

SÄHKÖVERKKO



Sähköverkon tehtävänä on yhdistää sähkön tuotanto ja kulutus toisiinsa.
Kuva [Suomen kantaverkosta](#) (kuvan koko 173 kt).

Sähköverkko muodostuu

- [generaattoreista](#)
 - [kanta- ja alueverkoista](#)
 - [sähköasemista](#)
 - [jakelumuuntamoista](#)
 - [jakeluverkoista](#)
 - [kuormista](#)
-

- Sähköverkko voidaan kuvata [yksivaiheisella sijaiskytkennällä](#).
 - Sähköverkon vaihesuureet voidaan kuvata [symmetrisillä komponenteilla](#).
-

[Kertaus: vaihtosähkö, kolmivaihejärjestelmä ja laskenta](#)

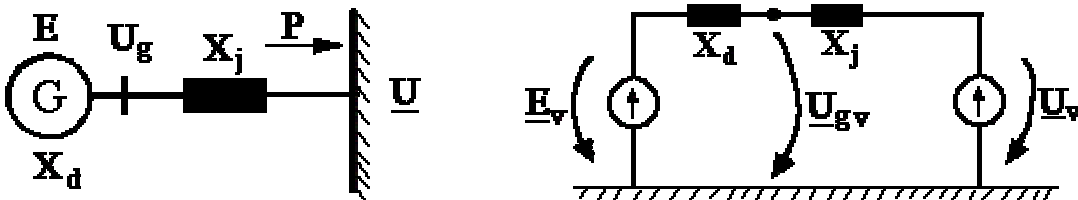
- [Etusivulle](#)
- [Hakemistoon](#)



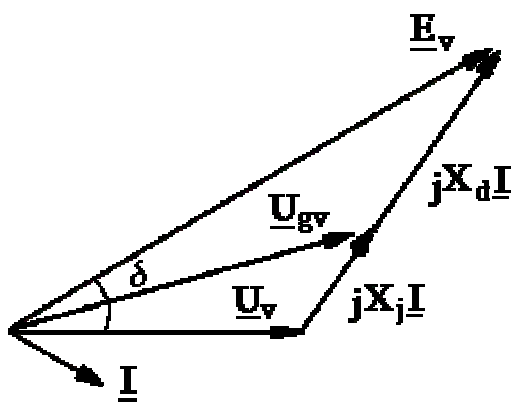
GENERAATTORIT



Generaattori muuttaa sähkövoimalaitoksen voimakoneen antaman mekaanisen tehon sähkötehoksi ja luovuttaa sen sähköverkkoon. Sähköenergian tuotannossa käytetään yleisesti tahtigeneraattoreita. Alla kuva generaattorin ja verkon välisestä tehon siirrosta ja sen sijaiskytkentä, jossa X_d on generaattorin tahtireaktanssi ja X_j on johdon reaktanssi. Alaindeksi v viittaa [vaihesuureisiin](#).



Vastaava osoitindigrammi. Suureet osoitinsuureita.



- \underline{E}_v = generaattorin sähkömotorinen voima smv
- \underline{I} = generaattorin virta
- \underline{U}_{gv} = generaattorin napajännite
- X_d = generaattorin tahtireaktanssi
- X_j = johdon reaktanssi
- \underline{U}_v = verkon jännite
- δ = generaattorin smv:n ja verkon jännitteen välinen kulma

Generaattorin verkkoon syöttämä pätöteho on

$$P = \frac{UE}{X_d + X_j} \sin \delta$$

Tahtigeneraattorit voidaan jakaa avo- eli varsinapakoneisiin ja umpinapa- eli lieriöroottorikoneisiin. Esimerkkejä käyttökohteista seuraavassa taulukossa:

	avo- eli varsinapakone		umpinapa- eli lieriöroottorikone		
voimalaitos	vesi	diesel	diesel	höyry ja kaasu	ydin
pyörimisnopeus [1/min]	75... 500	500... 1500	500... 1500	3000	1500

Voimalaitosten generaattorit ovat yleensä kolmivaihekoneita ja ne on [kytketty tähteen](#).

Katso [kolmivaiheisen tahtigeneraattorin kaavio](#).

