

Föreläsningsmaterialet bygger på
material av:
Olof Samuelsson – Lund

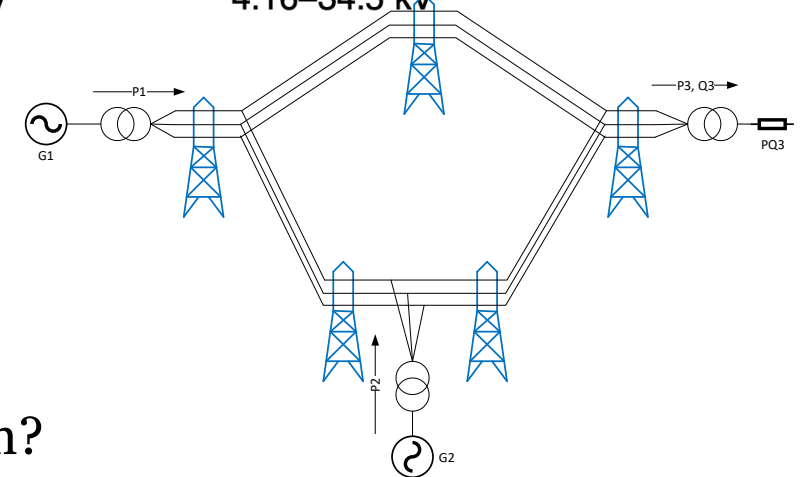
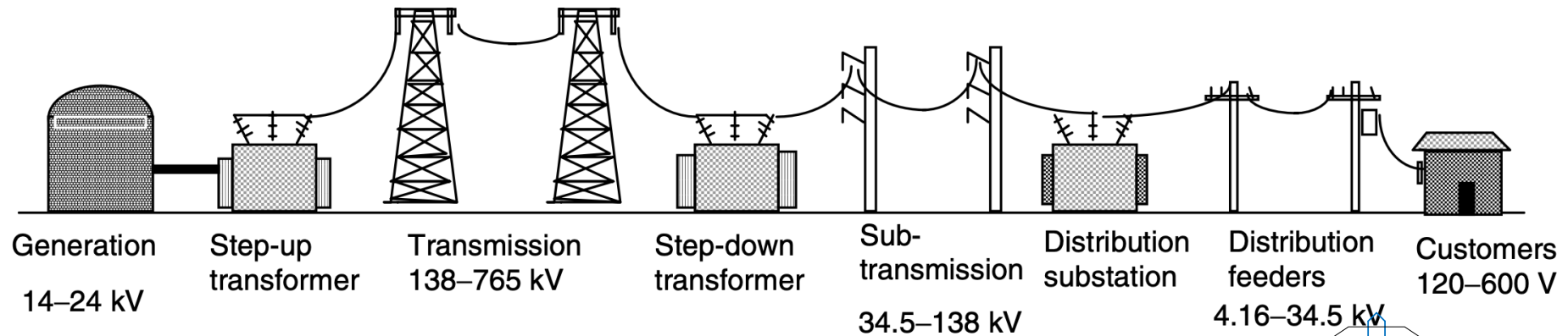
TSFS17 Elkraftsystem

Fö 4 - Transmissionsnätet

Lars Eriksson, professor
ISY, Fordonssystem

2. Modelling - Beräkningsverktyg

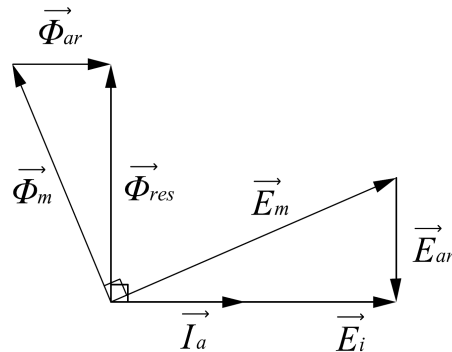
En-dimensionell bild av Elkraftsystemet



Idag:
Transmissionsnätet som system.
Hur beskriver vi många ström vägar och balansen?

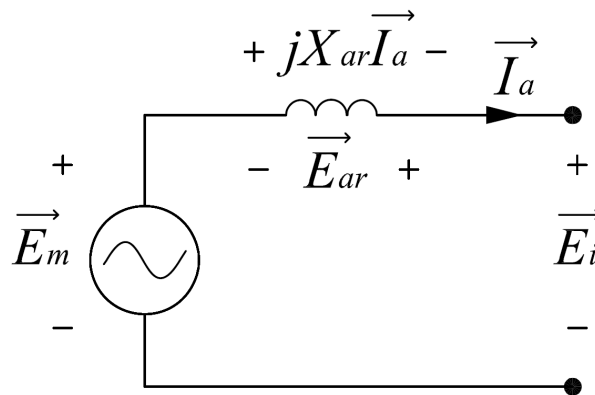
2. Repetition

Synkrongenerator – förenklat ekvivalent schema



- Belastning \rightarrow Ström \vec{I}_a i lindningen
- Strömmen ger ett eget roterande flöde $\vec{\Phi}_{ar}$ i fas med \vec{I}_a . Detta kallas *ankarreaktion*.

$$\vec{\Phi}_m + \vec{\Phi}_{ar} = \vec{\Phi}_{res} \text{ inducerar } \vec{E}_m + \vec{E}_{ar} = \vec{E}_i$$

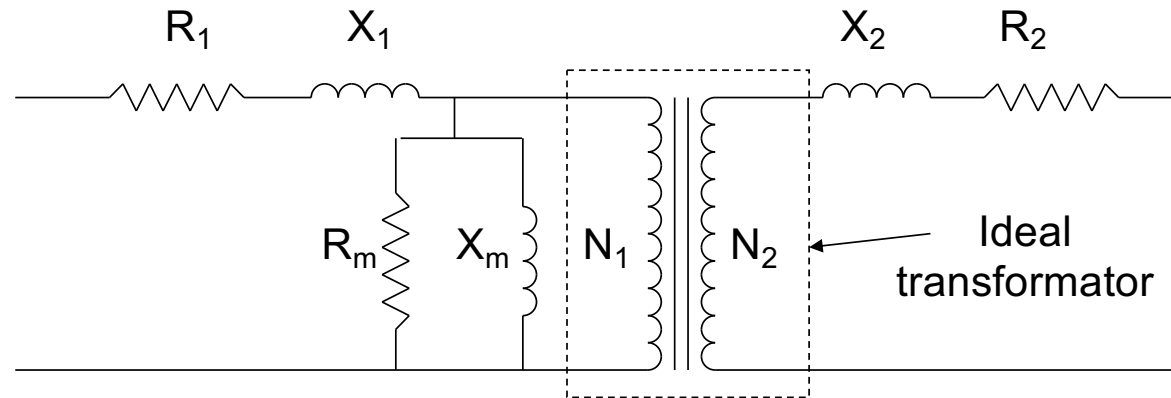


- Ankarreaktionen ser ut som ett spenningsfall över en reaktans
$$-\vec{E}_{ar} = jX_{ar}\vec{I}_a$$

Synkrongenerators ekvivalenta schema för en fas har inducerad emk \vec{E}_m och reaktans X_{ar}

- Inmatning av data i program görs ofta i p.u. (per-enhet)

Transformatormodell



Lindningsförluster

$\Leftrightarrow R_1, R_2$

Läckflöden

$\Leftrightarrow X_1, X_2$

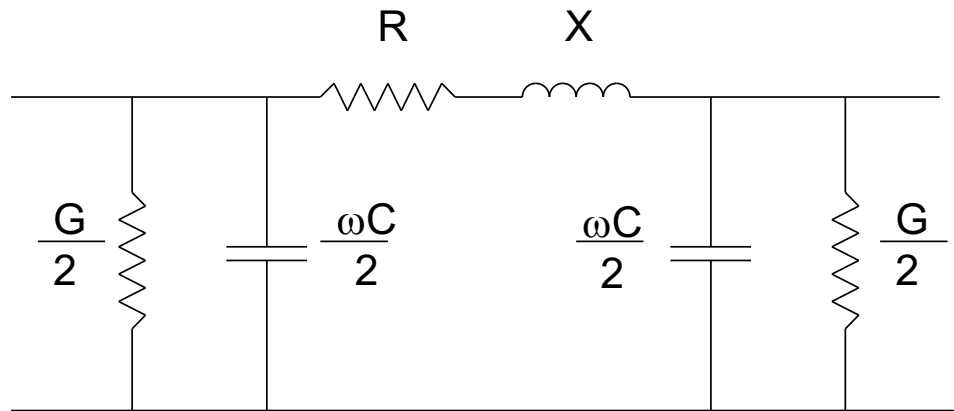
Magnetiseringsförluster (järnförluster)

$\Leftrightarrow R_m$

Huvudflöde (magnetisering kärnan)

$\Leftrightarrow X_m$

Ledningsmodell



| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| nominal voltage in kV | 230 | 345 | 500 | 765 |
| R' in Ω/km | 0.050 | 0.037 | 0.028 | 0.012 |
| $X'_L = \omega L'$ in Ω/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

ledarresistans

kapacitans

coronaförluster

→ **X**

→ R

→ ωC

→ G

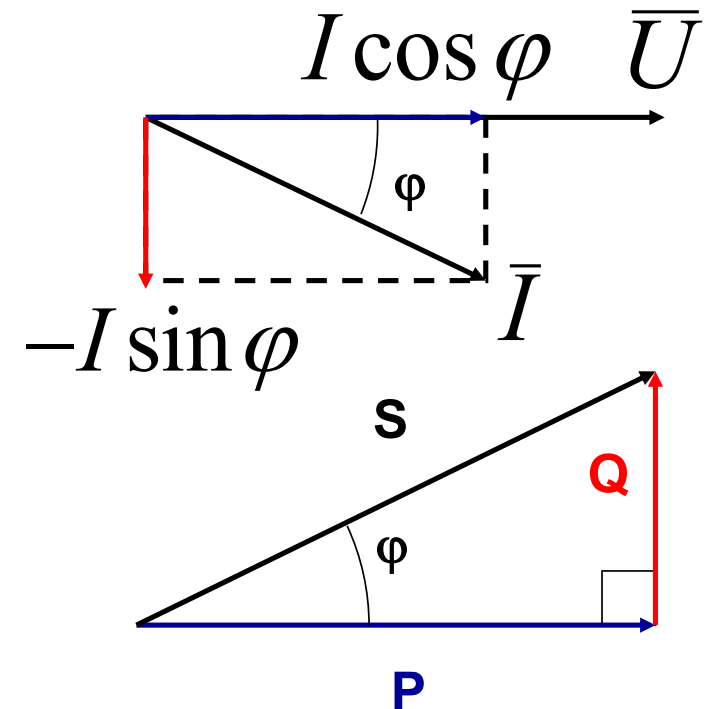
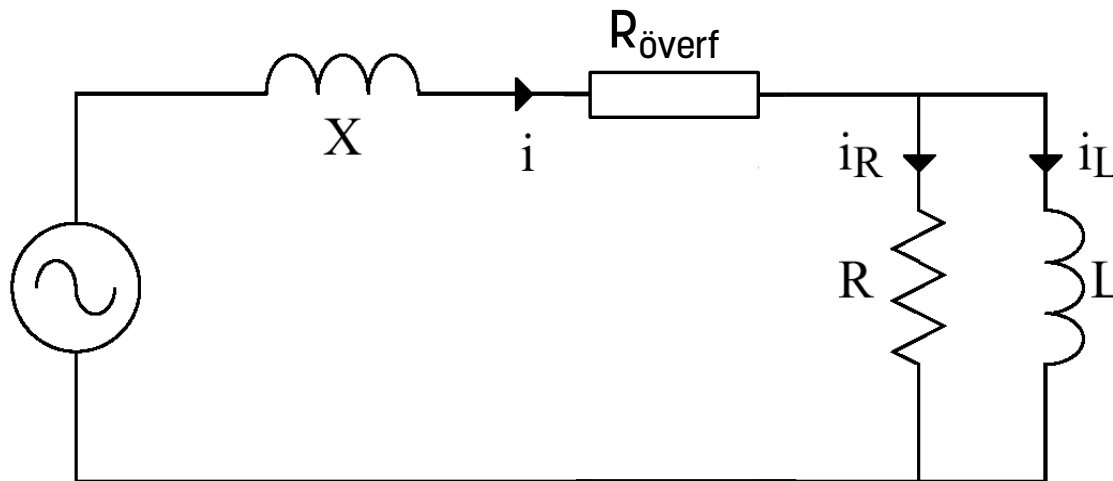
[Ω/km]

