

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](#)

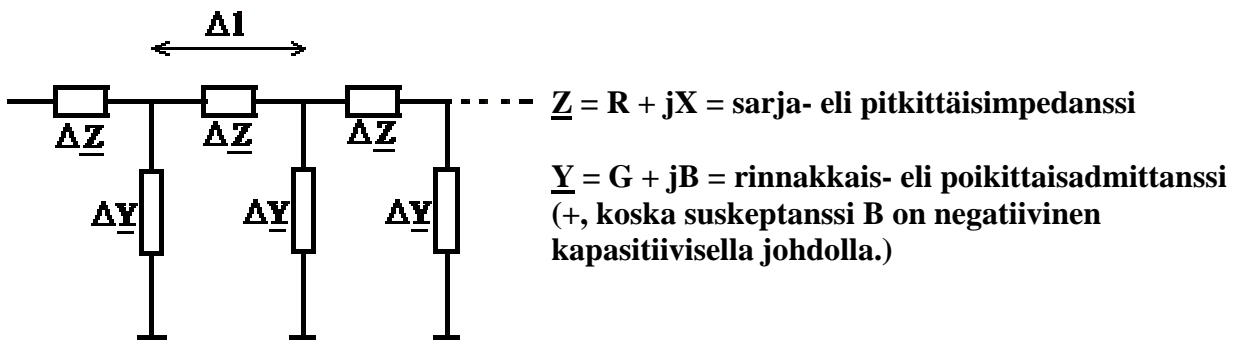
● [Etusivulle](#) ● [Hakemistoon](#)



YKSIVAIHEINEN SJAISKYTKENTÄ

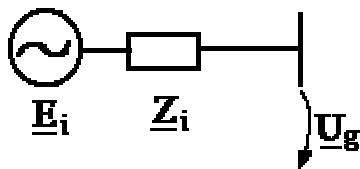
Sähköverkko voidaan kuvata yksivaiheisella sjaiskytkennällä. Symmetristen kolmivaiheverkkojen laskennassa keskeisiä rakennenosia kuormien lisäksi ovat johdot, generaattorit ja muuntajat.

• **Johdon sjaiskytkentä:**



Sjaiskytkentä voidaan yksinkertaistaa johdon pituuden mukaan.

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



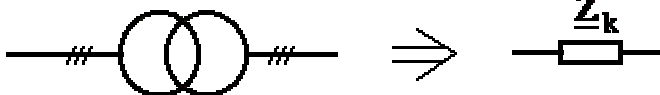
$\underline{Z}_i = R + jX_d$ on generaattorin sisäinen impedanssi, tavallisesti $R \approx 0$

x_d on suhteellinen tahtireaktanssi, joka yleensä tunnetaan Tahtireaktanssi X_d saadaan kaavasta

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

• **Muuntajan sjaiskytkentä:**

Muuntajaa kuvataan verkostolaskennassa oikosulkuimpedanssilla



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

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](#)

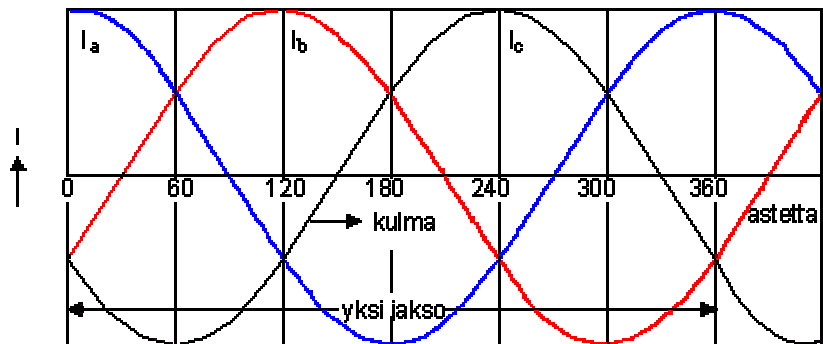
KOLMIVAIHEJÄRJESTELMÄ



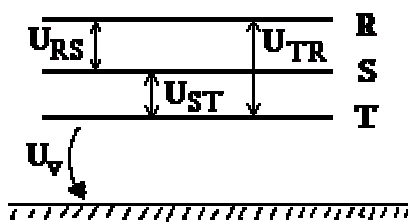
- [Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä](#)
- [Kolmivaihejärjestelmän jännitteet](#)
- [Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät](#)
- [Tehot kolmivaihejärjestelmässä](#)
- [Kuormitusvirta](#)