Symmetristen kolmivaihejärjestelmien stabiilien tilanteiden tarkasteluissa generaattorista muodostetaan [yksivaiheinen sijaiskytkentä](#).

[Aura, Lauri ja Tonteri, Antti J., Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 1995; Elovaara, Jarmo ja Laiho, Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, 1990]

[Sähköverkkoon](#) [Etusivulle](#) [Hakemistoon](#)

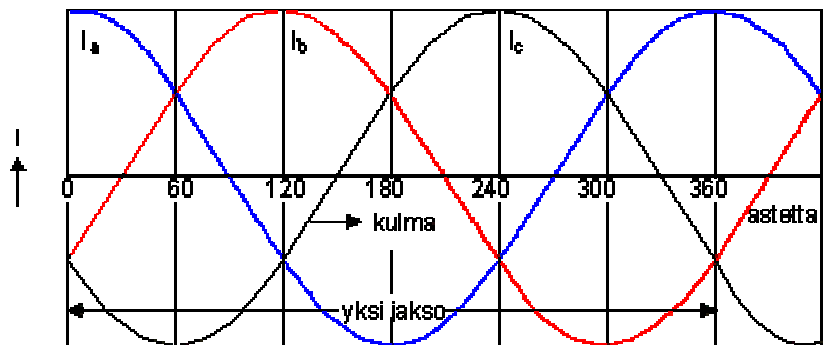
KOLMIVAIHEJÄRJESTELMÄ



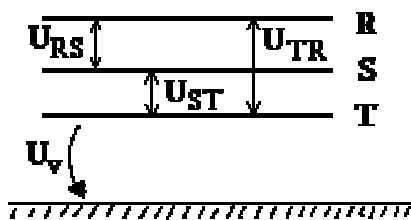
- [Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä](#)
- [Kolmivaihejärjestelmän jännitteet](#)
- [Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät](#)
- [Tehot kolmivaihejärjestelmässä](#)
- [Kuormitusvirta](#)

• Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä

Symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä sekä vaihevirran ja -jännitteen itseisarvot että perättäiset vaihevirtojen ja -jännitteiden väliset kulmat ovat yhtä suuret eli symmetriset. (Impedanssit kaikissa kolmessa vaihepiirissä ovat yhtäsuuret.) Vaihevirtojen suunta ja suuruus muuttuvat jatkuvasti taajuudella f (Suomessa 50 Hz) ja niiden välillä on 120° vaihesiirto.



Kolmivaihejärjestelmän jännitteet



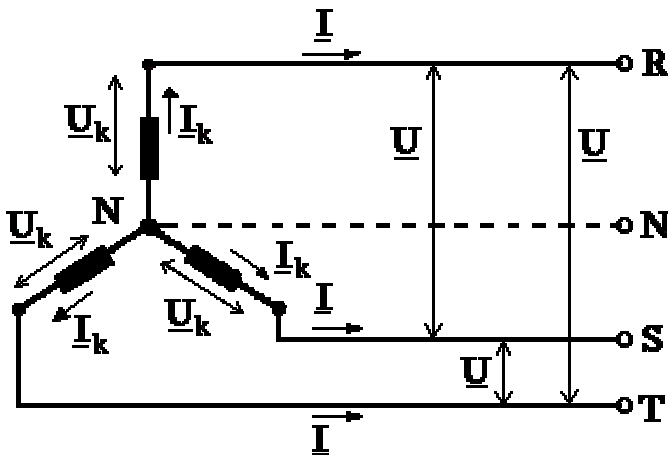
Kolmivaihejärjestelmän *pääjännitteellä* U tarkoitetaan kahden vaihejohtimen välistä jännitettä, U_{RS} , U_{ST} , U_{TR} . Vaihejohtimen ja todellisen tai kuvitellun nollajohtimen eli maan välinen *vaihejännite* U_v saadaan jakamalla pääjännite luvulla $(\sqrt{3})$.
Suomessa pienjänniteverkossa $U = 400$ V ja $U_v = 230$ V

Yleensä verkon jännitteestä puhuttaessa tarkoitetaan pääjännitettä eli vaiheiden välistä jännitettä ja virrasta puhuttaessa vaihejohtimen virtaa.

• Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät

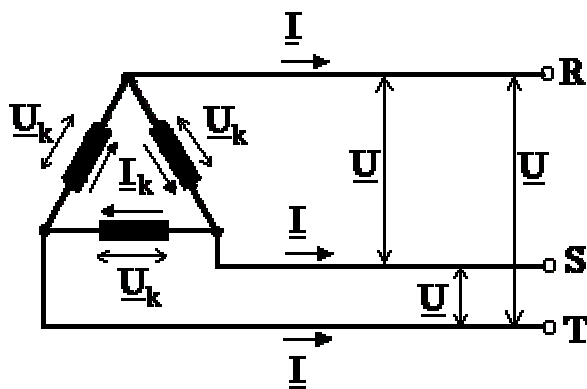
Tähtikytketyssä (Y) kolmivaihejärjestelmässä generaattorin vaihekäämien loppupäät on yhdistetty yhteiseen tähtipisteeseen N . Tähtipisteiden välinen johdin on *nollajohdin* ja muut

johtimet ovat ääri- eli *vaihejohtimia*. Järjestelmän ollessa *symmetrinen* nollajohtimen virta $I_N = 0$, joten nollajohdin voidaan jättää pois.



$\underline{U}, \underline{I}$ = äärijohtimien jännitteet ja virrat = pääjännitteet ja päävirrat
 \underline{I}_k = kuorman käämien virta = käämivirta
 \underline{U}_v = vaihejännitteet
 $U = (\sqrt{3})U_k = (\sqrt{3})U_v$
 $I = I_k$

Kolmiokytkeyssä (D) kolmivaihejärjestelmässä generaattorin vaihekäämien loppupäät on yhdistetty seuraavan vaihekäämin alkupäähän eli vaihekäämit on kytketty sarjaan.



$\underline{U} = \underline{U}_k$
 $\underline{I} = (\sqrt{3})\underline{I}_k$

• Tehot kolmivaihejärjestelmässä

Näennäisteho $S = \sqrt{3}UI = 3 * U_v I$

Pätöteho $P = S \cos \varphi = 3 U_v I \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$

Loisteho $Q = S \sin \varphi$

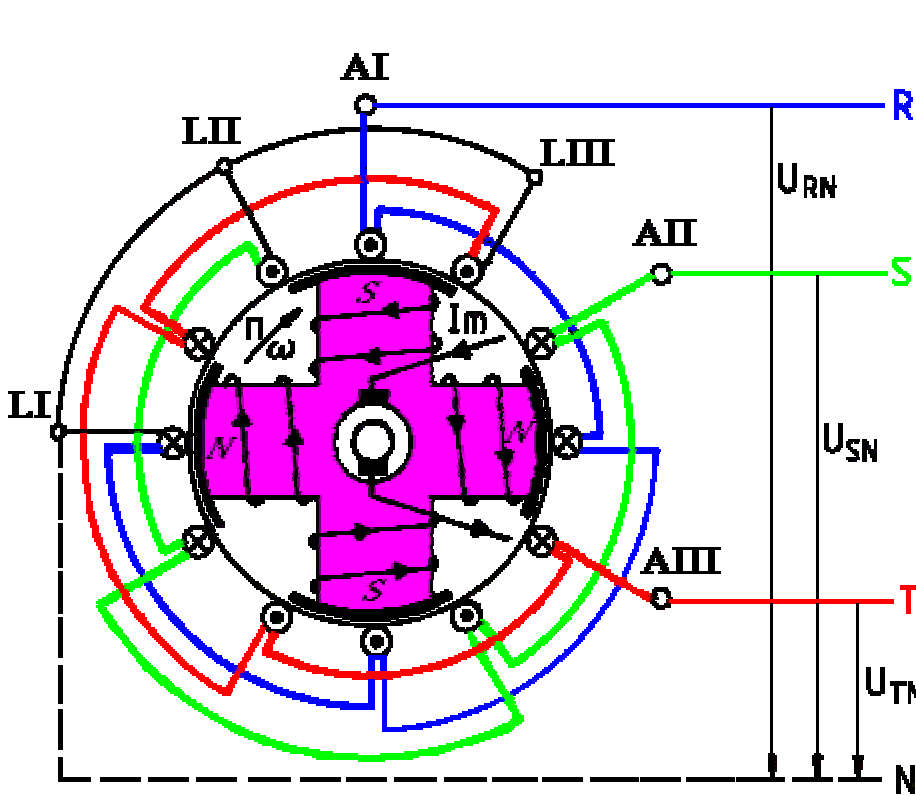
• Kuormitusvirta

$$\Rightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

[Aura, Lauri ja Tonteri, Antti, J., Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, WSOY 1995]