[Ω/km]

[Ω^{-1}/km]

[Ω^{-1}/km]

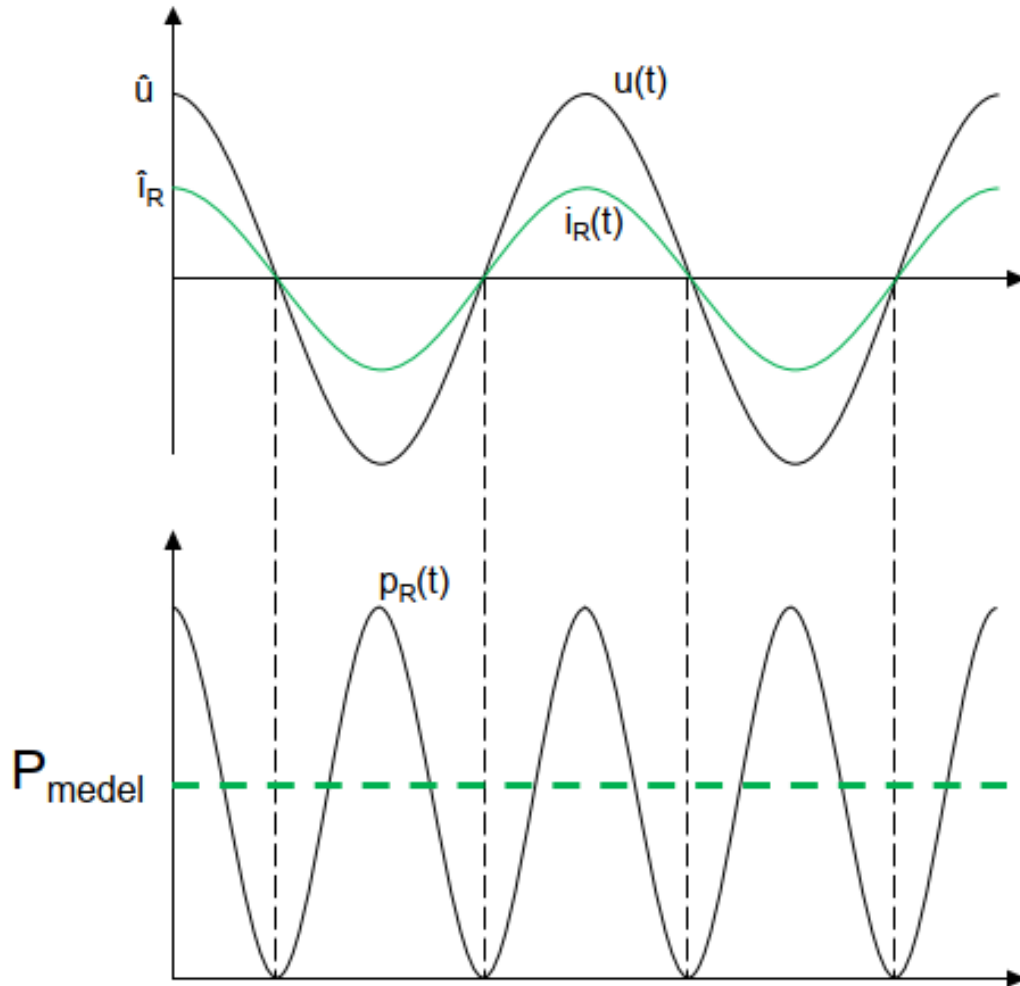
Dimensionering



- 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

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 $p_R(t)$

Uttryck för enfaseffekt

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

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

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

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

Från kursboken:

Här blir V & I, lite slarvit \hat{u} & \hat{i}

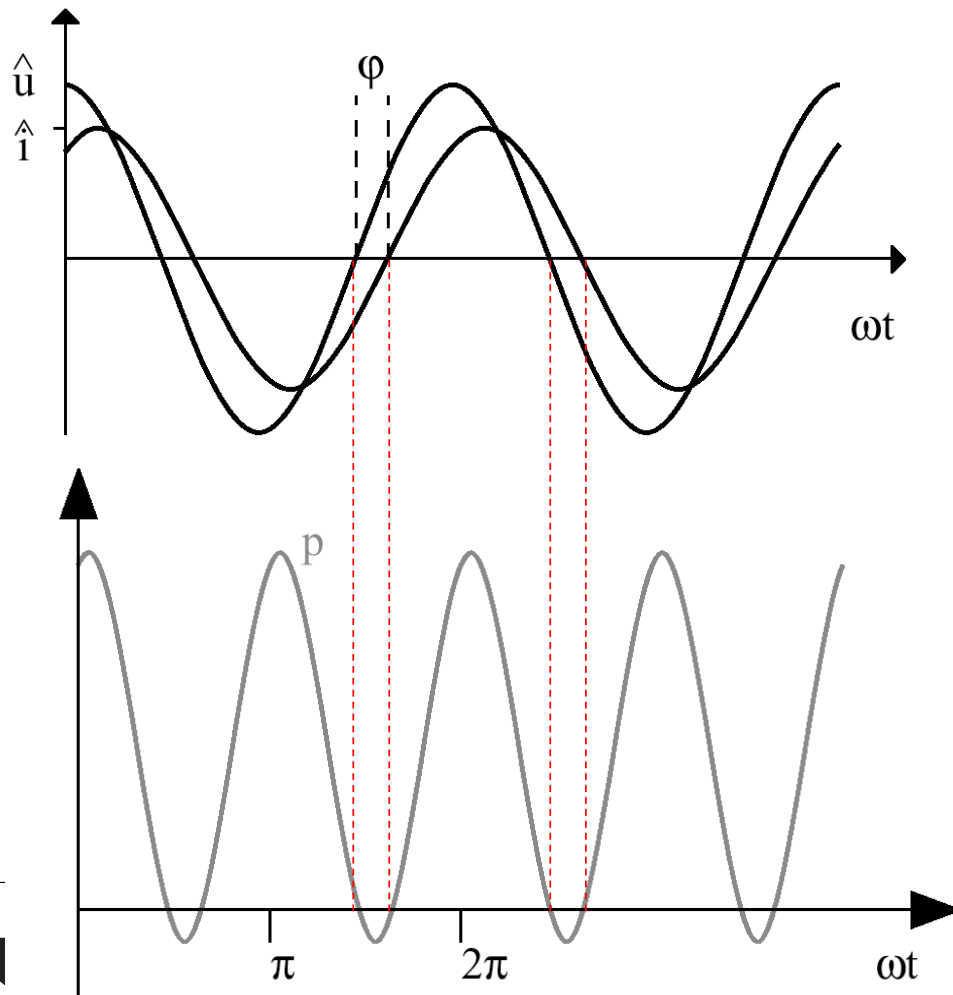
The instantaneous power absorbed by the load is then*

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) = V_{\max} I_{\max} \cos(\omega t + \delta) \cos(\omega t + \beta) \\ &= \frac{1}{2} V_{\max} I_{\max} \{ \cos(\delta - \beta) + \cos[2(\omega t + \delta) - (\delta - \beta)] \} \\ &= VI \cos(\delta - \beta) + VI \cos(\delta - \beta) \cos[2(\omega t + \delta)] \\ &\quad + VI \sin(\delta - \beta) \sin[2(\omega t + \delta)] \\ p(t) &= VI \cos(\delta - \beta) \{ 1 + \cos[2(\omega t + \delta)] \} + VI \sin(\delta - \beta) \end{aligned}$$

Letting $I \cos(\delta - \beta) = I_R$ and $I \sin(\delta - \beta) = I_X$ gives

$$p(t) = \underbrace{VI_R \{ 1 + \cos[2(\omega t + \delta)] \}}_{P_R(t)} + \underbrace{VI_X \sin[2(\omega t + \delta)]}_{P_X(t)}$$

Återgå till sinusformade storheter



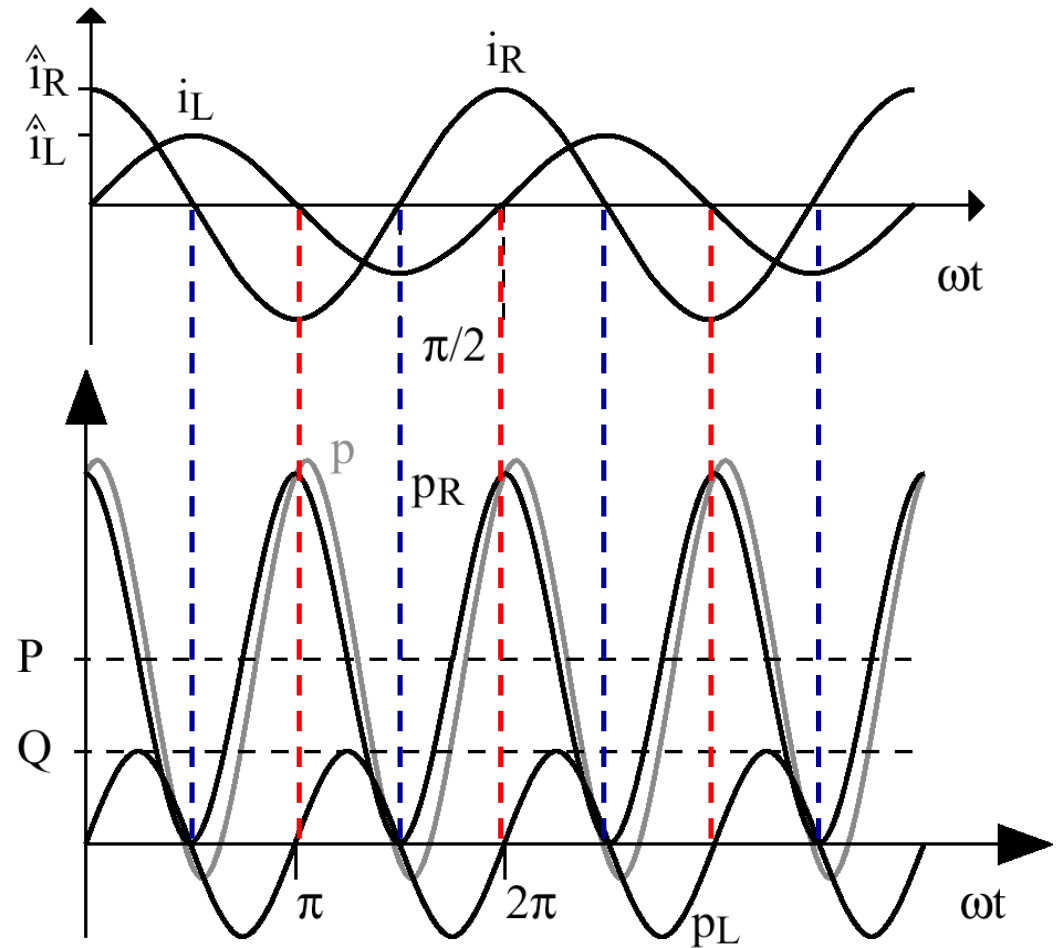
- $u(t)$ och $i(t)$ är 50 Hz
- $p(t)=u(t)i(t)$ är 100 Hz!
- $p(t)<0$ ibland!
- Medel- $p(t)>0$
- Momentan effekt



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° 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
- Komplexa storheter gör att räkningarna blir enkla