• 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



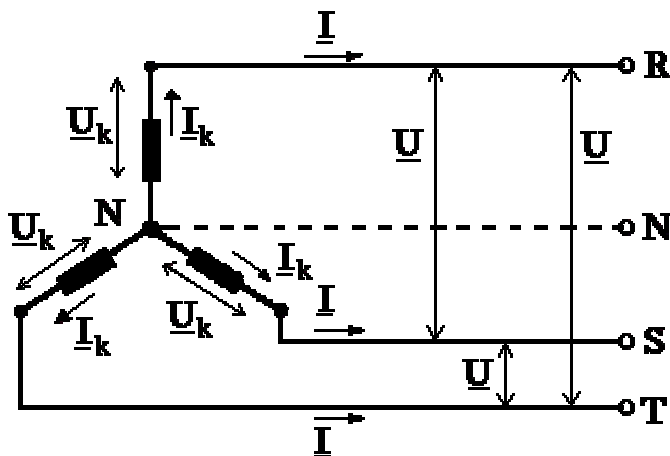
Kolmivaihejärjestelmän *pääjännitteellä* U tarkoitetaan kahden vaihejohtimen välistä jännitettä, U_{RS} , U_{ST} , U_{TR} . Vaihejohtimen ja todellisen tai kuvitellun nollajohtimen eli maan välinen *vaihejännite* U_V saadaan jakamalla pääjännite luvulla $(\sqrt{3})$.

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.

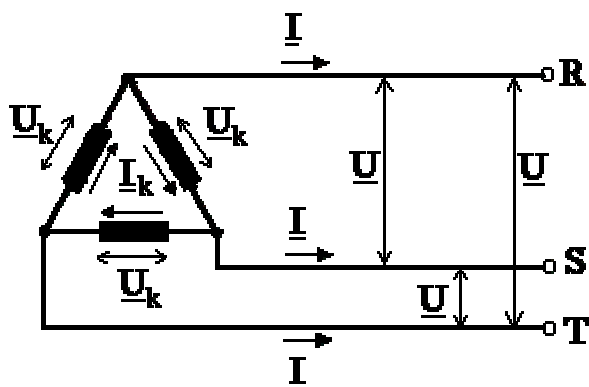
• Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät

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
 $U = (\sqrt{3})U_k = (\sqrt{3})U_v$
 $I = I_k$

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



$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_k \\ \underline{I} &= (\sqrt{3})\underline{I}_k \end{aligned}$$

• 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]

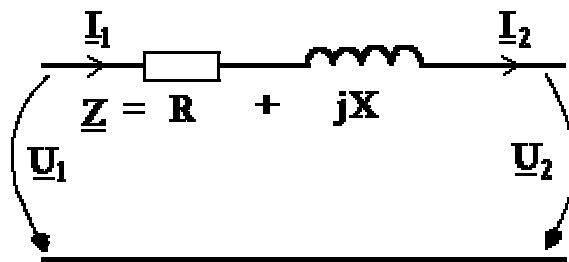
JOHDOT PITUUDEN MUKAAN



Johtojen pituuden mukainen jako lyhyisiin, keskipitkiin ja pitkiin johtoihin:

● LYHYET JOHDOT: PITUUS ALLE 50 km

poikittaissuureita ei oteta huomioon

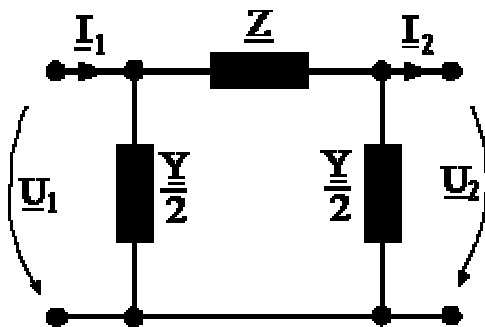


$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

● KESKIPITKÄT JOHDOT: PITUUS 50-200 km

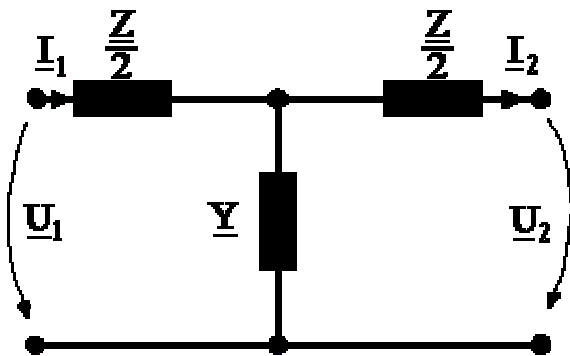
jakautuneet johtovakiot voidaan kuvitella π - tai T-sijaiskytkennän osiksi

