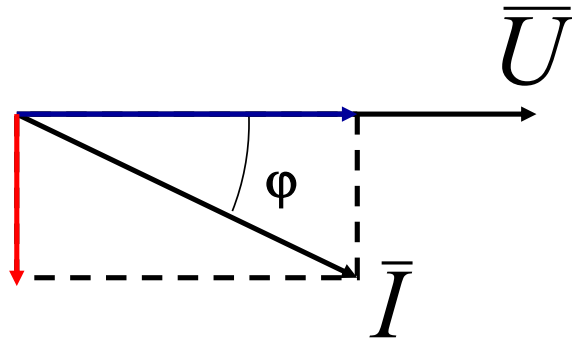
# Aktiv effekt



$$P = U I \cos \varphi = U I_R = R I_R^2 = \frac{U^2}{R}$$

*Del av  $\bar{I}$  i fas med  $\bar{U}$  eller vice versa*  
*Enhet Watt, W*

# Reaktiv effekt



$$Q = UI \sin \varphi = -UI_L = XI_L^2 = \frac{U^2}{X}$$

*Del av  $\bar{I}$  med fas  $\pm 90^\circ$  från  $\bar{U}$*

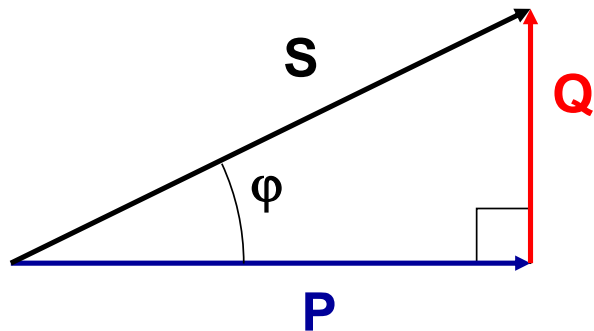
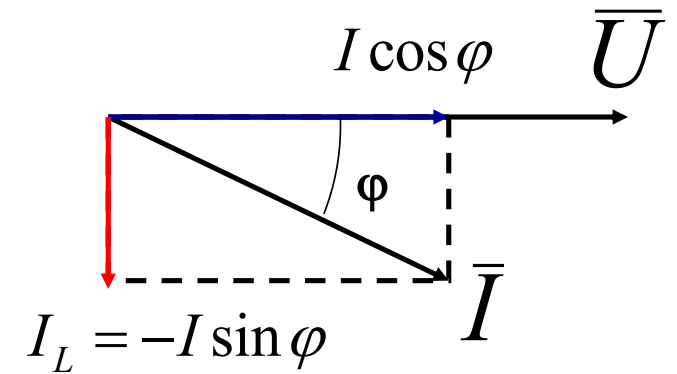
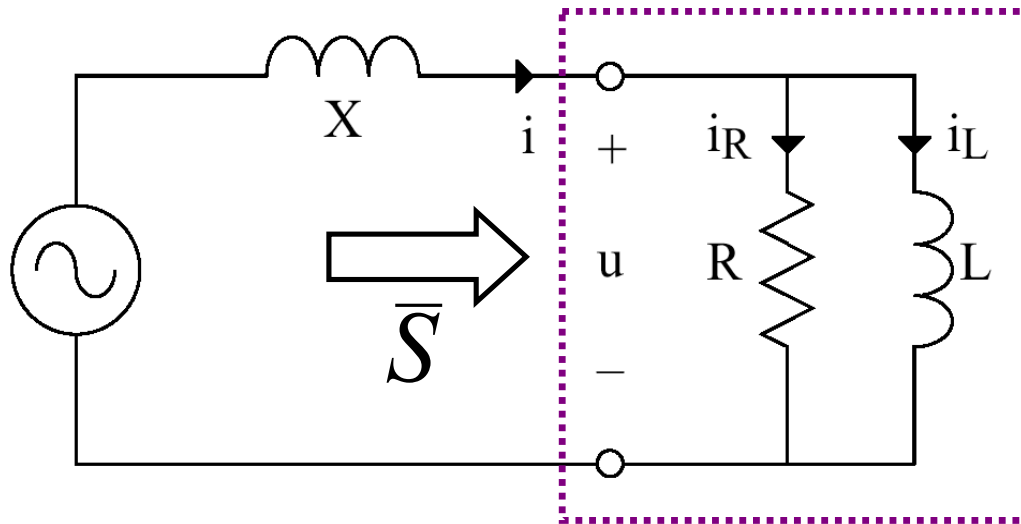
*Rent induktiv last:  $\bar{I}$  90 efter  $\bar{U}$ ,  $Q$  definierat  $> 0$*