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

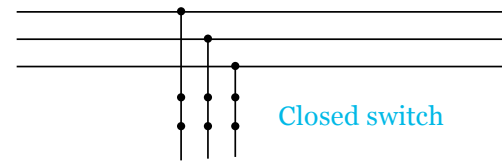


Bus (bar) (Sv samlingskena, skena)

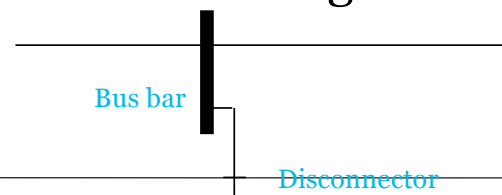


- Reality: bus bars
Aluminum pipes on porcelain support

- Circuit diagram: Three-phase node

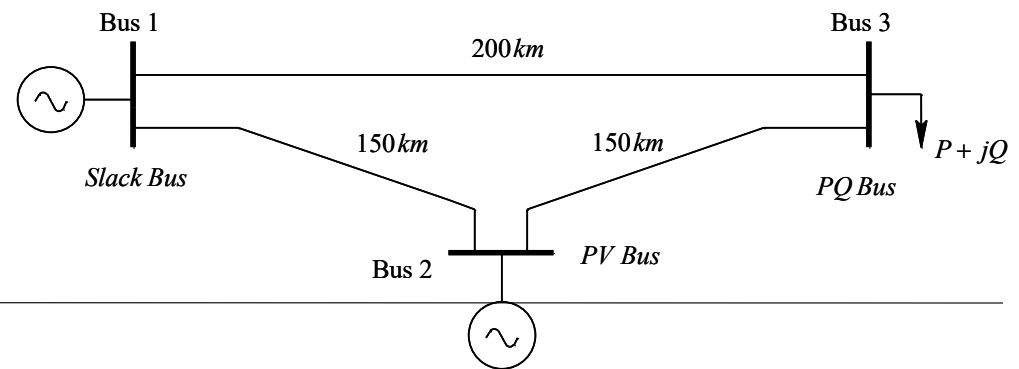
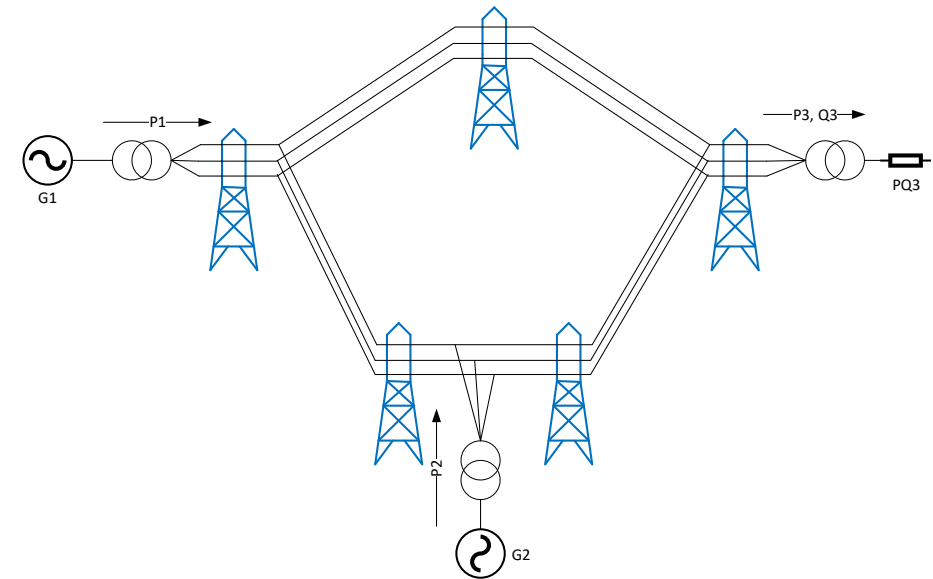
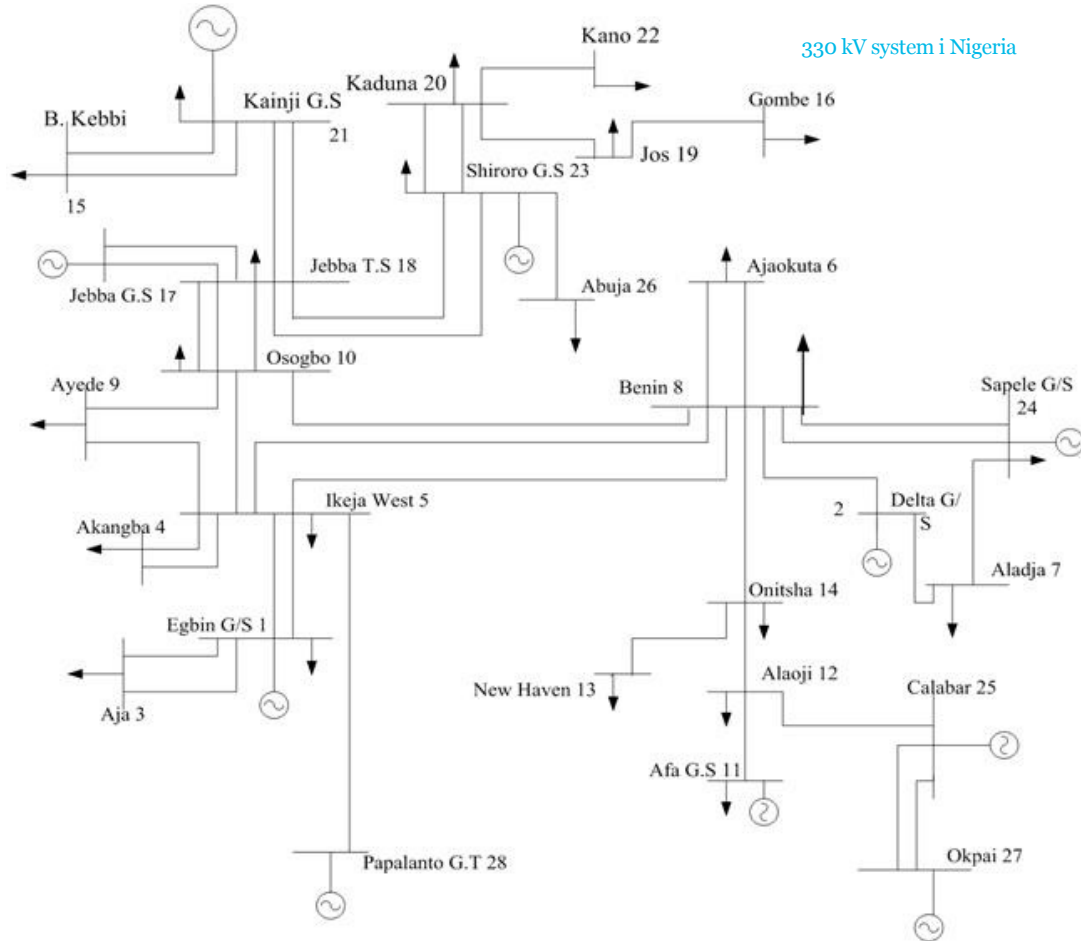


- One line diagram: bus bar (with 0 Ω)

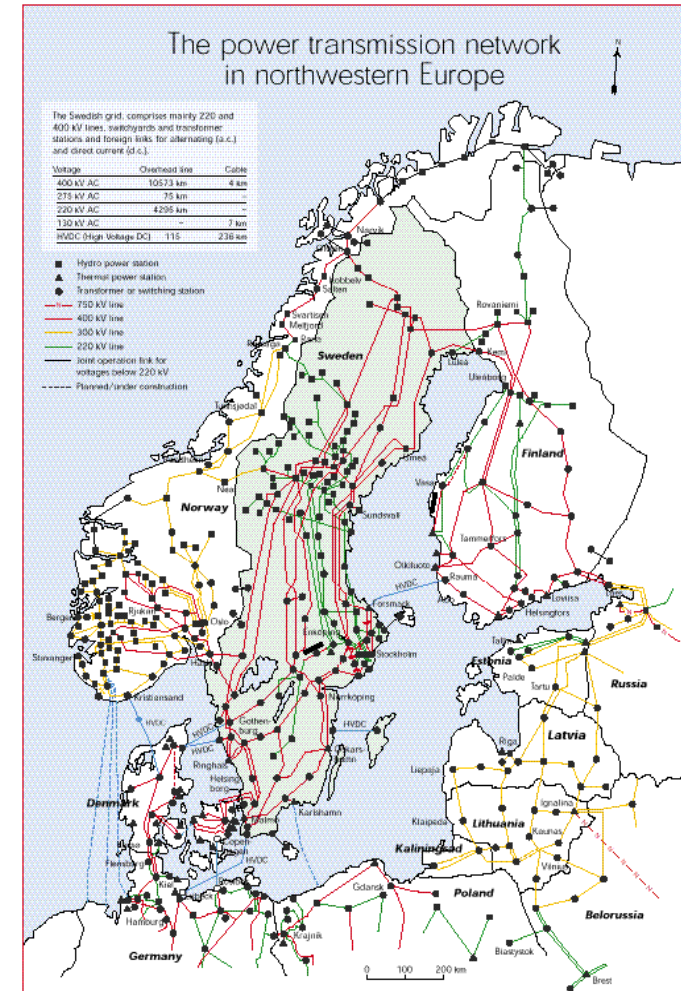
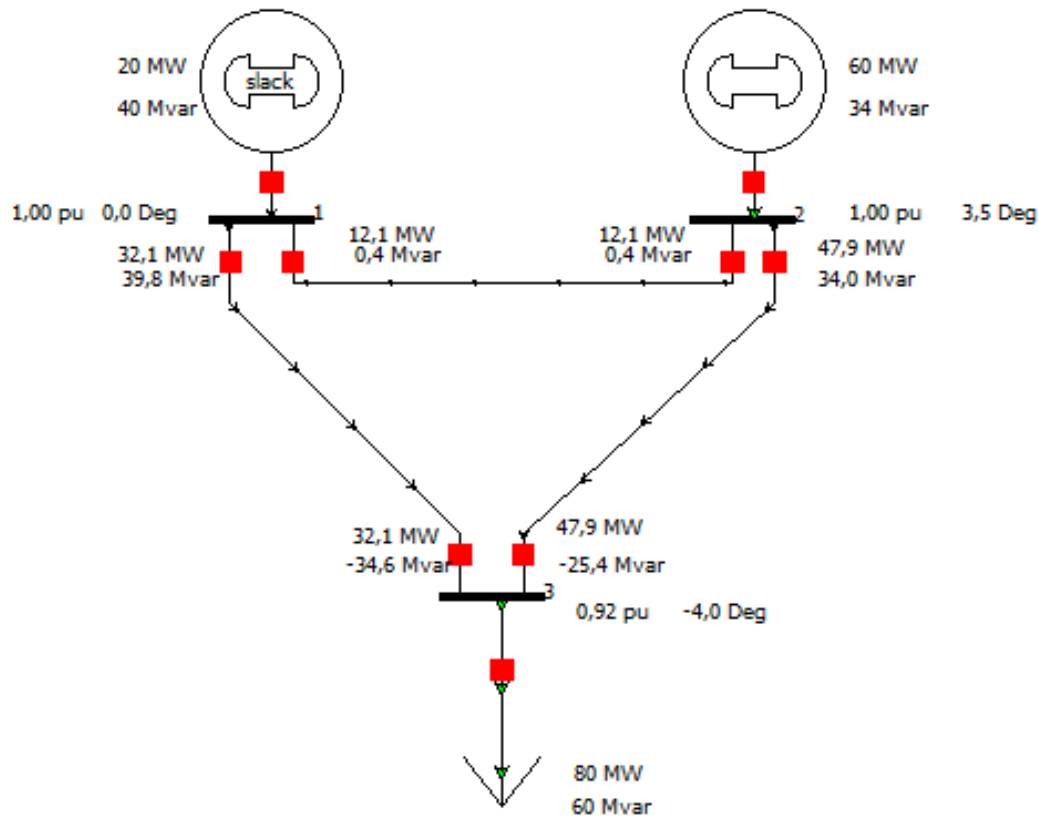


Elkraftsystemet och effektflöden i nätverk

Ett system av Komponenter – söndra och härskna



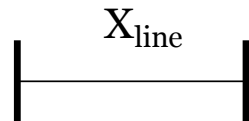
Nätverk med noder bussar



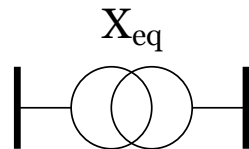
Balans i nätet = ekvationer

- Ström och spänning måste hänga ihop med impedanser
- Effekter: aktiva, reaktiva måste passa ihop.
- System av olinjära ekvationer
- Linjär algebra $Ax=B$ kvadratisk matris A med full rang då existerar en entydig lösning.
- Simuleringsprogram för elkraftsystem bygger på att lösa dessa ekvationer.
 - Bygger ett nät som ger ett ekvationssystem med rätt antal ekvationer och variabler så att det går att lösa.
 - Special bussar.