Kolmivaiheisen tahtigeneraattorin kaavio, jossa roottori (eli napapyörä) värjätty

[Generaattoreihin](#)



AI, AII, AIII =
vaihekäämien
alkupisteet

LI, LII, LIII =
vaihekäämien
loppupisteet

R, S, T =
vaihejohtimet

N = nollajohdin

U_{RN} , U_{SN} , U_{TN} =
vaihejännitteet
(tehollisarvo)

N ja S =
magnetointikäämien
navat

I_m = magnetoimisvirta

n = generaattorin
pyörimisnopeus

ω = kulmataajuus =
 $2\pi f$

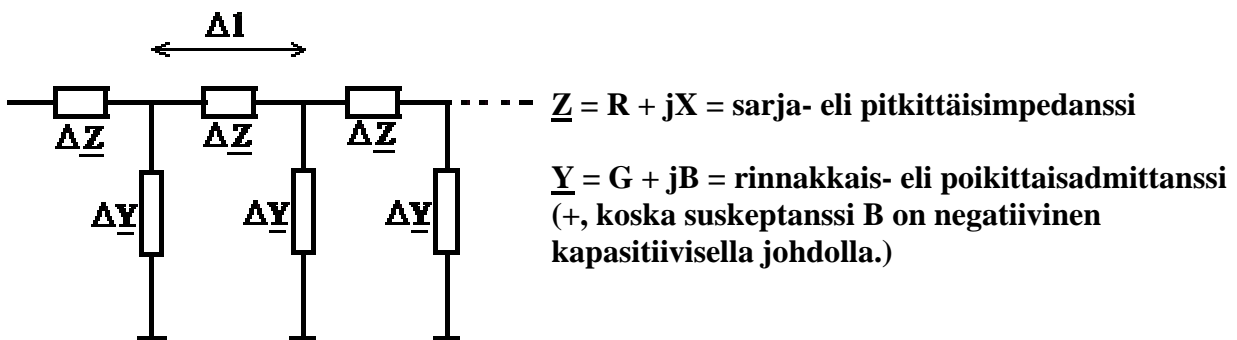
[Generaattoreihin](#)

YKSIVAIHEINEN SJAISKYTKENTÄ



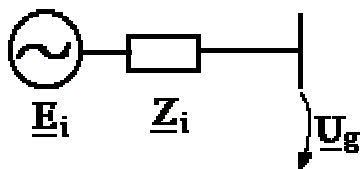
Sähköverkko voidaan kuvata yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Symmetristen kolmivaiheverkkojen laskennassa keskeisiä rakennenosia kuormien lisäksi ovat johdot, generaattorit ja muuntajat.

• Johdon sijaiskytkentä:



Sijaiskytkentä voidaan yksinkertaistaa johdon pituuden mukaan.

• Generaattorin sijaiskytkentä: \underline{E}_i on generaattorin smv ja \underline{U}_g on napajännite



$\underline{Z}_i = R + jX_d$ on generaattorin sisäinen impedanssi, tavallisesti $R \approx 0$

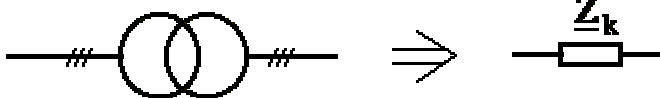
x_d on suhteellinen tahtireaktanssi, joka yleensä tunnetaan

Tahtireaktanssi X_d saadaan kaavasta

$$X_d = x_d \frac{U_N^2}{S_N}$$

• Muuntajan sijaiskytkentä:

Muuntajaa kuvataan verkostolaskennassa oikosulkuiimpedanssilla



$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k$$

Kun tunnetaan suhteellinen oikosulkuresistanssi u_r ja suhteellinen oikosulkureaktanssi u_x saadaan

$$R_k = u_r \frac{U_N^2}{S_N}$$

$$X_k = u_x \frac{U_N^2}{S_N}$$

Voimansiirtoverkoissa on useita muuntajilla erotettuja eri jännitteisiä portaita peräkkäin. Laskennassa onkin ensin päätettävä minkä jänniteportaan jännitteitä laskussa käytetään, jonka jälkeen muiden jänniteportaiden suuret [redusoidaan](#) valittuun jänniteportaaseen. Kun laskut on suoritettu redusoiduilla arvoilla, muunnetaan verkon osat takaisin alkuperäisiin jännitteisiin.