*Rent kapacitiv last:  $\bar{I}$  90 före  $\bar{U}$ ,  $Q$  definierat  $< 0$*

*Enhet volt ampere reaktiv, var*



# Komplex effekt

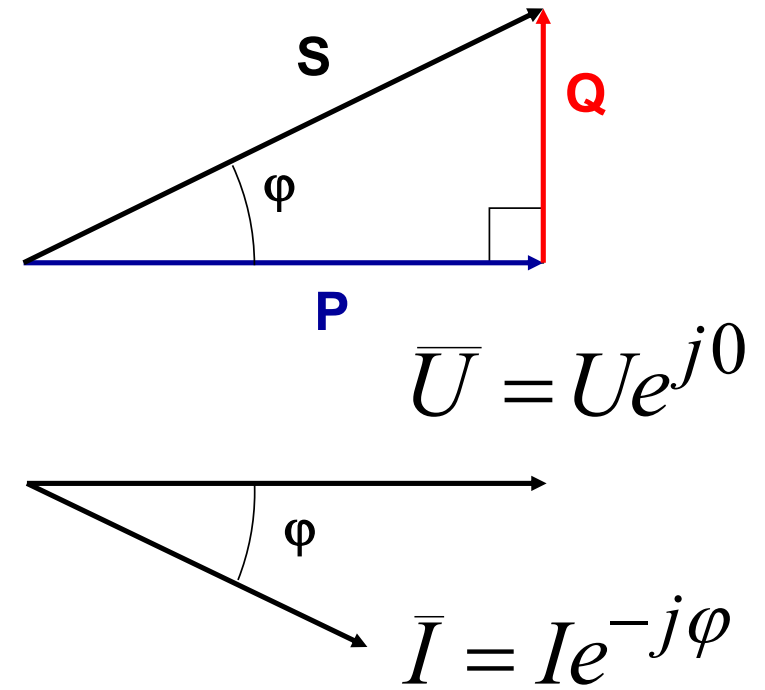
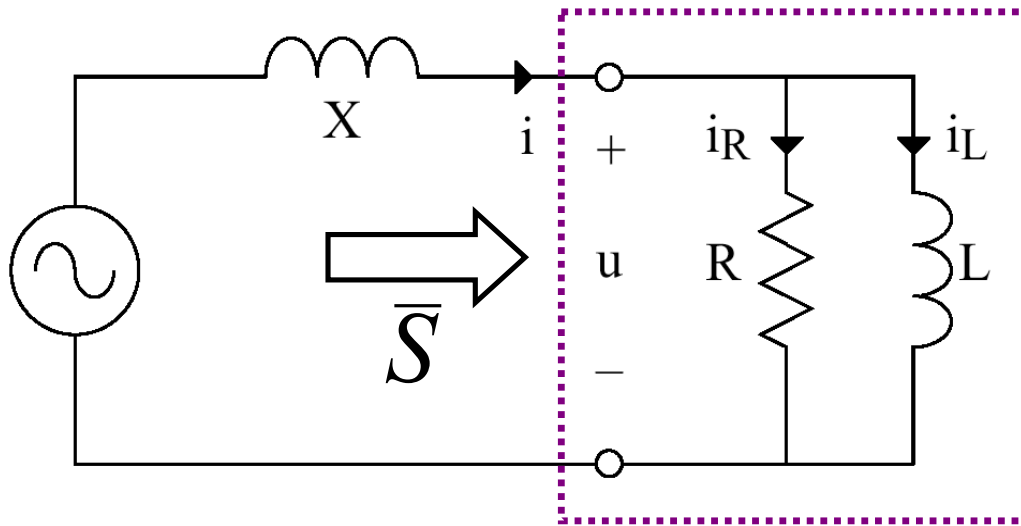


$$\bar{S} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ$$

P aktiv effekt i R

Q reaktiv effekt i L

# Skenbar effekt

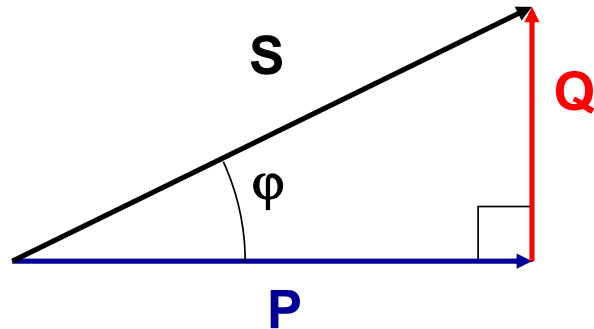


$$\bar{S} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = \bar{U}\bar{I}^* = UIe^{j\varphi}$$

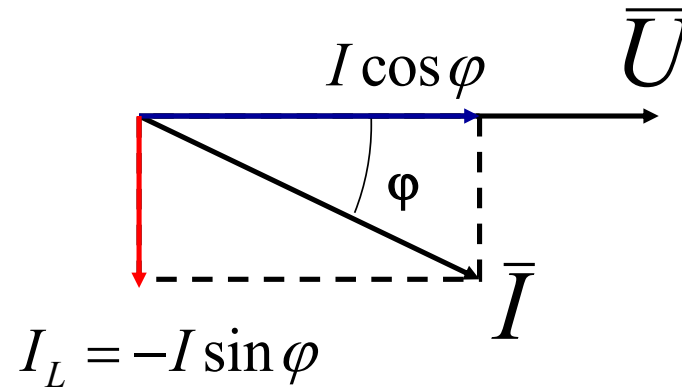
$$|\bar{S}| = S = UI = \text{skenbar effekt}$$

= skenbar effekt  
enhet voltampere, VA

# Effektfaktorn $\cos\varphi$



$$P = UI \cos\varphi = S \cos\varphi$$



$$I_L = -I \sin\varphi$$

Effektfaktorn  $\cos\varphi$  anger andel P av S

- Värde på  $\cos\varphi$ 
  - $\leq 1$  där 1 motsvarar  $Q=0$
  - Tillägg (ind) anger att  $Q>0$
  - Tillägg (kap) anger att  $Q<0$