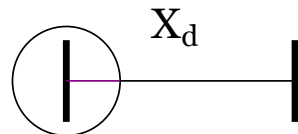
Effektöverföring genom reaktans



- Linje överföring



- Effekt genom transformator

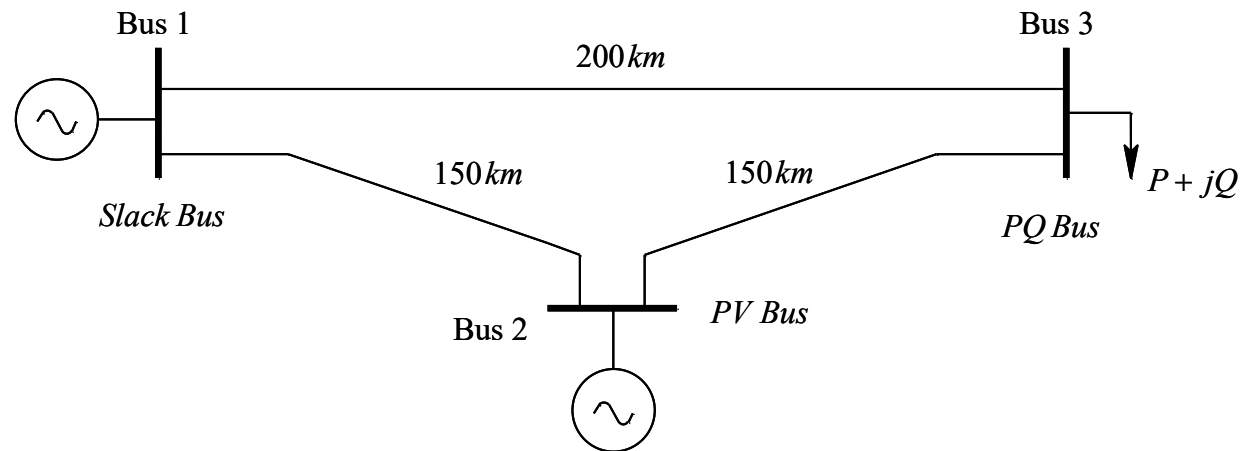


- Effekt från generator

Spännings skillnad \rightarrow Ström \rightarrow Effektöverföring
DC: Spänningar skiljer endast i belopp
AC: Spänningar skiljer i **belopp och fas**

Effektflödesberäkning för ett 3-Bus Exempel:

Mål: Beräkna alla spänningar (och strömmar) på bussen med **belopp** och **fas**.



• Busstyper i exemplet

- | | | |
|---------------------|--|--|
| 1. Bus1, slack bus: | $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ pu$ | Helt definierad |
| 2. Bus2, PV-bus: | $V_2 = 1.05 pu, P_2^{sp} = 2.0 pu$ | Okänd: angle(V_2) |
| 3. Bus3, PQ-bus: | $P_3^{sp} = -5.0 pu, Q_3^{sp} = -1.0 pu$ | Okänd: belopp (V_3) och fas (V_3) |

Effektbalans vid varje bus

- Balans ekvation vid buss k:

$$P_{in} = P_{out}$$

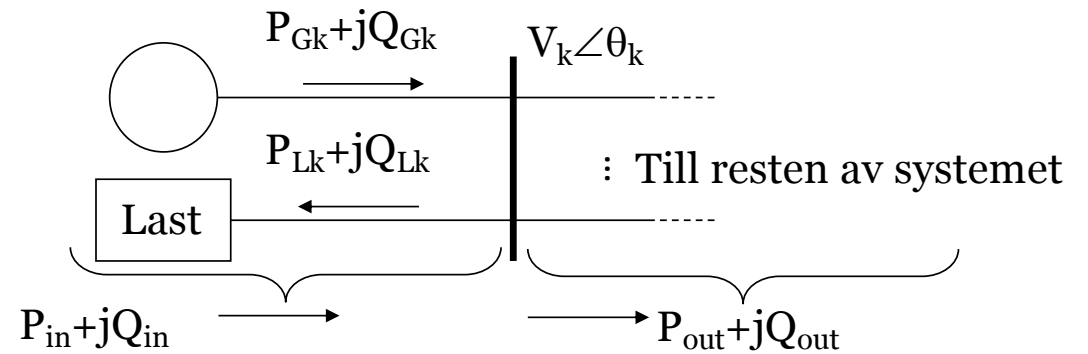
$$Q_{in} = Q_{out}$$

- P_{in} och Q_{in}

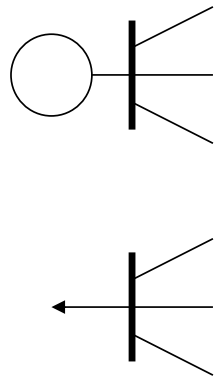
Genererad effekt minus last

- P_{out} och Q_{out} förs över till andra bussar $i \neq k$

Beror på V_i and θ_i vid $i=k$ och grannbussarna



Tre busstyper igen, det okända

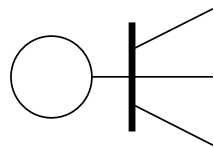


- *PV* eller *generator bus* har kända \underline{P} och \underline{V}
 - Spänningsstyrd $\rightarrow V$ känd
- *Swing* eller *slack bus* är en speciell generator bus
 - V känd, fas reference \rightarrow med θ känd
- *PQ* eller *last bus* har kända \underline{P} och \underline{Q}
 - Varken V eller θ kända.

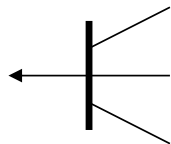
Procedure for selecting bus type:

1. Let (generator) buses with voltage control be *PV*
2. For the largest generator, change *PV* to *swing*
3. The rest are *PQ* buses

Bus types, equations and unknowns



- *Swing* or *slack bus* is a special generator bus
 - Neither P nor Q known



- *PV* or *generator bus*
 - P known

- *PQ* or *load bus*
 - Both P and Q known

| Bus type | Equation | Unknowns |
|-------------|----------|----------------|
| Swing/slack | None | None |
| PV/gen bus | P | θ |
| PQ/load bus | P and Q | V and θ |

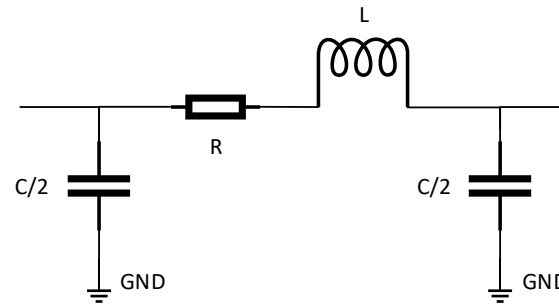
Always same number of equations and unknowns!

Linje parametrar

- Linje parametrar definierad baserad på per km data för given längd

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

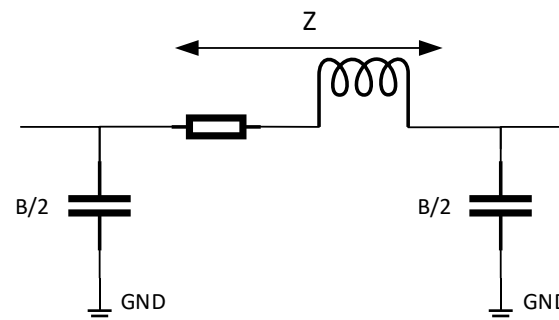
$$\bar{I} = \bar{Y} \cdot \bar{U}$$



Impedans: $\bar{Z} = R + jX$ [ohm]

Admittans: $\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = G + jB$ [mho]

Susceptans: $B = \frac{1}{X_C} = \omega C$ [mho]

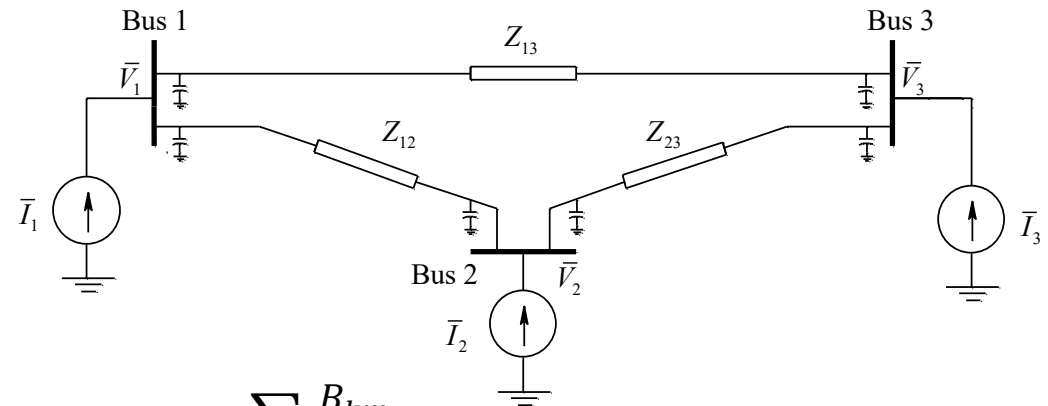


Att bygga Admittansmatrisen

- \bar{I}_k, \bar{V}_k is the current and voltage at bus (node) k
- \bar{V}_m is the voltage in other end of line connected to node k

$$\bar{I}_k = \bar{V}_k Y_{kG} + \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{Z_{km}}$$

$$\bar{I}_k = \bar{V}_k \left(Y_{kG} + \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} \frac{1}{Z_{km}} \right) - \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} \frac{\bar{V}_m}{Z_{km}}$$



$$Y_{kG} = j \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} \frac{B_{km}}{2}$$

- Y_{kG} is the total admittance to ground at bus (node) k
- For each line, total B is split equally between the ends of the line

Admittansmatrisen

- Kvadratisk och symmetrisk matris med lika många rader och kolumner som antalet noder
- Gles matris för stora system.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \dots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \dots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix}$$

