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

KERTAUS 

KERTAUS I: VAIHTOSÄHKÖ

- Vaihtosähkö(sinimuotoinen)
- Vaihtovirtajohdon suureita
- Vaihtovirtakomponentit
- Vaihtosähkön tehot

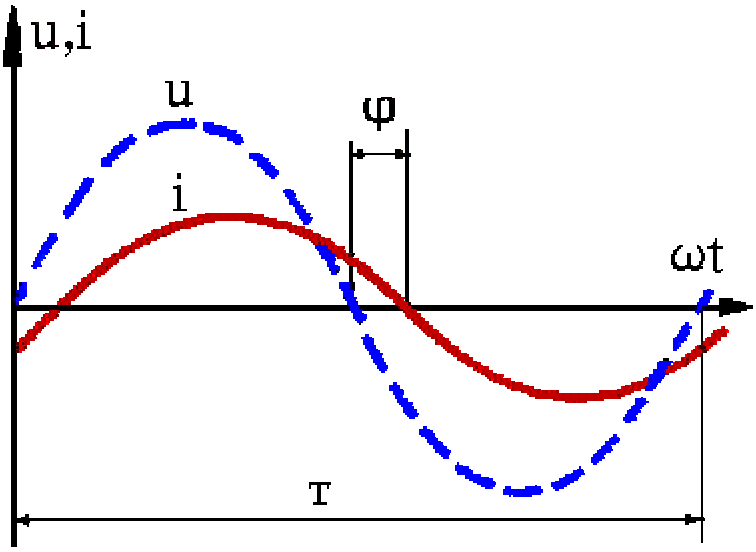
KERTAUS II: KOLMIVAIHEJÄRJESTELMÄ

- Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä
- Kolmivaihejärjestelmän jännitteet
- Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät
- Tehot kolmivaihejärjestelmässä
- Kuormitusvirta

KERTAUS III: LASKENTAA

- Osoitinlaskenta
- Vaiheenkääntöoperaattori
- Kolmio-tähti-muunnos

VAIHTOSÄHKÖ (sinimuotoinen)



$u = \hat{u} * \sin \omega t$

$U = \hat{u} / (\sqrt{2})$

$i = \hat{i} * \sin(\omega t - \varphi)$

$I = \hat{i} / (\sqrt{2})$

u, i = jännitteen ja virran hetkellisarvot

û, î = jännitteen ja virran huippuarvot

U, I = jännitteen ja virran tehollisarvot

$\omega = 2\pi f$ = kulmataajuus

f = 1 / T = taajuus; T = jaksonaika

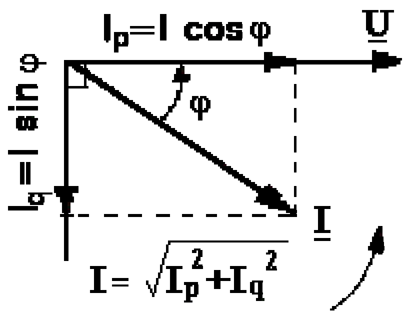
φ = jännitteen ja virran välinen vaihe-ero, *vaihesiirtokulma*

Vaihtovirtajohdon suureita

R	**= resistanssi**	**$G = \frac{1}{R}$**	**= konduktanssi**
$X_L = \omega L$	**= induktiivinen reaktanssi**	**$B = \frac{1}{X}$**	**= suskeptanssi**
$X_C = -\frac{1}{\omega C}$	**= kapasitiivinen reaktanssi**	**$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = G - jB$**	**= kokonaisadmittanssi**
$X = X_L - X_C$			
$\underline{Z} = R + jX$	**= impedanssi**		

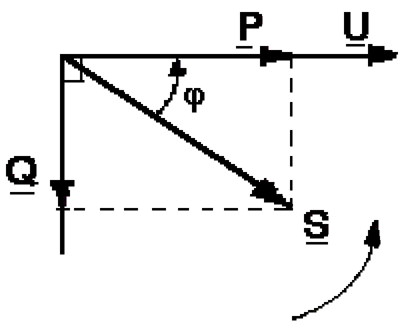
[Paavola, Martti, Sähköjohdot, WSOY, 1975
Laitinen, Esko, Mäkelä, Mikko, Soininen, Lauri ja Tuomola, Seppo: Kaavasto, Matematiikan, fysiikan, mekaniikan ja lujuusopin peruskaavoja. Vammala 1981, s.139,141]

Vaihtovirtakomponentit:



PÄTÖVIRTA I_p	LOISVIRTA I_q
$I_p = I\cos\varphi$	$I_q = I\sin\varphi$
jännitteen kanssa samanvaiheista = puhdasta resistiivistä virtaa	jännite virtaa edellä: φ ja sinφ positiiviset ja I_q positiivista = induktiivista loisvirtaa (90° jännitettä jäljessä)
vaihtosähkön teho riippuu vain jännitteen kanssa samanvaiheisesta virran komponentista eli pätökomponentista	jännite virtaa jäljessä: φ ja sinφ negatiivisia ja I_q negatiivista = kapasitiivista loisvirtaa (90° jännitettä edellä)

Vaihtosähkön tehot



NÄENNÄISTEHO S	PÄTÖTEHO P	LOISTEHO Q
$\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^* = \underline{I}^2\underline{Z}$ $\underline{I}^* = \underline{I}$:n kompleksikonjugaatti	$P = UI\cos\varphi = UI_p = I^2R$	$Q = UI\sin\varphi = UI_q = I^2X$
[S]=VA volttiampeeri	[P] = W watti	[Q] = VAr volttiampeeria reaktiivista tehoa
koostuu pätö- ja loistehosta: $S^2 = P^2 + Q^2$	cosφ = R / Z on vaihtosähkön *tehokerroin*	sinφ = X / Z on vaihtosähkön *loistehokerroin*
vaihtojännitteen ja -virran tehollisarvojen tulo	sähkölähteestä kulutuskojeeseen sähkön kuluttajan hyödyksi siirtyvä teho	sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä edestakaisin sykkivä hyödytön teho

Virran $\underline{I}$ konjugaattiosoitin $\underline{I}^*$ on osoitin, jonka reaaliosa on yhtäsuuri kuin $\underline{I}$:n reaaliosa, mutta imaginaariosa $\underline{I}$:n imaginaariosan vastasuure.