# Uttryck för enfaseffekt

$$S = |\bar{S}| = UI = \frac{U^2}{|\bar{Z}|} = |\bar{Z}| I^2$$

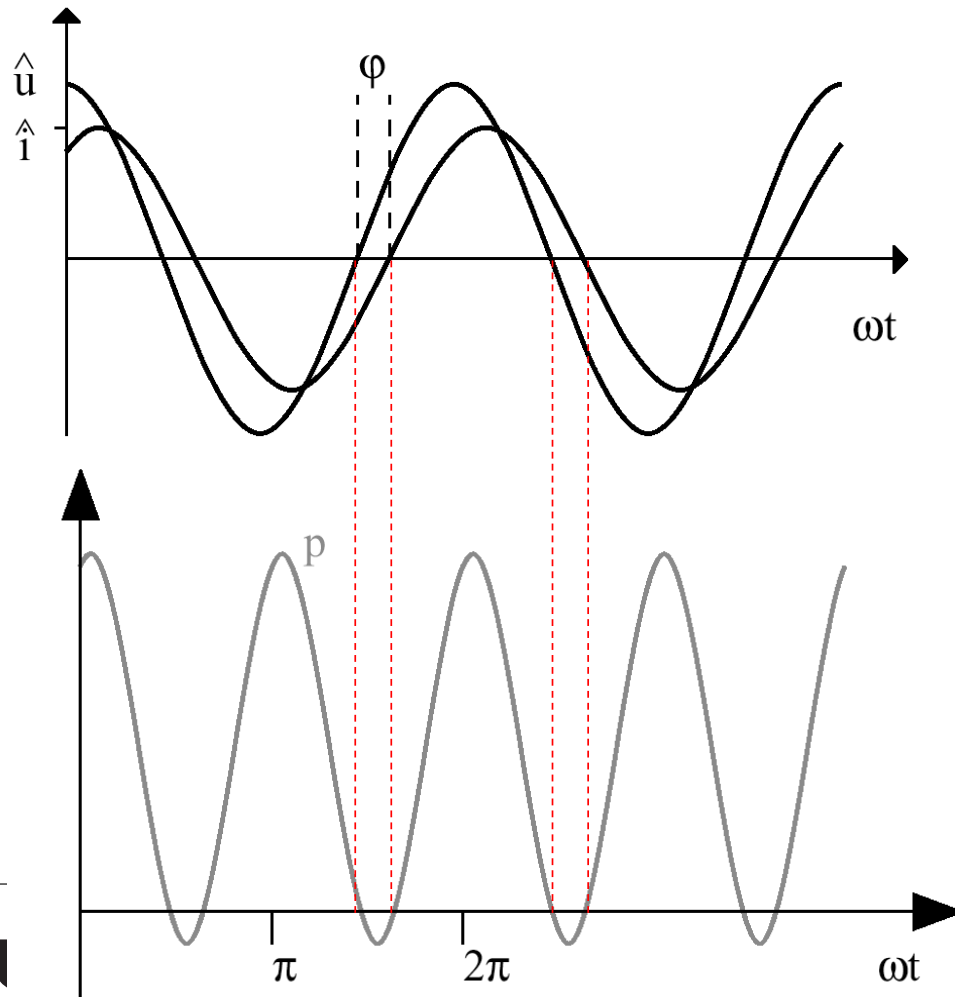
$$\bar{S} = \bar{U}\bar{I}^* = P + jQ$$

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi = \frac{U^2}{R_p} = R_s I^2$$

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi = \frac{U^2}{X_p} = X_s I^2$$

- Rita koppling för att se aktuell spänning och ström!

# Återgå till sinusformade storheter



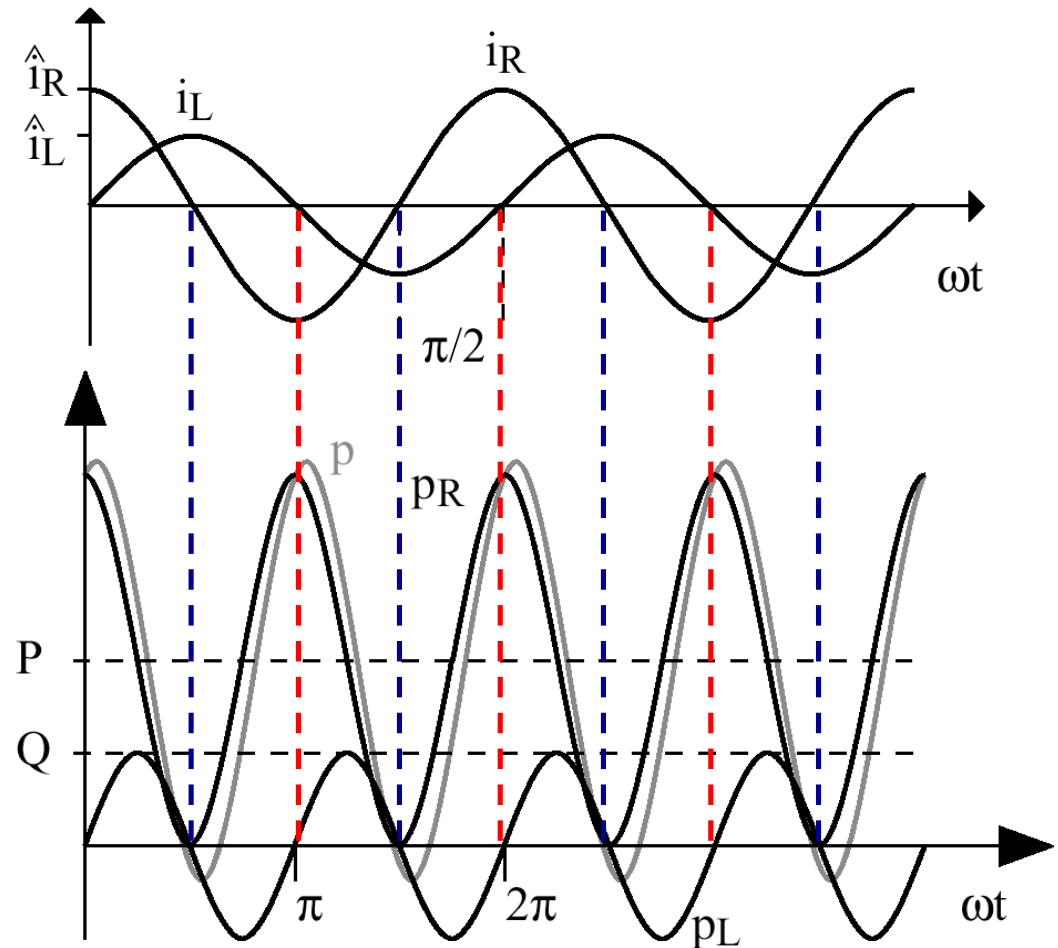
- $u(t)$  och  $i(t)$  är 50 Hz
- $p(t)=u(t)i(t)$  är 100 Hz!
- $p(t)<0$  ibland!
- Medel- $p(t)>0$



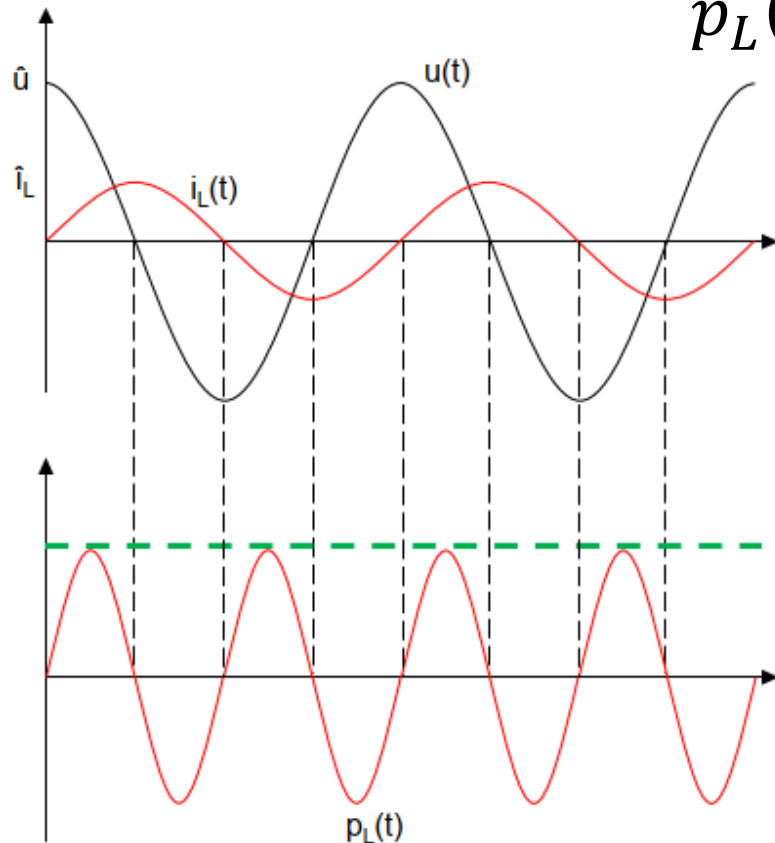
# Dela upp $i(t)$ i $i_R$ och $i_L$

- $i_R$  i fas med  $u(t)$ :  $p_R(t) = u(t)i_R(t)$
- $i_L$   $90^\circ$  efter  $u(t)$ :  $p_L(t) = u(t)i_L(t)$
- $p_R + p_L = p(t)$
- Både  $p_R$  och  $p_L$  100 Hz
- $p_R$  redan behandlat