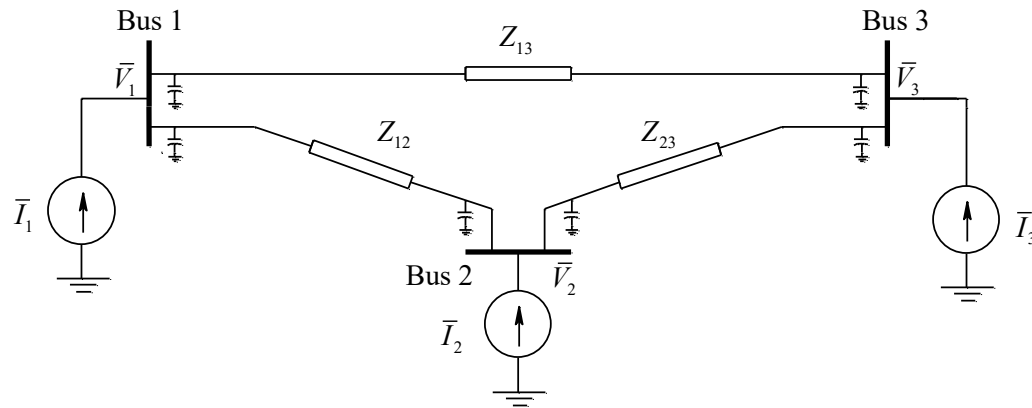
$$Y_{kk} = Y_{kG} + \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} \frac{1}{Z_{km}}$$

$$Y_{km} = -\frac{1}{Z_{km}}$$

$$\bar{V}_m = V_m e^{j\theta_m}$$

$$\bar{I}_k = \sum_{m=1}^n Y_{km} \bar{V}_m$$

Sammanställning av Admitansmatrisen



345 kV linje, 3-fas, 100 MVA

$$Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = 1190 \Omega$$

| Line | Series Impedance Z in Ω (pu) | Total Susceptance B in $\mu\mathcal{U}$ (pu) |
|------|--|--|
| 1-2 | $Z_{12} = (5.55 + j56.4) \Omega = (0.0047 + j0.0474)$ pu | $B_{Total} = 675 \mu\mathcal{U} = (0.8034)$ pu |
| 1-3 | $Z_{13} = (7.40 + j75.2) \Omega = (0.0062 + j0.0632)$ pu | $B_{Total} = 900 \mu\mathcal{U} = (1.0712)$ pu |
| 2-3 | $Z_{23} = (5.55 + j56.4) \Omega = (0.0047 + j0.0474)$ pu | $B_{Total} = 675 \mu\mathcal{U} = (0.8034)$ pu |

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.6090 - j36.5636 & -2.0715 + j20.8916 & -1.5374 + j15.6720 \\ -2.0715 + j20.8916 & 4.1431 - j41.7833 & -2.0715 + j20.8916 \\ -1.5374 + j15.6720 & -2.0715 + j20.8916 & 3.6090 - j36.5636 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix}$$

Matrisen är symmetrisk.
Fylld för litet system där alla noder sammankopplade.

Grundläggande Effektflödesekvationer

Bus k:s villkor
ges av rad k i Y matrisen

$$\bar{I}_k = \sum_{m=1}^n Y_{km} \bar{V}_m \quad \text{where} \quad (Y_{km} = G_{km} + jB_{km})$$

$$P_k + jQ_k = \bar{V}_k \bar{I}_k^* = \sum_{m=1}^n \left[(G_{km} - jB_{km}) (\bar{V}_k \bar{V}_m^*) \right]$$

$$\bar{V}_k \bar{V}_m^* = (V_k e^{j\theta_k}) (V_m e^{-j\theta_m}) = V_k V_m e^{j\theta_{km}} = V_k V_m (\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) \quad \theta_{km} = \theta_k - \theta_m$$

Studera realdel och imaginärdel som separata ekvationer.

$$P_k = G_{kk} V_k^2 + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad Q_k = -B_{kk} V_k^2 + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

System av olinjära ekvationer

$$P_R = \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta \quad Q_R = \frac{V_S V_R \cos \delta}{X} - \frac{V_R^2}{X}$$

- MATLAB funktion `fsolve` anpassad för att lösa olinjära ekvationer
generell ekvationslösare
- Effektiv lösning i specialiserade program
kan räkna ut och bygga gradientmatris
Jacobian och iterera med Newton-Raphson
Kapitel 6 i boken börjar med metoder.
- Olika lösare passar för olika strukturer
på problemet.

`fsolve`

Solve system of nonlinear equations

Nonlinear system solver

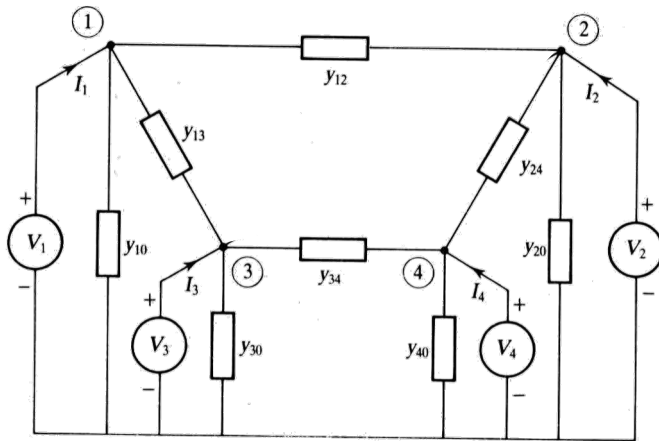
Solves a problem specified by

$$F(x) = 0$$

for x , where $F(x)$ is a function that returns a vector value.

x is a vector or a matrix; see [Matrix Arguments](#).

Nätverksmodell 2



$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{10} + I_{12} + I_{13} = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) \\
 I_2 &= I_{20} + I_{21} + I_{24} = y_{20}V_2 + y_{21}(V_2 - V_1) + y_{24}(V_2 - V_4) \\
 I_3 &= I_{30} + I_{31} + I_{34} = y_{30}V_3 + y_{31}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4) \\
 I_4 &= I_{40} + I_{42} + I_{43} = y_{40}V_4 + y_{42}(V_4 - V_2) + y_{43}(V_4 - V_3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 \\
 I_2 &= (y_{20} + y_{21} + y_{24})V_2 - y_{21}V_1 - y_{24}V_4 \\
 I_3 &= (y_{30} + y_{31} + y_{34})V_3 - y_{31}V_1 - y_{34}V_4 \\
 I_4 &= (y_{40} + y_{42} + y_{43})V_4 - y_{42}V_2 - y_{43}V_3
 \end{aligned}$$

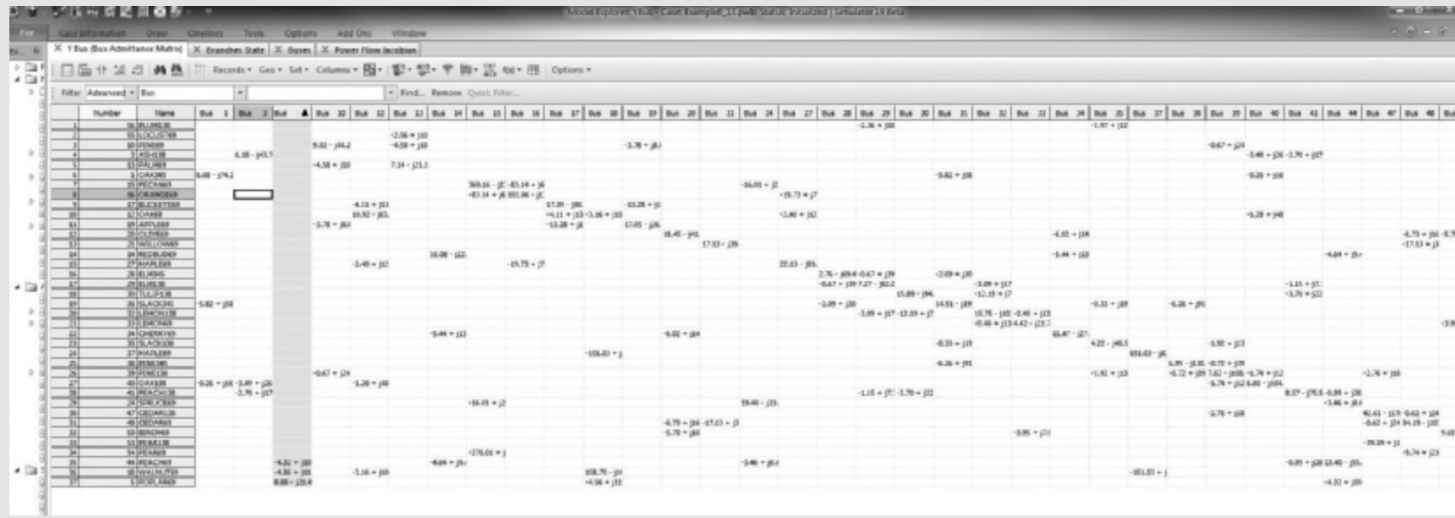
$$\underbrace{\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}}_I = \underbrace{\begin{bmatrix} (y_{10} + y_{12} + y_{13}) & -y_{12} & -y_{13} & 0 \\ -y_{21} & (y_{20} + y_{21} + y_{24}) & 0 & -y_{24} \\ -y_{31} & 0 & (y_{30} + y_{31} + y_{34}) & -y_{34} \\ 0 & -y_{42} & -y_{43} & (y_{40} + y_{42} + y_{43}) \end{bmatrix}}_{Y_{bus}} \underbrace{\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}}_V$$

Y_{bus} är "bussens admittans matris", börjar glesas ut.

Sparsity in a 37-bus system

To see a visualization of the sparsity of the power flow Y_{bus} and Jacobian matrices in a 37-bus system, open PowerWorld Simulator case Example 6_13.

Select **Case Information, Solution Details, Ybus** to view the bus admittance matrix. Then press <ctrl> Page Down to zoom the display out. Blank entries in the matrix correspond to zero entries. The $37 \times 37 Y_{bus}$ has a total of 1369 entries, with only about 10% nonzero (see Figure 6.13). Select **Case Information, Solution Details, Power Flow Jacobian** to view the Jacobian matrix.



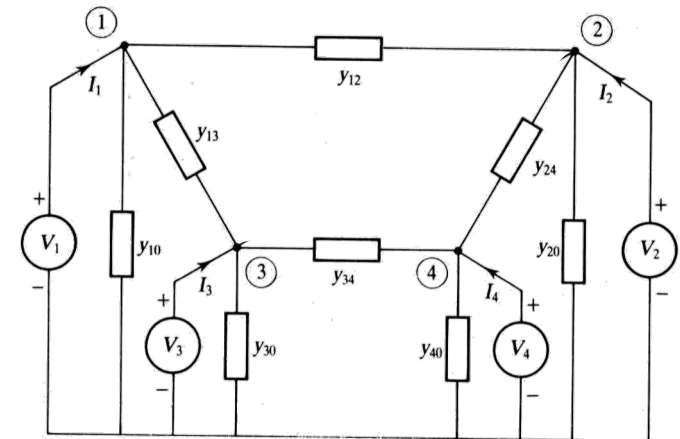
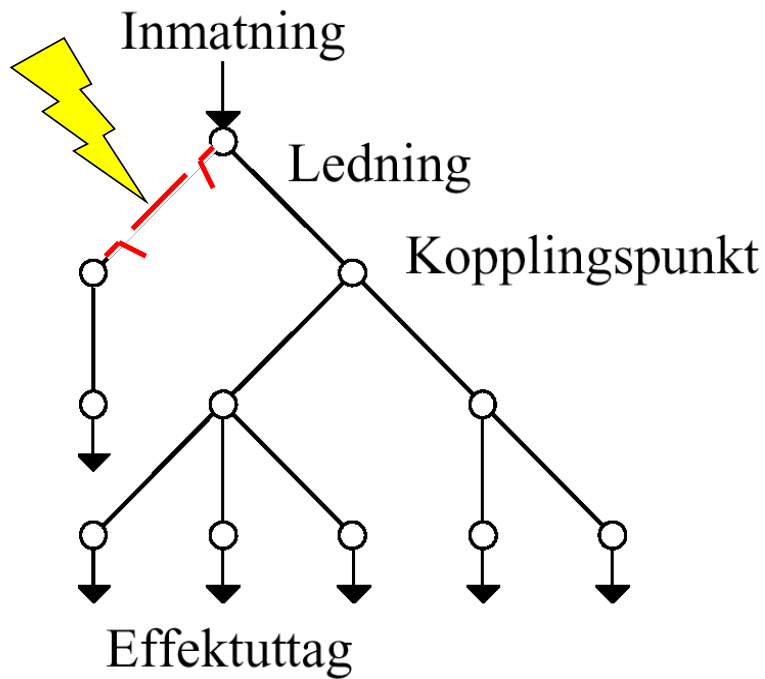
Nätsäkerhet, robusthet N-1 kriteriet

N-1 kriterium:

Ett godtyckligt fel skall kunna inträffa utan att nätet går ned. Ledning, kraftverk.