π -sijaiskytkentä:



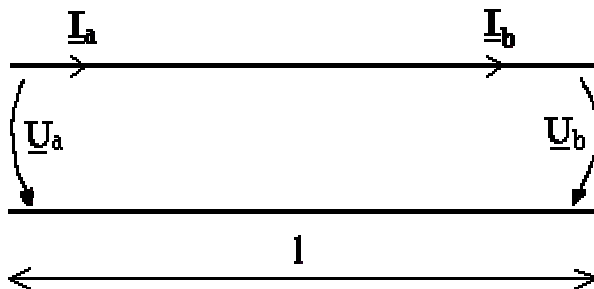
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{ZY}}{2} + 1 & \underline{Z} \\ \frac{\underline{ZY}^2}{4} + \underline{Y} & \frac{\underline{ZY}}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

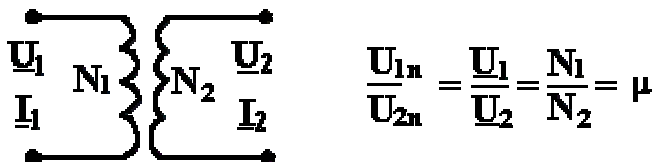
[Elovaara, Jarmo ja Laiho, Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo, 1990;
Mörsky, Jorma ja Mörsky, Janne, Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka, Otatieto 1994]

● [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').



$\underline{U}_2' = \mu \underline{U}_2$ Jännitteet kerrotaan muuntosuhteella

$$S_1 = S_2 \Rightarrow \underline{U}_1 \underline{I}_1 = \underline{U}_2 \underline{I}_2$$

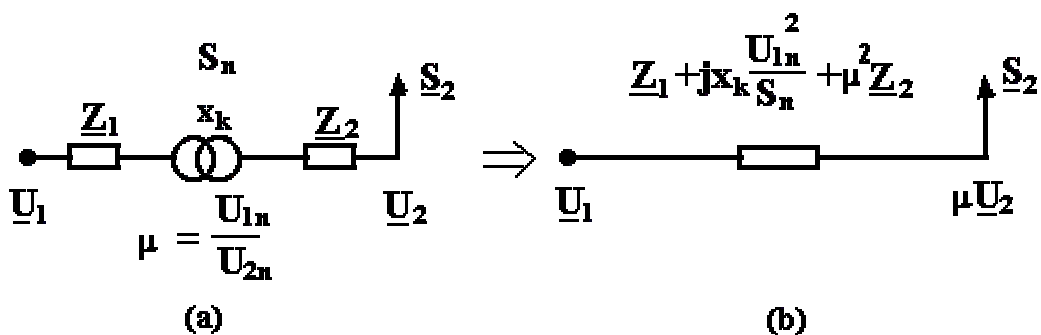
$\underline{I}_2' = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_2}{\mu}$ Virrat jaetaan muuntosuhteella

$\underline{Z}_2' = \mu^2 \underline{Z}_2$ 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**
- **reduoidaan kaikki suureet samaan jännitetasoon ellei niin jo ole**
- **suoritetaan laskelmat**
- **tarvittaessa reduoidaan tulokset takaisin oikeille jännitetasoille**

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

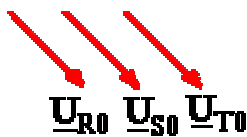
● [Yksivaiheiseen sijaiskytkentään](#) ● [Etusivulle](#) ● [Hakemistoon](#)

SYMMETRISET KOMPONENTIT



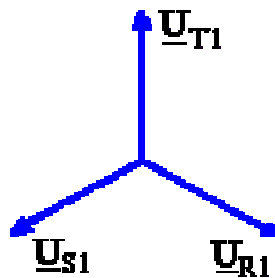
Kun kolmivaihejärjestelmää ei voida olettaa symmetriseksi (eli laskea yksivaiheisella sijaiskytkennällä), käytetään symmetrisiä komponentteja, joiden avulla saadaan epäsymmetrinen järjestelmä kuvatuksi yksivaihejärjestelmällä. Tässä tilanteessa epäsymmetrisen kolmivaiheisuuden (esim. \underline{U}_R) ilmaisemiseen tarvitaan kolme symmetristä komponenttia (\underline{U}_{R0} , \underline{U}_{R1} , \underline{U}_{R2}), eli yksi osoitin kustakin järjestelmästä alla olevien kuvien mukaisesti.