$$p_{R,medel} = P = \frac{\hat{u}\hat{i}_R}{2} = \frac{\hat{u}\hat{i}_R}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = UI_R$$



# Effekten i L:



$$p_L(t) = \hat{u} \hat{i}_L \cos \omega t \sin \omega t = \hat{u} \hat{i}_L \frac{\sin 2 \omega t}{2}$$

- Medelvärde=0
- Toppvärde  $\frac{\hat{u}\hat{i}_L}{2} = \frac{\hat{u}\hat{i}_L}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = UI_L$

- Detta är reaktiv effekt Q!

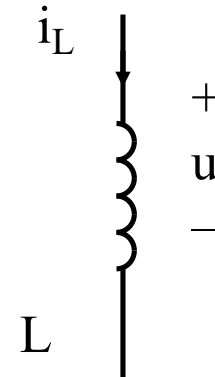
$p_L(t)$  varierar med 100 Hz

Q är toppvärdet av  $p_L(t)$

- Vad för energi pendlar enligt  $p_L(t)$  mellan L och källan?

# Energi lagrad i L

- Ur formelsamling  $W_L = \frac{1}{2} Li_L^2(t)$



- Effekt är energi per tidsenhet = energins tidsderivata

$$\frac{dW_L}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Li_L^2(t) \right)$$

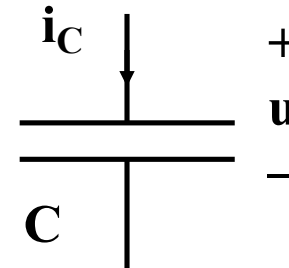
$$\frac{dW_L}{dt} = Li_L \frac{di_L}{dt} = i_L L \frac{di_L}{dt} = i_L u = p_L$$

- Q anger förändringstakten på magnetisk energi i L



# Energi lagrad i C

- Ur formelsamling  $W_C = \frac{1}{2} C u^2(t)$



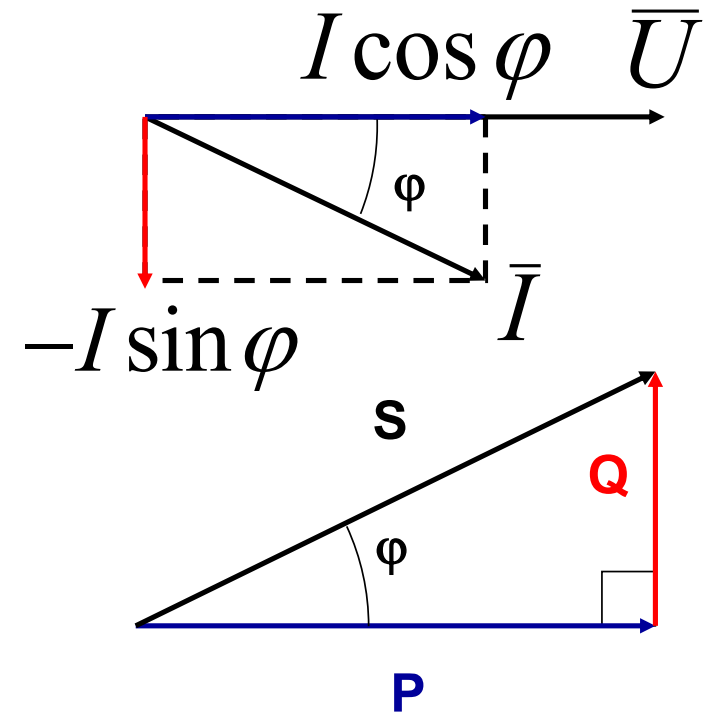
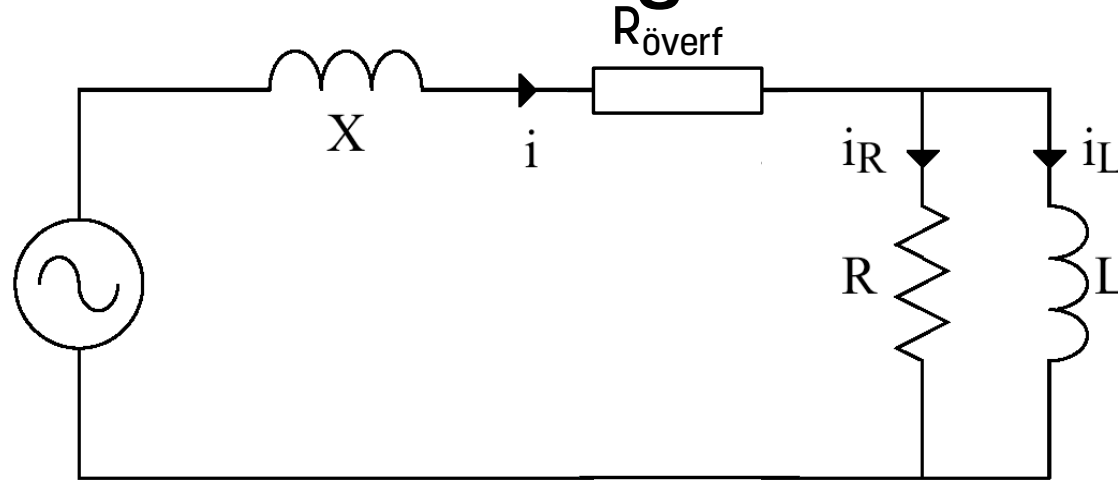
- Effekt är energi per tidsenhet = energins tidsderivata

$$\frac{dW_C}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C u^2(t) \right)$$