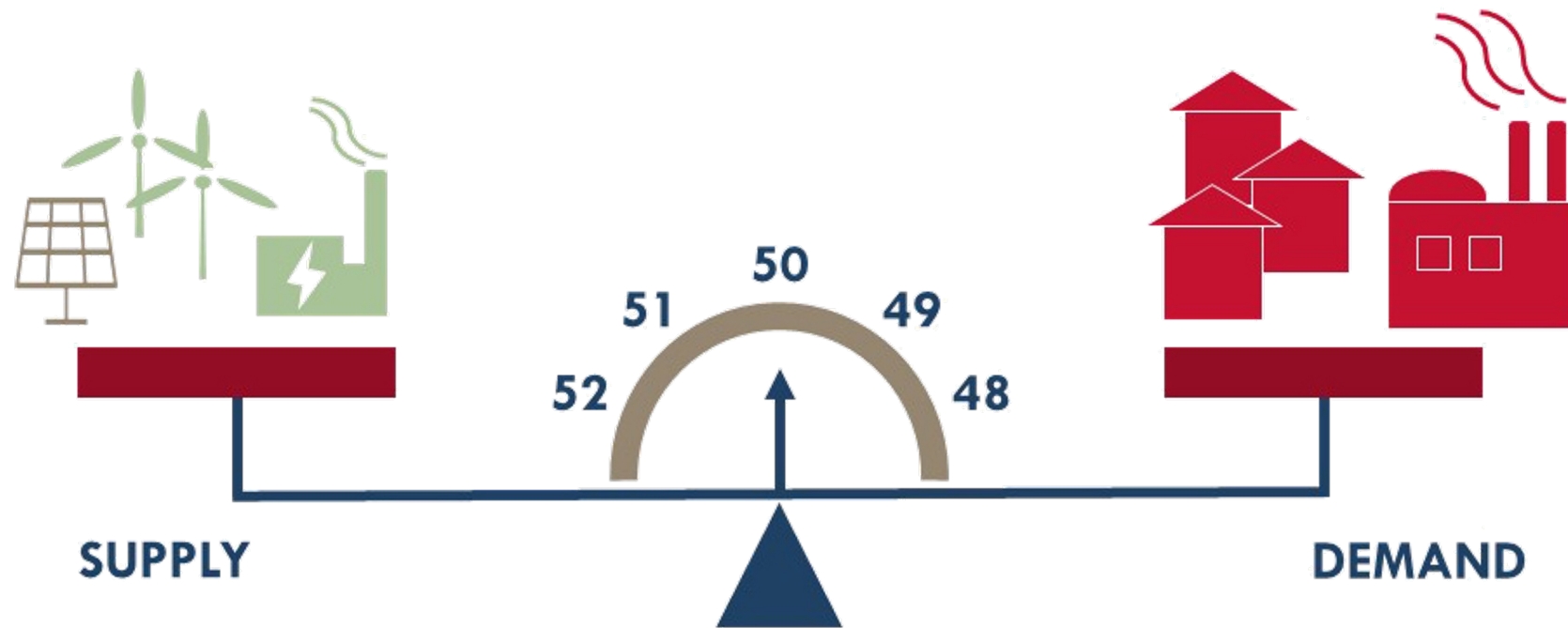
(Radiellt nät ej N-1)

Analys i Labb 1.



2. Balansekvationer vid variationer

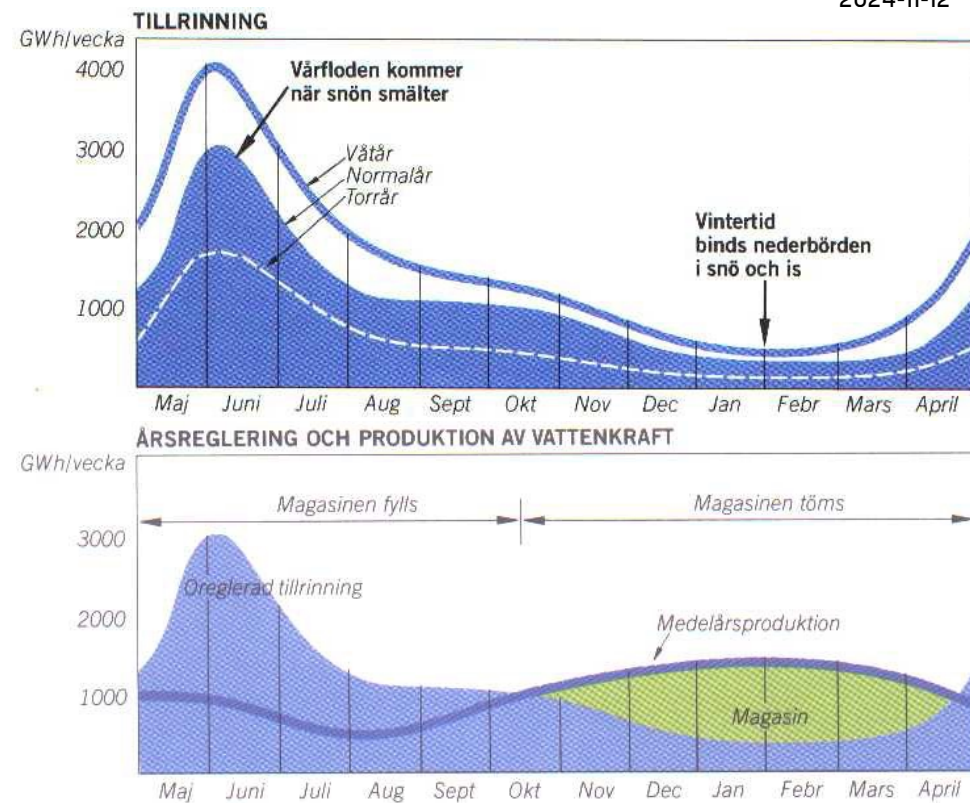
Elkraftsystemet ett system i balans



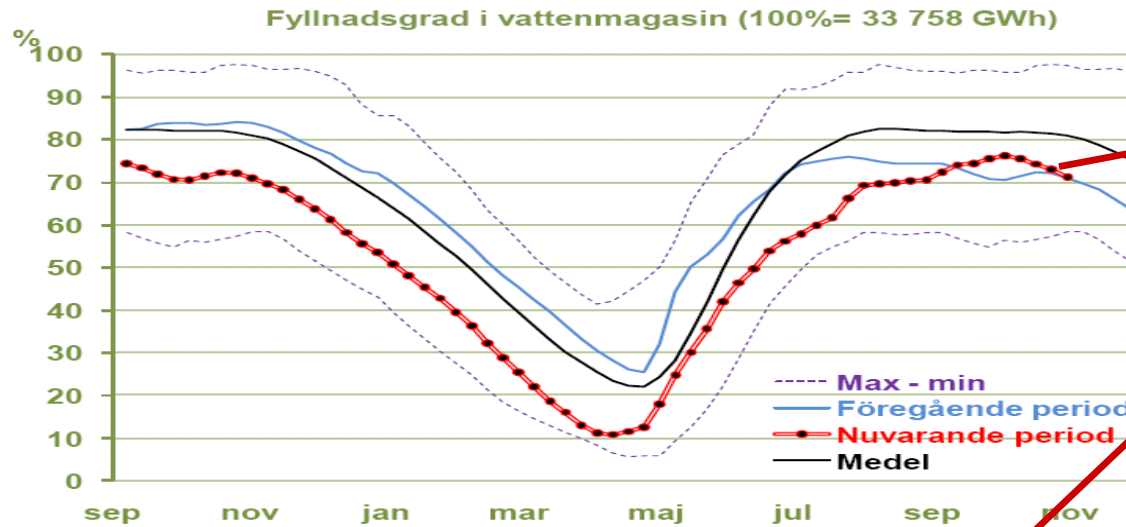
Vattenmagasin



- Magasinet är en buffert
 - Fylls vår och sommar när tillrinning > avtappning
 - Töms höst och vinter när avtappning > tillrinning

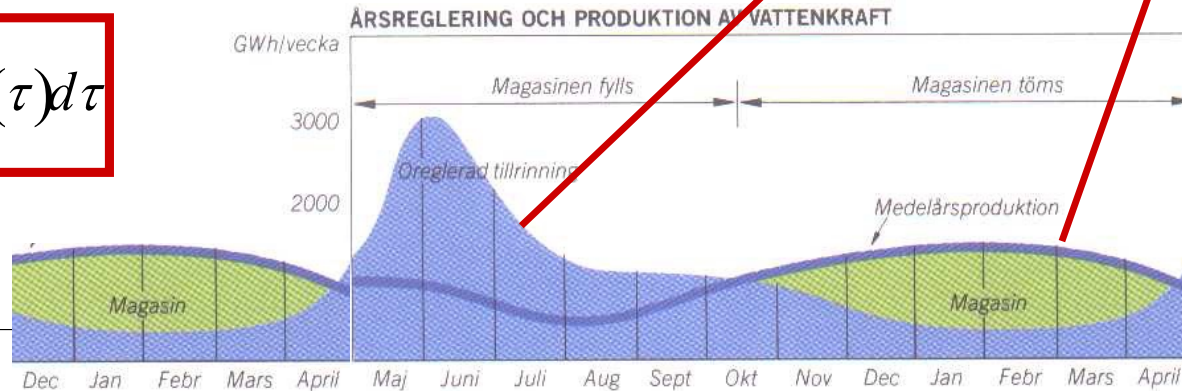


Balanskvation och integrallösning



$$\frac{dV}{dt} = q_{in} - q_{ut}$$

$$V(t) = V_0 + \int_0^t q_{in}(\tau) - q_{ut}(\tau) d\tau$$



Balanskvationer

Tillstånd motsvarar energi. Förändring motsvarar effekt.