[Elovaara, Jarmo ja Laiho, Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo 1990]

[🟢Sähköverkkoon](#) [🟡Etusivulle](#) [🟢Hakemistoon](#)

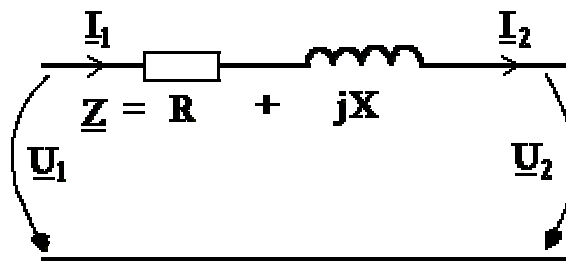
JOHDOT PITUUDEN MUKAAN



Johtojen pituuden mukainen jako lyhyisiin, keskipitkiin ja pitkiin johtoihin:

● LYHYET JOHDOT: PITUUS ALLE 50 km

poikittaissuureita ei oteta huomioon

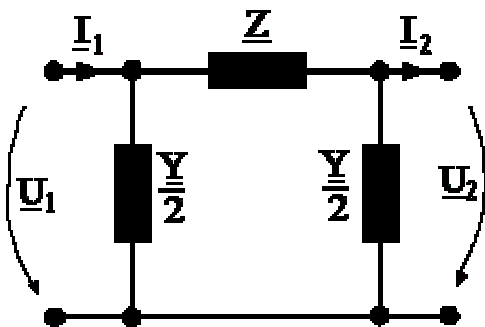


$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

● KESKIPITKÄT JOHDOT: PITUUS 50-200 km

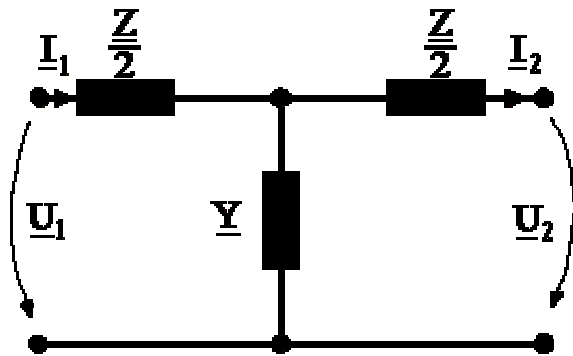
jakautuneet johtovakiot voidaan kuvitella π - tai T-sijaiskytkennän osiksi

π -sijaiskytkentä:



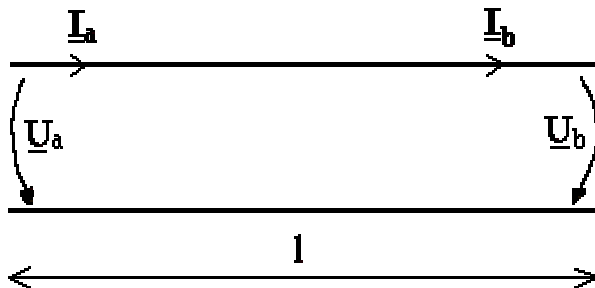
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{ZY}}{2} + 1 & \underline{Z} \\ \frac{\underline{ZY}^2}{4} + \underline{Y} & \frac{\underline{ZY}}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

T-sijaiskytkentä:



$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{ZY}}{2} + 1 & \frac{\underline{Z}^2 \underline{Y}}{4} + \underline{Z} \\ \underline{Y} & \frac{\underline{ZY}}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

● **PITKÄT JOHDOT: PITUUS YLI 200 km, koko pituudelle jakautuneet π -kytkennän vakiot**



$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{I}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_b \\ \underline{I}_b \end{bmatrix}$$