$$\frac{dW_C}{dt} = C u \frac{du}{dt} = u C \frac{du}{dt} = u i_C = p_C$$

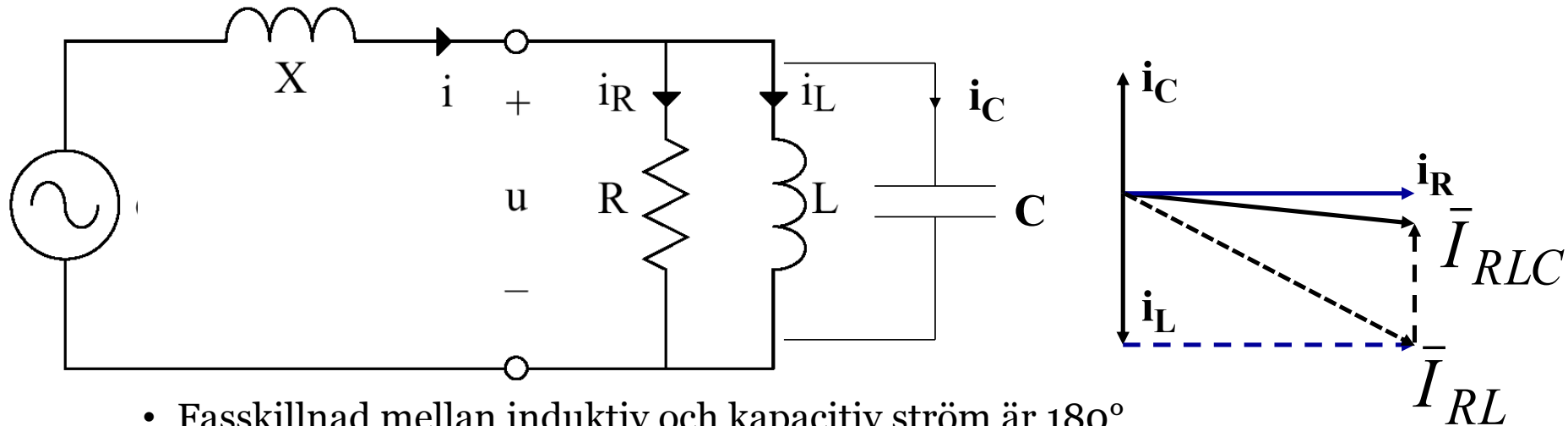
Q anger förändringstakten på elektrostatisk energi

# Dimensionering



- Elnätet försörjer både R och L
  - Bara P ger nyttigt arbete
- Totalström och skenbar effekt går i ledningar och transformatorer
  - Avgör dimensionering
  - Ger överföringsförluster  $P = R_{\text{överf}} I^2$  som man vill minimera

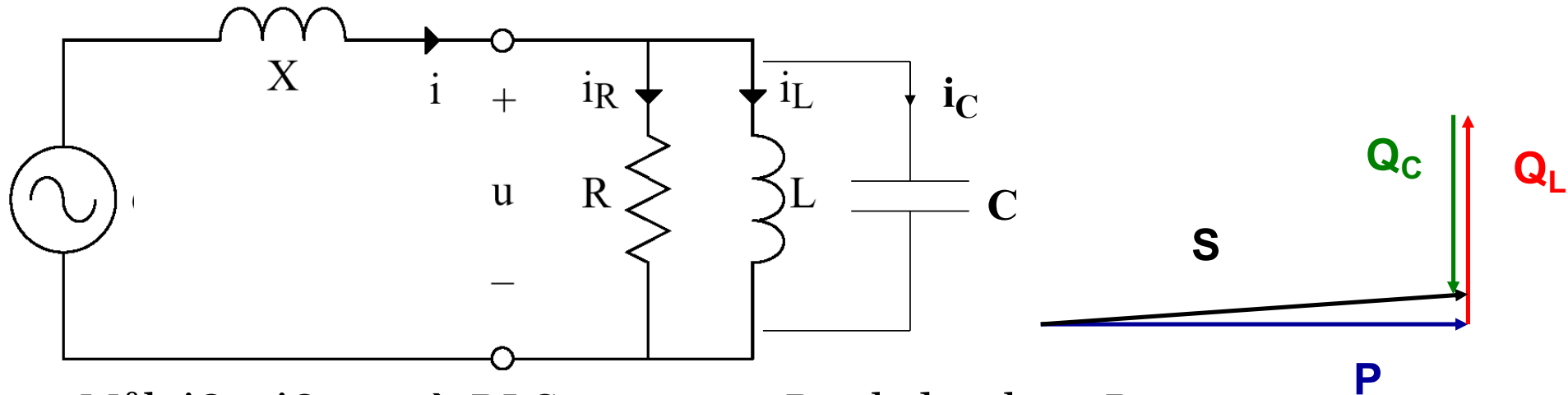
# Reaktiv effektkompensering - ström



- Fasskillnad mellan induktiv och kapacitiv ström är  $180^\circ$
- Addera dem!
  - Reducerar strömmen till lasten
  - Reducerar förlusterna i överföringen

• OBS! Strömmarna  $i_R$  och  $i_L$  till själva  $R$  och  $L$  oförändrade, men strömmen i från elnätet minskas då  $C$  matar  $L$

# Reaktiv effektkompensering - effekt



- Mål:  $jQ_L + jQ_C = 0 \rightarrow$  RLC ser ut som R och drar bara P

$$jQ_L = \bar{U} \bar{I}_L^* = \bar{U} \left( \frac{\bar{U}}{j\omega L} \right)^* = j \frac{U^2}{\omega L}$$

$$jQ_C = \bar{U} \bar{I}_C^* = \bar{U} \left( \frac{\bar{U}}{1/(j\omega C)} \right)^* = -j\omega C U^2$$

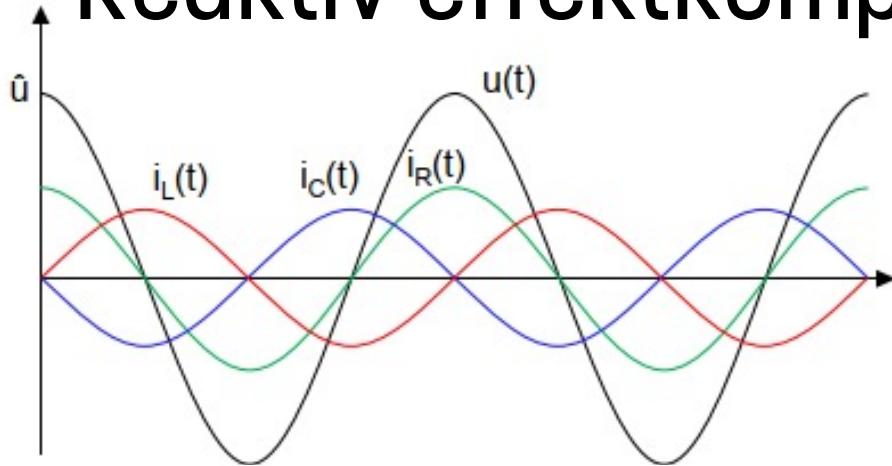
$$\omega^2 LC = 1$$

$$C = \frac{Q_L}{\omega U^2}$$

Resonans i L och C @ 50 Hz!