Tillstånd kan inte ändras snabbare än vad högerled och tröghet medger

Newton 2 Linjär

$$m \frac{dv}{dt} = F_{acc} - F_{br}$$

$$W = \frac{1}{2} mv^2$$

Kondensator

$$C \frac{dV}{dt} = i_{in} - i_{ut}$$

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

Newton 2 Rotation

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{acc} - T_{br}$$

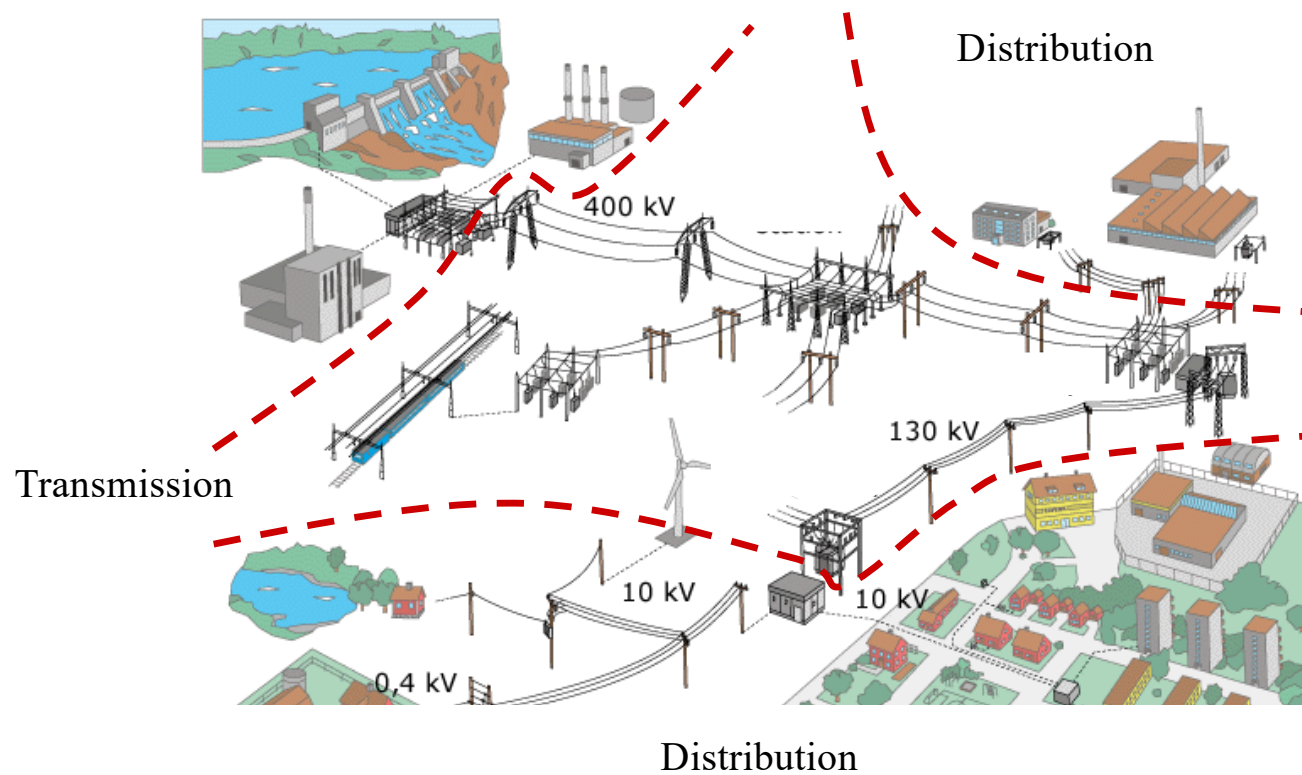
$$W = \frac{1}{2} J\omega^2$$

Induktans

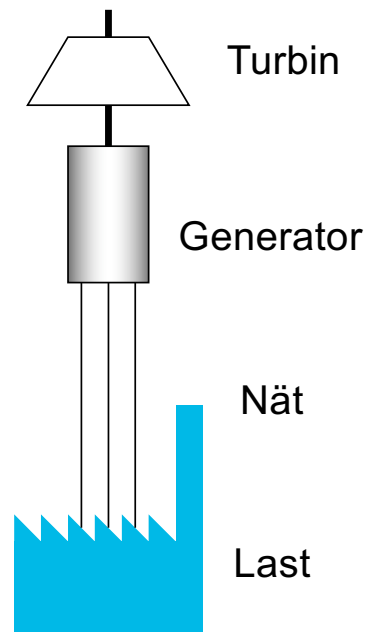
$$L \frac{di}{dt} = u_{öka} - u_{minska}$$

$$W = \frac{1}{2} Li^2$$

Elnätet saknar energilager



Kraftverket har energilager



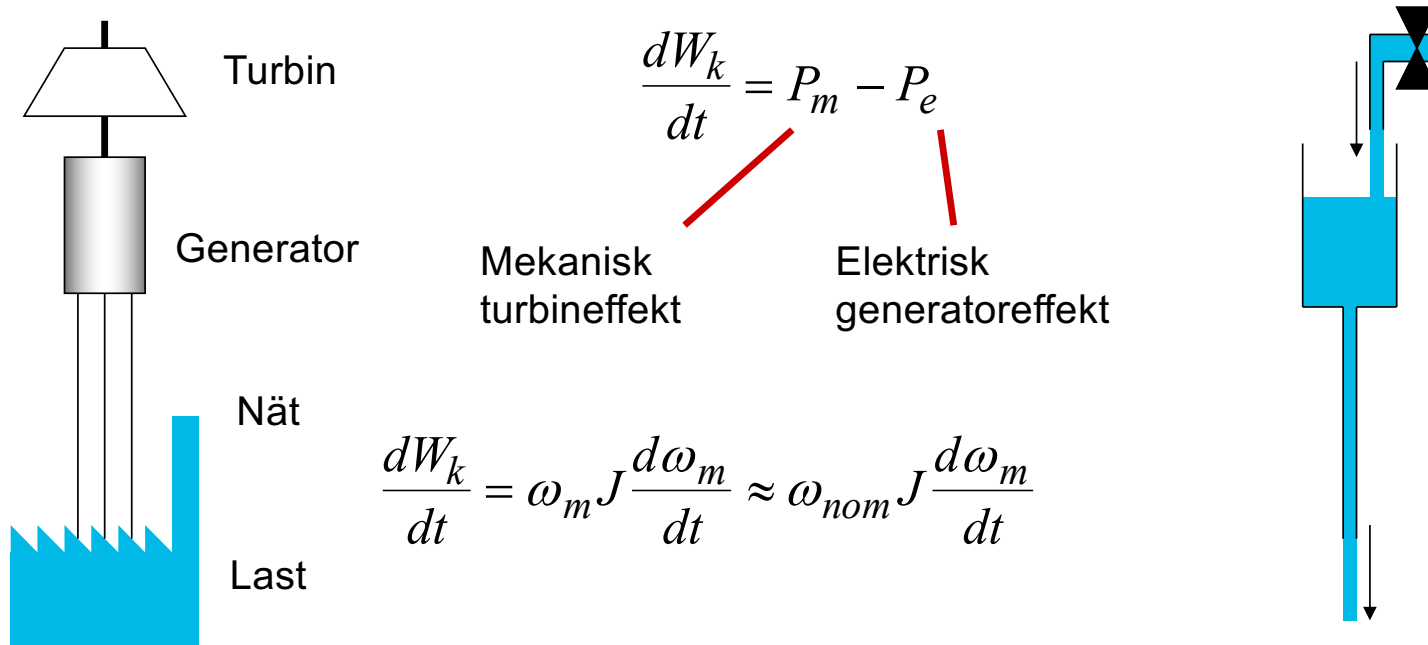
- Roterande massor
 - Turbinhjul
 - Generatorrotor
- Energilager

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2$$

$$\frac{W_k}{P_{el,max}} = 1 - 10s$$

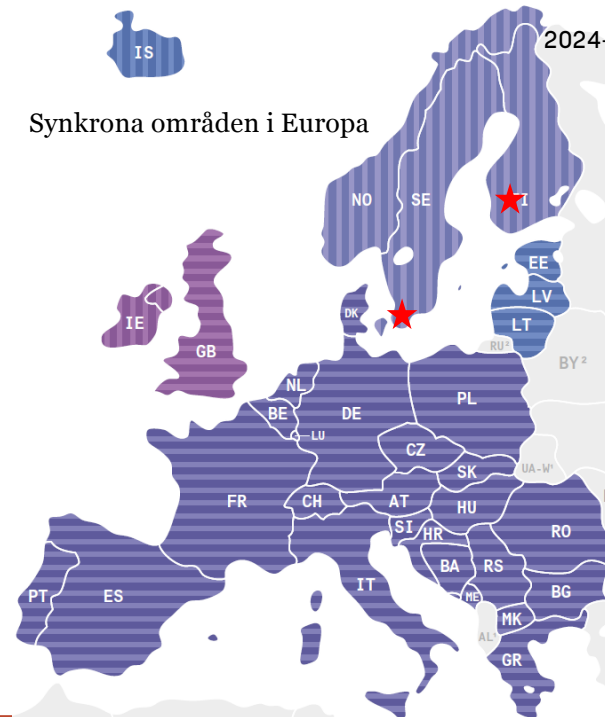
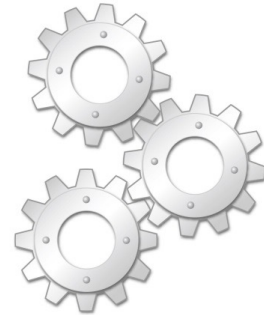
Kraftverkets balansekvation

Synkrongenerators momentbalans kan skrivas som effektbalans:



Effektbalansen påverkar generatorers varvtal som bestämmer frekvensen som kan mätas i ett vägguttag

Flera synkrongeneratorer



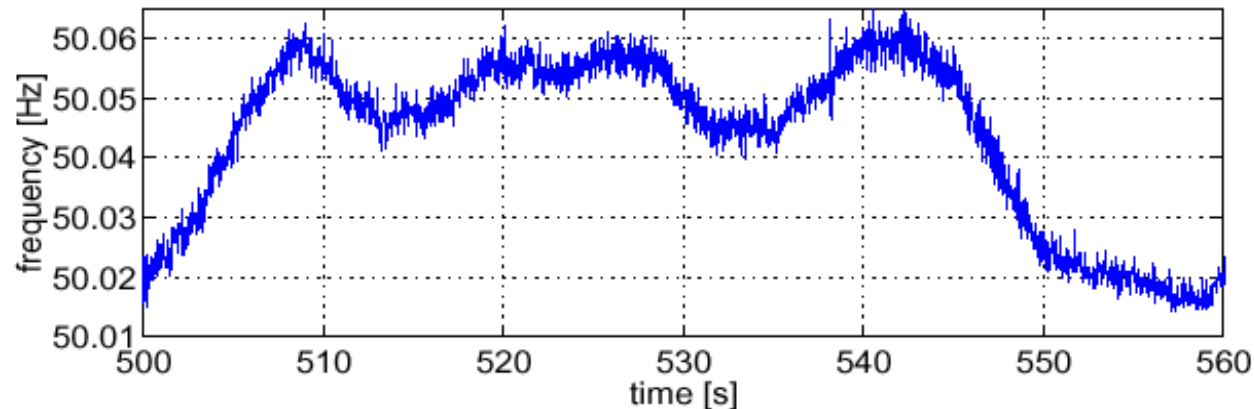
- Alla synkroniseras mot samma $\omega_e = \omega_{\text{system}}$

• Alla generatorer tillsammans (i ett synkront område) beter sig som en enda:

$$\omega_{\text{nom}} J_{\text{total}} \frac{d\omega_{\text{system}}}{dt} = P_{m,\text{total}} - P_{e,\text{total}}$$

- ω_{system}
 - Systemets elektriska vinkelfrekvens
 - Nominellt 314 rad/s motsvarar 50Hz

50 Hz inte en konstant

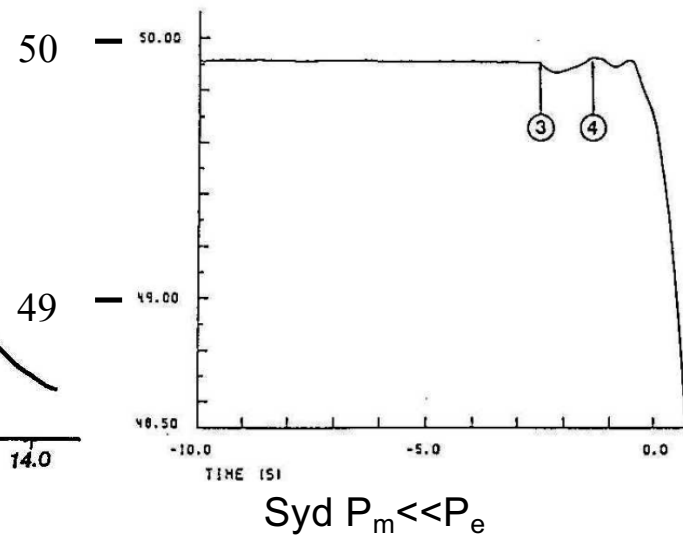
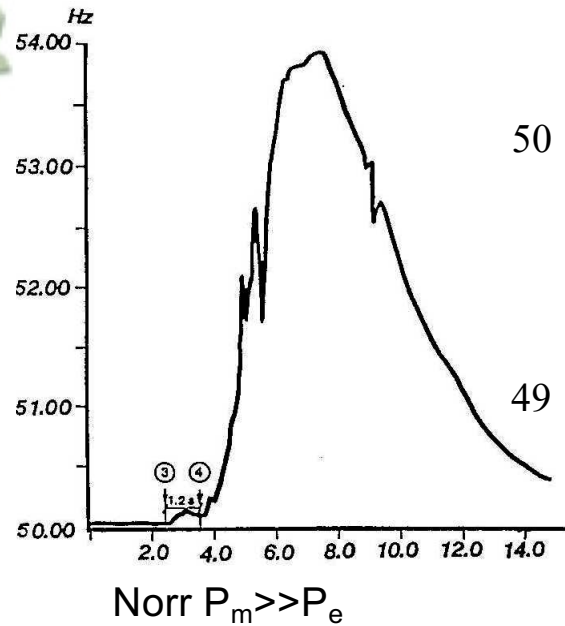
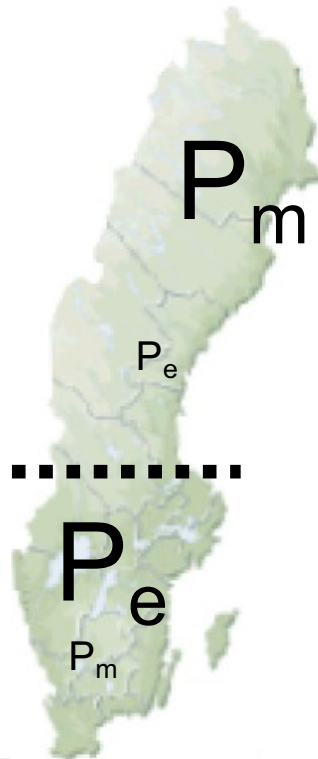