$\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ siirtovakioita

$$\underline{A} = \underline{D} = \cosh \underline{kl}$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_s \sinh \underline{kl}$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_s} \sinh \underline{kl}$$

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1$$

$$\underline{k} = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} = \sqrt{\underline{ZY}} \text{ etenemiskerroin}$$

$$= \alpha + j\beta \quad \alpha = \text{vaimennuskerroin}$$

$$\beta = \text{vaihekerroin}$$

$$\underline{Z}_s = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \text{ aaltoimpedanssi}$$

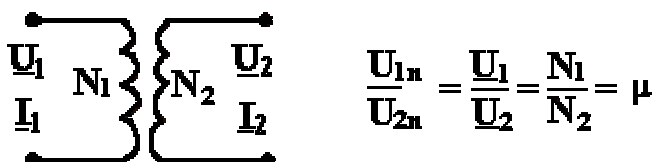
[Elovaara, Jarmo ja Laiho, Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo, 1990;
Mörsky, Jorma ja Mörsky, Janne, Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka, Otatieto 1994]

● [Sijaiskytkentään](#) ● [Etusivulle](#) ● [Hakemistoon](#)

REDUSOINTI



Voimansiirtojärjestelmässä muuntaja on epäjatkuvuuskohta, jossa jännite ja virta muuttuvat. Redusointi tehdään muuntajan muuntosuhteen avulla alla olevilla periaatteilla (reduoidut suureet ovat 'pilkullisia').



$U_2' = \mu U_2$ Jännitteet kerrotaan muuntosuhteella

$$S_1 = S_2 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2$$

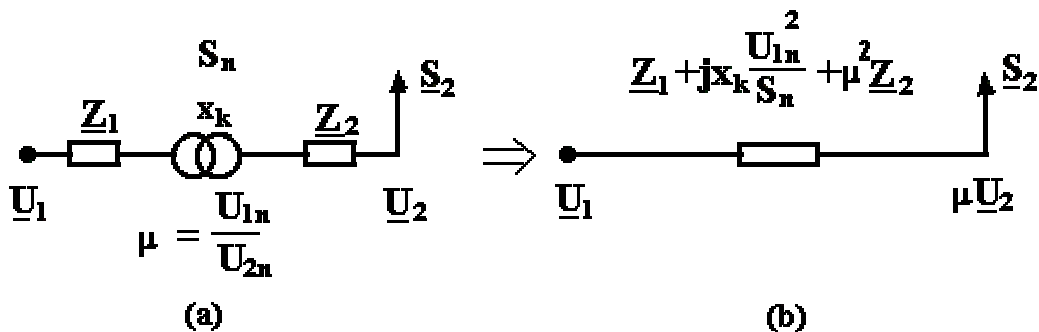
$I_2' = \frac{U_2}{U_1} I_2 = \frac{I_2}{\mu}$ Virrat jaetaan muuntosuhteella

$Z_2' = \mu^2 Z_2$ Impedanssit kerrotaan muuntosuhteen neliöllä

Verkkolaskuissa suureita käsitellään samassa jänniteportaassa ja ensin onkin päätettävä minkä jänniteportaan jännitteitä laskuissa käytetään. Muissa jänniteportaissa olevat suureet redusoidaan valittuun jänniteportaaseen. Kun laskut on suoritettu redusoiduilla arvoilla, voidaan verkon osat palauttaa alkuperäisiin jänniteportaisiin.

Esimerkki verkon redusoinnista:

a) alkuperäinen verkko, b) jänniteportaaseen 1 redusoitu verkko



Kolmivaiheisen sähköverkon laskenta etenee yleensä seuraavalla tavalla:

- **laaditaan eri komponenttien sijaiskytkennät, joita käyttäen voidaan muodostaa koko verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä**
 - **redusoidaan kaikki suureet samaan jännitetasoon ellei niin jo ole**
 - **suoritetaan laskelmat**
 - **tarvittaessa redusoidaan tulokset takaisin oikeille jännitetasoille**
-

[Elovaara, Jarmo ja Laiho, Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo 1990;
Partanen, Jarmo, Sähköenergiatekniikan perusteet, LTKK, Opetusmoniste, 1996]

● [Yksivaiheiseen sijaiskytkentään](#) ● [Etusivulle](#) ● [Hakemistoon](#)