Perfekt reaktiv effektkompensering:  $jQ_L + jQ_C = 0$

# Reaktiv effektkompensering - sinus



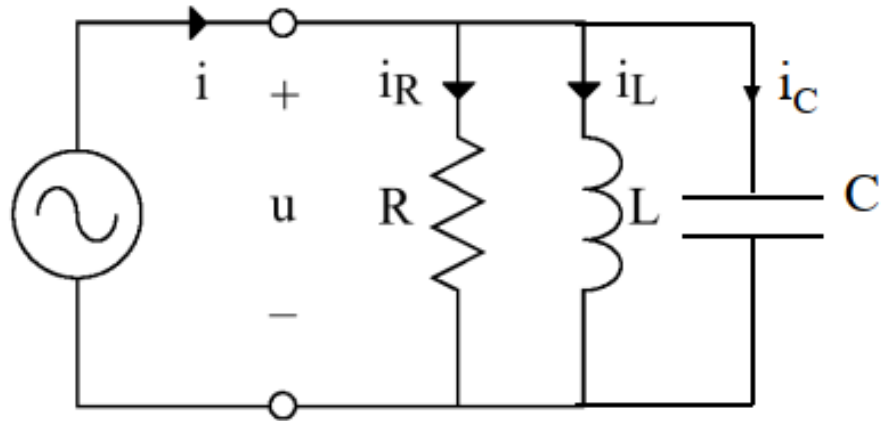
$$u(t) = \hat{u} \cos \omega t$$

$$i_L(t) = \frac{\hat{u}}{\omega L} \sin \omega t \quad i_C(t) = -\omega C \hat{u} \sin \omega t$$

$$i(t) = i_R(t) + i_L(t) + i_C(t) = \hat{i}_R \cos \omega t + \hat{i}_L \sin \omega t - \hat{i}_C \sin \omega t$$

Om  $\omega C = 1/(\omega L)$  tar  $i_C(t)$  ut  $i_L(t)$  och  $i(t) = i_R(t)$ :

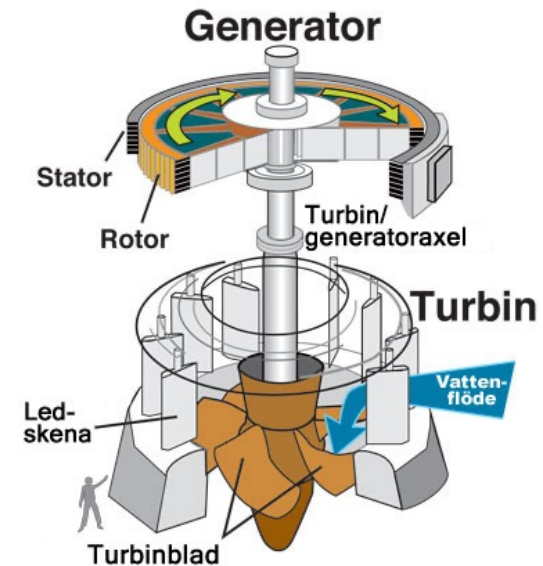
- Perfekt (reaktiv effekt)kompensering då  $\omega^2 LC = 1$
- LC resonanskrets med resonansfrekvens  $\omega = 2\pi f$



# Mekanisk effekt

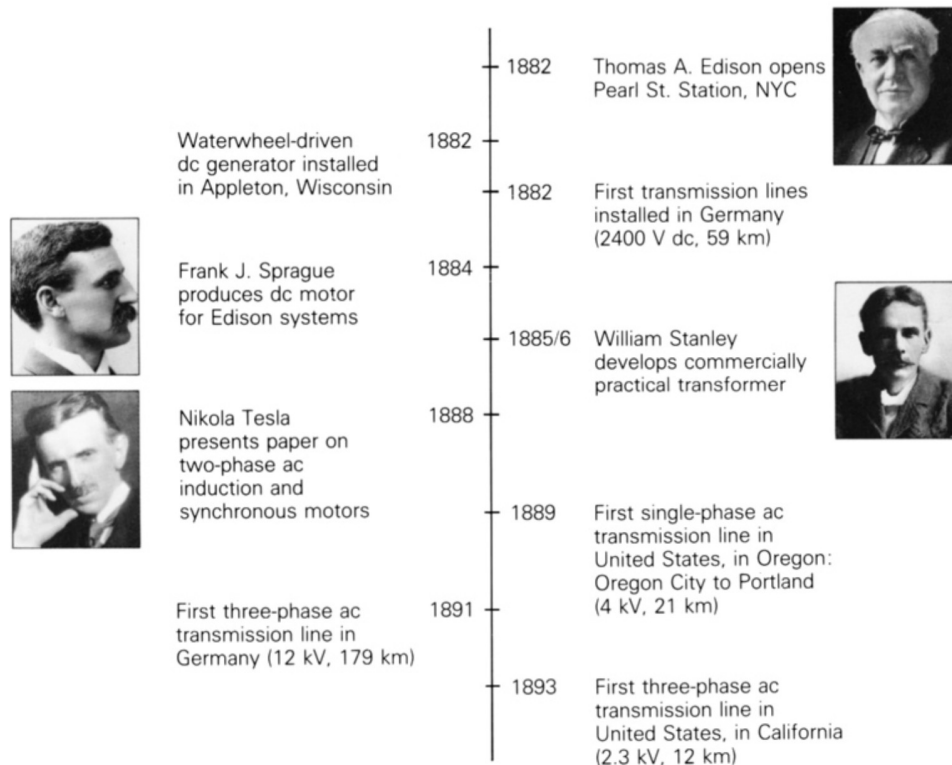
- $P_{\text{mek}} = T\omega$
- Vridmoment  $T$  anges i Nm
  - Beräknas som  $\vec{T} = \vec{F} \times \vec{r} = Fr \sin\alpha$  där  $\alpha$  är vinkeln mellan  $\vec{F}$  och  $\vec{r}$ .  
Om de är vinkelräta blir  $T = Fr$
- Vinkelhastighet  $\omega$  anges i rad/s
- Exempel: En elmotor lämnar 2,2 kW (3 hk) mekanisk effekt vid ett axelvarvtal på 3000 rpm.
 