- Frekvensen speglar effektbalansen i systemet
- Nordiska synkrona systemet (SE+FI+NO+Själland)
 - Acceptabelt $\pm 0.1\text{Hz}$, tidsavvikelse $< 10\text{s}$
- Variation beror på systemstorlek
 - Island, Irland $\pm 1\text{Hz}$ och USA $\pm 0.01\text{ Hz}$

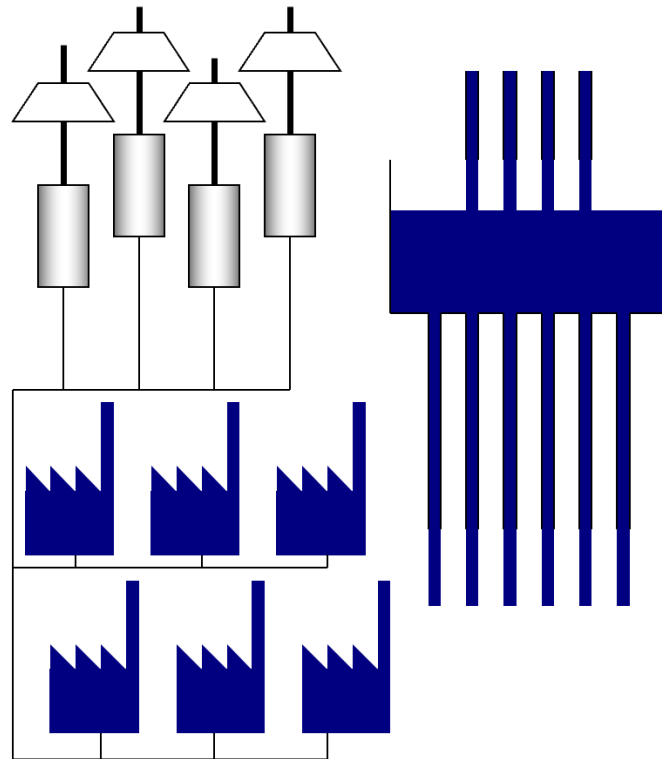
Kraftsystemets frekvens vid obalans

$$\omega_{nom} J_{total} 2\pi \frac{df_{system}}{dt} = P_{m,total} - P_{e,total}$$

27 dec 1983, fel delar Sverige i N + S



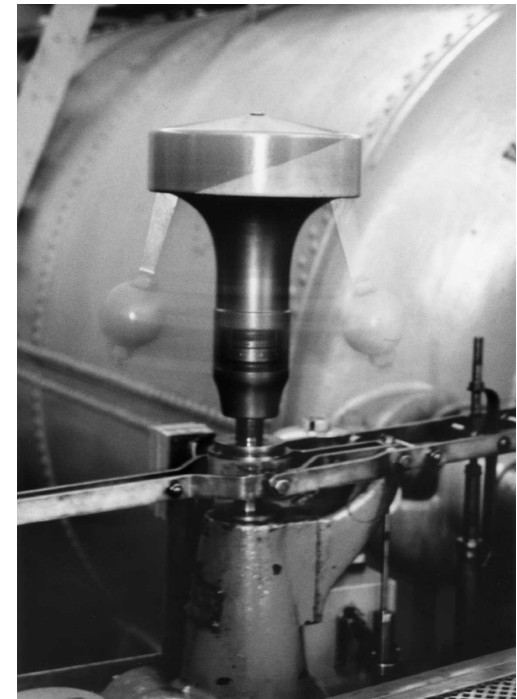
Sammankoppling av system



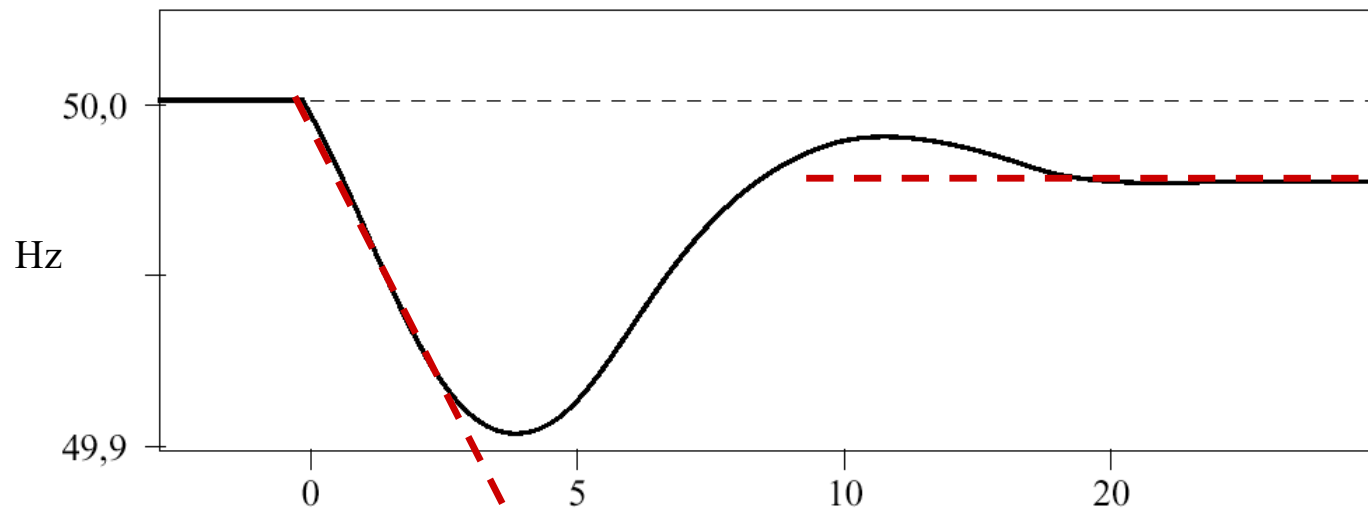
- Energilager
 - Samma i W_k/P_{total}
 - Större i absolut tal
- Enskild händelse relativt mindre
- Lastvariation
 - Slumpmässig
 - Tar ut varandra
- Reservkapacitet
 - Kan delas
 - Det finns inte el “över”

Frekvensreglering ger effektbalans

- Styr turbineffekt
 - Jämför farthållare för bil
- Primär reglering
 - Automatiskt på sekunder
 - Lokal P-regulator → alla kraftverk deltar efter förmåga
- Sekundär reglering
 - I tidsskala minuter
 - Centraliserad omfördelning enligt ekonomiskt avtal



Typiskt: Snabbstopp av kärnkraftenhet



- Lutning bestäms av J_{total}
- Stationärt fel bestäms av K i primärregleringen
- Sekundärreglering återställer stationärt fel efter några minuter

Framgångsfaktorer för trefas växelspanning

- Överföring med högspänning har låga förluster
 - Transformator tillförlitlig och har låga förluster
- Kraftledningar kostnadseffektiva
 - Symmetriska trefasströmmar summeras till noll
 - Hängisolatorer enkla
- Trefasiga växelströmsmaskiner har konstant vridmoment
 - Symmetriska trefaseffekters summa konstant
- Frekvensreglering med enkel mekanik
 - Stort roterande energilager, total förbrukning slätare
- Kortslutningar kan hanteras enkelt med säkringar
 - Seriereaktans begränsar ström utan förluster
- Asynkronmotorn självstartande och saknar slitdelar

Stora förändringar möts med Smarta Elnät

- Storskalig, planerbar produktion på transmissionsnivå ersätts av småskaligt, variabelt förnybart på distributionsnivå
 - Ökat behov av balanskraft för oförutsedd obalans
 - Stora förändringar i effektflöden i nätet
- Värmepumpar och elfordon ny elförbrukning
 - Stora förändringar i effektflöden i nätet

- Smarta Elnätlösningar = mer automatik
 - Styr effektbalansen – var som helst!
 - Styr ledningflöden – vid flaskhalsar i nätet

Smarta Elnät: Effektbalans och flaskhalsar

- Effektbalans
 - Förr: låt produktion följa snällt varierande förbrukning
 - Framtid: styr aktiv produktion, förbrukning och batterier för att följa kraftigt varierande förnybar produktion
- Flaskhalsar
 - Förr: reglera spänning men (över)dimensionera efter *worst case* för att slippa tänka på andra kapacitetsgränser
 - Framtid: styr (aktiv/reaktiv) produktion, förbrukning och batterier för att gå till men inte överskrida kapacitetsgränser

Sammanfattning

1. Indata för lastflödesberäkning: ...
 2. Output from load flow: ...
 3. Load flow uses three bus types:
 - A. ... bus, with ... unknowns and ... equations
 - B. ..., with ... unknown and ... equation
 - C. ... bus, with ... unknowns and ... equations
 4. Elområdesgränser defineras av ...
 5. ... frikopplar elproduktionen från vattenkraft från tillrinningen
 6. I tidskala bestäms elproduktionen av ...
 7. I sekundskala justeras elproduktionen av ...
 8. Många sammankopplade synkrongeneratorer beter sig som ...
 9. ... uppmätt i ett vägguttag ger ett mått på effektbalansen
 10. Diffekvationerna för vattenmagasin och elnätets frekvens är ...
 11. ... gör att spänningen i elnätet beror på förbrukningen
 12. I elsystem används automatik för ..., ... och ...
 13. Smarta Elnät handlar oftast om styrning av ... och ...
-

Sammanfattning

1. Indata för lastflödesberäkning: network data (Ybus), P+jQ load+gen
2. Output from load flow: All $V_i \angle \theta_i$, post-processing with Ybus gives line flows
3. Load flow uses three bus types:
 - A. swing/slack bus, with 0 unknowns and 0 equations
 - B. gen/PV bus, with 1 unknown and 1 equation
 - C. load/PQ bus, with 2 unknowns and 2 equations
4. Elområdesgränser definieras av flaskhalsar i transmissionsnätet
5. Vattenmagasin frikopplar elproduktionen från vattenkraft från tillrinningen
6. I tidskala bestäms elproduktionen av förbrukningen via elmarknaden
7. I sekundskala justeras elproduktionen av frekvensregleringen
8. Många sammankopplade synkrogeneratorer beter sig som en stor
9. Frekvensen uppmätt i ett vägguttag ger ett mått på effektbalansen
10. Diffekvationerna för vattenmagasin och elnätets frekvens är lika
11. Serieimpedansen gör att spänningen i elnätet beror på förbrukningen
12. I elsystem används automatik för f-reglering, V-reglering och felbortkoppling
13. Smarta Elnät handlar oftast om styrning av effektbalansen och ledningsflöden

TSFS 17 Elkraftsystem

Föreläsning 4

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

Lars Eriksson, Professor
ISY, Fordonssystem