Nollajärjestelmässä (yksivaiheinen) kaikki vaihesuureet ovat yhtä suuret ja samanvaiheiset.



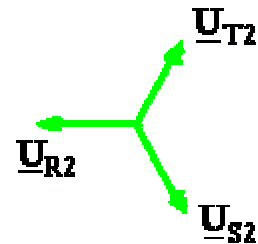
$$\begin{aligned}U_{R0} &= U_0 \\U_{S0} &= U_0 \\U_{T0} &= U_0\end{aligned}$$

Myötäjärjestelmä on symmetrinen kolmivaihejärjestelmä vaihejärjestyksellä R-S-T.



$$\begin{aligned}U_{R1} &= U_1 \\U_{S1} &= a^2 U_1 \\U_{T1} &= a U_1\end{aligned}$$

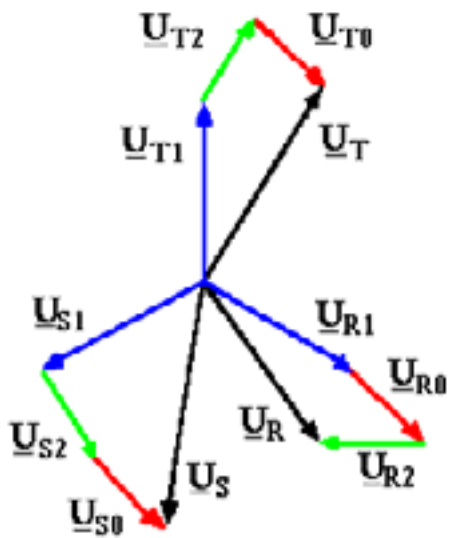
Vastajärjestelmä on symmetrinen kolmivaihejärjestelmä vaihejärjestyksellä R-T-S.



$$\begin{aligned}U_{R2} &= U_2 \\U_{S2} &= a U_2 \\U_{T2} &= a^2 U_2\end{aligned}$$

missä a on [vaiheenkääntöoperaattori](#)

Epäsymmetriset vaihesuureet saadaan summaamalla kunkin osajärjestelmän asianomaisen vaiheen komponentit. Alla olevassa kuvassa on esitetty epäsymmetristen vaihesuureiden muodostuminen symmetrisistä komponenteista.



Epäsymmetriset jännitteet

$$U_R = U_{R0} + U_{R1} + U_{R2}$$

$$U_S = U_{S0} + U_{S1} + U_{S2}$$

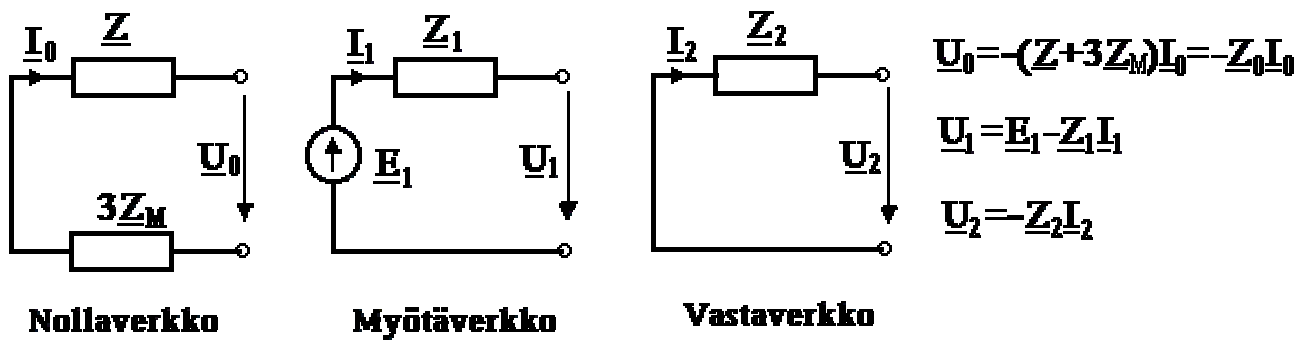
$$U_T = U_{T0} + U_{T1} + U_{T2}$$

Jännitteet ja virrat symmetristen komponenttien avulla ilmaistuna esitetään usein matriisimuodossa

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix}$$

Kukin virtakomponentti kohtaa verkossaan omat impedanssinsa: nollakomponentti nollaimpedanssit, myötäkomponentti myötäimpedanssit ja vastakomponentti vastaimpedanssit, ks. ao. kuva. Impedanssien perusteella puhutaan nolla-, myötä-, ja vastaverkosta.



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

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