$$T = P_{\text{mek}} / \omega = 2200 / ((3000/60) \cdot 2\pi) = 7.00 \text{ Nm}$$
- Exempel: En växellåda (även cykelväxlar) ökar  $\omega_{\text{in}}$  till  $\omega_{\text{ut}} = k\omega_{\text{in}}$  men minskar samtidigt  $T_{\text{in}}$  till  $T_{\text{ut}} = T_{\text{in}}/k \rightarrow$ 

$$P_{\text{mek, in}} = T_{\text{in}}\omega_{\text{in}} = T_{\text{ut}}\omega_{\text{ut}} = P_{\text{mek, ut}} \text{ (förlustfri).}$$



# 3. Elkraftsystemets historia

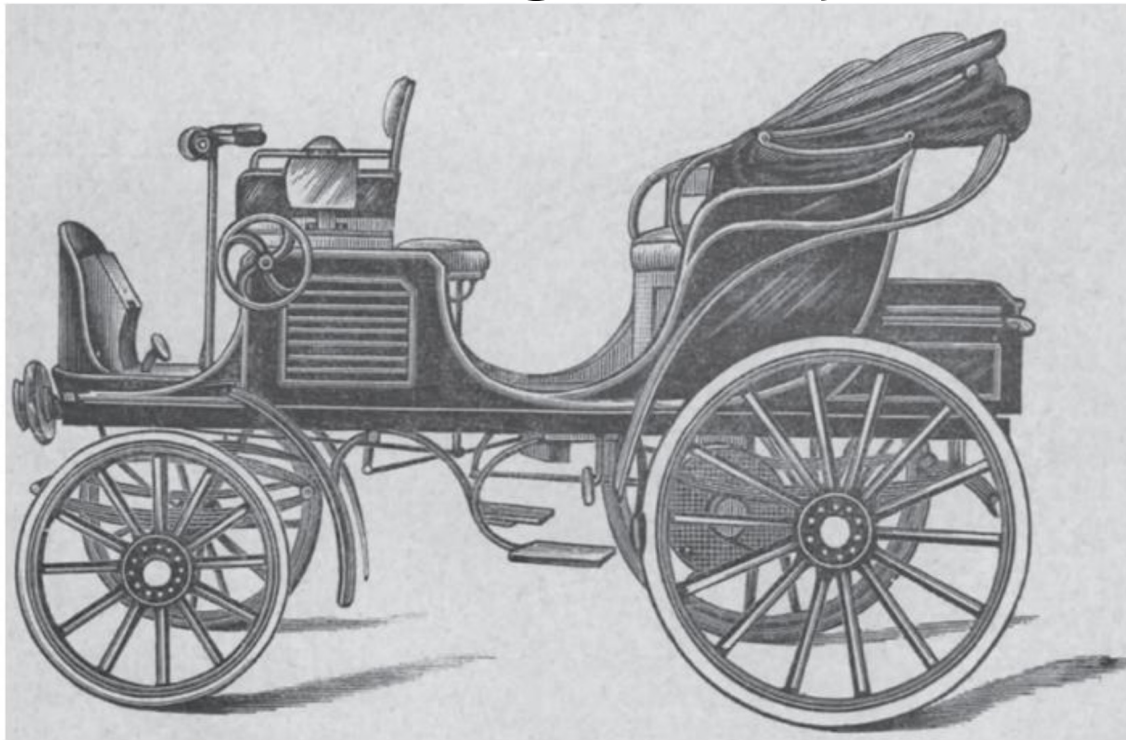
# Tidiga genombrott och händelser



Year	Event
1800	First electric battery (A. Volta)
1820	Relationship between electricity and magnetism confirmed (H. C. Oersted)
1821	First electric motor (M. Faraday)
1826	Ohm's law (G. S. Ohm)
1831	Principles of electromagnetism and induction (M. Faraday)
1832	First dynamo (H. Pixil)
1839	First fuel cell (W. Grove)
1872	Gas turbine patent (F. Stulze)
1879	First practical incandescent lamp (T. A. Edison and J. Swan, independently)
1882	Edison's Pearl Street Station opens
1883	Transformer invented (L. Gaulard and J. Gibbs)
1884	Steam turbine invented (C. Parsons)
1886	Westinghouse Electric formed
1888	Induction motor and polyphase AC systems (N. Tesla)
1889	Impulse turbine patent (L. Pelton)
1890	First single-phase ac transmission line (Oregon City to Portland)
1891	First three-phase ac transmission line (Germany)
1903	First successful gas turbine (France)
1907	Electric vacuum cleaner and washing machines
1911	Air conditioning (W. Carrier)
1913	Electric refrigerator (A. Goss)
1935	Public Utility Holding Company Act (PUHCA)
1936	Boulder dam completed
1962	First nuclear power station (Canada)
1973	Arab oil embargo, price of oil quadruples
1978	Public Utilities Regulatory Policies Act (PURPA)
1979	Iranian revolution, oil price triples; Three Mile Island nuclear accident
1983	Washington Public Power Supply System (WPPS) \$2.25 billion nuclear reactor bond default
1986	Chernobyl nuclear accident (USSR)
1990	Clean Air Act amendments introduce tradeable SO <sub>2</sub> allowances
1992	National Energy Policy Act (EPAAct)
1998	California begins restructuring
2001	Restructuring collapses in California; Enron and Pacific Gas and Electric bankruptcy



# Elbilar var vanliga i början av 1900-talet



**Figur 1.16** Elektrisk droska. Drivkällan var då som nu ett batteri. Bilen hade en elmotor på 2–2,5 hk, normal hastighet 20 km/timma. Räckvidden var omkring 40 km – inte illa i slutet av 1890-talet. Ur Die Schule des Elektrotechnikers, Alfred Holtz – Dritte band.

Otillräcklig tillgång till laddningsmöjligheter gjorde att förbränningsmotorn tog över.

# Företag & Anläggningar

1847 Tyskland	<b>Siemens &amp; Halske.</b> Började bl.a. som telefonbolag. Blir en del av <b>Siemen AG.</b> År 1880 anställer de en representant i Stockholm – mekanikus J. E. Erikson.
1874 Tyskland	<b>Schuckert &amp; Co.</b> Grundad av Sigmund Schuckert i Nürnberg. Företaget uppgick 1903 i Siemens-Schuckert-Werke. Nu en del av Siemens AG. År 1883 startar John Rosén en installationsfirma som senare blir firman Luth & Rosén. Man köper maskiner från Schuckert & Co.

1882 Schweiz	<b>Maschinenfabrik Oerlikon</b>
1883 Sverige	<b>Elektriska Aktiebolaget i Stockholm.</b> Den första fabriken återfanns i Arboga. Man sysslade främst med belysningsanläggningar. År 1889 bildades <b>Wenström och Granströms Kraftbolag*</b> . 1890 går bolagen samman och bildar <b>Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA).</b>
1883 Tyskland	<b>Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft Aktiengesellschaft (AEG).</b> Bildades som Deutsche Edison-Gesellschaft für angewandte Elektrizität
1886 USA	<b>Westinghouse</b>
1891 Schweiz	<b>Brown Boveri &amp; Cie, AG (BBC)</b> Grundas av C. E. L. Brown (1863-1924) och Walter Boveri (1865-1924)
1892 USA	<b>General Electric Company (GE)</b> Har sitt ursprung från ett Edison-bolag som bildades 1878 för att utveckla glödlampan. Genom olika bolagssammanslagningar bildades GE 1892.
1900 Storbritannien	<b>General Electric Company (GEC)</b>
1988 Sverige/ Schweiz	<b>ASEA och BBC</b> går samman och bildar <b>ABB</b>

## 1.5 Anläggningar runt om i Sverige

Det fanns flera enskilda anläggningar runt om i Sverige som arbetade med olika nätfrekvenser, som gjorde att näten inte kunde kopplas samman.

Anläggningar och nät i Sverige vid sekelskiftet år 1900 som arbetade med olika nätfrekvenser		
Frekvens p/s – Hz:	År:	Exempel på anläggning:
(10 2/3)	1896	Hofors valsverk – finverket.
15	1900	Kjellugnen vid Gysinge bruk
(16)	1896	Hofors valsverk – trådverket och mediumverket
20	1903	Alby Karbidfabrik
21,3	1899	Månsbo
25	1903	Värtaverket, Stockholm / 1918 – Untra / <b>Stockholms elektricitetsverk</b>
	1910	LKAB / Gällivare / 1911 - LKAB / Kiruna
	1915	Porjus – järnvägs elektrifiering Kiruna – Narvik / <b>Porjussystemet</b>
	1910	Trollhätte Kraftverk – elleveranser till bl.a. Göteborg, <b>Trollhättesystemet</b>
	1901	Törnshammars bruk AB
35	1898	Trollhättans karbidfabrik / 1900: Nyhammars bruk
40	1901	Ludvika / 1914 – Loforsen / 1914 <b>Ludvikasystemet</b>
(41 2/3)	1890	Motala – för gatu- och bostadsbelysning Bollnäs Nya Bryggeri / Gästgivaren J Larsson –

42	1902	AB Rottneros Bruks kraftstation vid Skarped och överföring till Sunne
45	1891	Kolboforsen 1899, Sälboda 1901, Motala, <b>Arvika-Jösseforssystemet</b>
	1900	Billesholms-Bjufs AB, Bjuf, 1903 – Jonsnereds fabriker
(46 2/3)	1895	Rydahl Manufaktur AB
48	1903	Gävle stads kraftstation vid Strömdalen
50	1894	Djursholms elektriska belysning
	1895	Stockholm-Rimbo järnvägs AB
50 *	1895	J.H. Munktells Pappersfabriks AB, Bregsgården,
	1897	Fagersta Bruks AB, överföring till Semla/Ramnäs Bruks AB – valsverket i Ramnäs, Hornsdals järnverks AB
52	1902	Stridsberg & Biörck i Trollhättan
56,5	1902	Alby Karbidfabrik
60	1894	Morgårdshammars Mek. Verkstad AB m.fl.
60 **	1892	Fagersta
	1894	Boxholmsbruk, Bergvik & Ala Nya AB,
	1896	Hofors valsverk – motorer, <b>Grängesbergssystemet</b>
70 ***	1893	Hellsjön – Grängesberg
	1898	Enkullen/Lernbo

Figur 1.9 Anläggningar med olika frekvenser.

\* 50 p/s hade blivit förhärskande på kontinenten under 1890-talet. Från och med bygget av Älvkarleby Kraftverk – klar 1915 – blev 50 p/s (Hz) praktiskt taget standard i Sverige.

\*\* En influens från USA.

\*\*\* Hellsjön – Grängesberg var Sveriges första 3-fasöverföring.

## Ur Elkrafthandboken Elkraftsystem1

# 3. Summering

# Sammanfattning

1. En komplex ströms belopp = strömmens .....
2. Spänning (rms) gånger ström (rms) ger ....., med enheten VA
3. Komplex effekt delas upp i .... och ..... effekt med enheter ... och ...
4. Verkningsgrad är kvoten mellan ..... och .....
5. Med 50 Hz-spänning varierar effekten med frekvensen .... Hz
6. För en resistans är medelvärdet av  $u(t)i(t)$  ..... och anger energin per tidsenhet som .....
7. För en induktans är toppvärdet av  $u(t)i(t)$  ..... och anger hur energin som är lagrad i induktansen .....
8. Vid reaktiv effektkompensering väljs C så att .....=0

# Sammanfattning

1. En komplex ströms belopp = strömmens effektivvärde
2. Spänning (rms) gånger ström (rms) ger skenbar effekt, med enheten VA
3. Komplex effekt delas upp i aktiv och reaktiv effekt med enheter W och var
4. Verkningsgrad är kvoten mellan nyttig aktiv uteffekt och total aktiv ineffekt
5. Med 50 Hz-spänning varierar effekten med frekvensen 100 Hz
6. För en resistans är medelvärdet av  $u(t)i(t)$  aktiv effekt och anger energin per tidsenhet som lämnar resistansen som värme
7. För en induktans är toppvärdet av  $u(t)i(t)$  reaktiv effekt och anger hur energin som är lagrad i induktansen varierar med tid
8. Vid reaktiv effektkompensering väljs C så att  $jQ_L + jQ_C = 0$

# TSFS 17 Elkraftsystem

Föreläsning 1

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

Lars Eriksson, Professor  
ISY, Fordonssystem