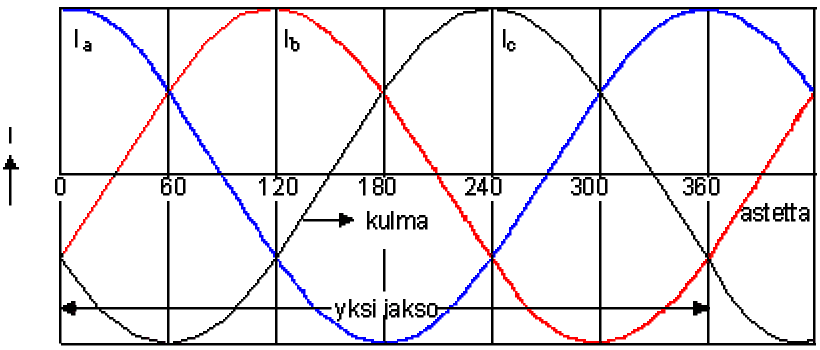
[Aura, Lauri ja Tonteri, Antti, J., Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet,WSOY 1995]

KOLMIVAIHEJÄRJESTELMÄ

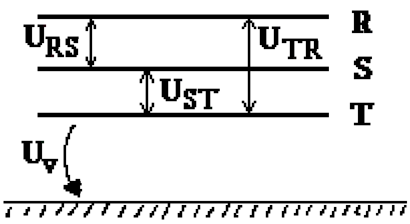
- Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä
- Kolmivaihejärjestelmän jännitteet
- Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät
- Tehot kolmivaihejärjestelmässä
- Kuormitusvirta

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

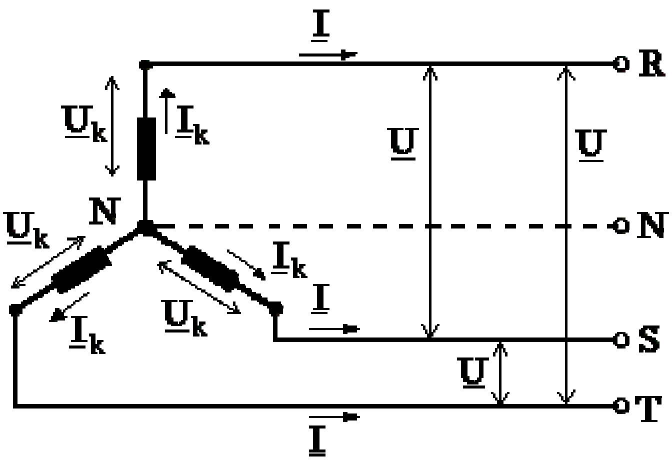


Kolmivaihejärjestelmän *pääjännitteellä U* tarkoitetaan kahden vaihejohtimen välistä jännitettä, U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}. Vaihejohtimen ja todellisen tai kuvitellun nollajohtimen eli maan välinen *vaihejännite U_v* saadaan jakamalla pääjännite luvulla ($\sqrt{3}$).
Suomessa pienjänniteverkossa U = 400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

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

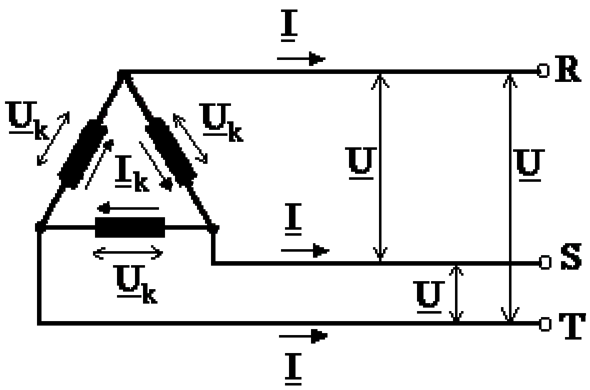
Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät

***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.**



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

Tehot kolmivaihejärjestelmässä

Näennäisteho $S = \sqrt{3}UI = 3 * U_vI$

Pätöteho $P = S\cos\varphi = 3\, U_vI\cos\varphi = \sqrt{3}UI\cos\varphi$

Loisteho $Q = S\sin\varphi$

Kuormitusvirta

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

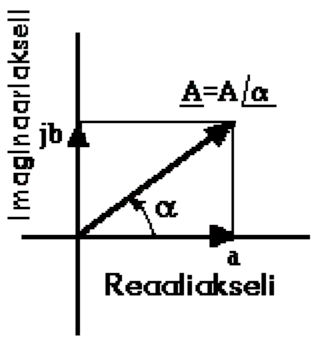
[Aura, Lauri ja Tonteri, Antti, J., Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, WSOY 1995]

KERTAUS III: LASKENTAA 

- Osoitinlaskenta
- Vaiheenkääntöoperaattori
- Kolmio-tähti-muunnos

Osoitinlaskenta

Vaihtovirtatekniikan jaksollisten ilmiöiden käsittely voidaan tehdä puhtaasti matemaattisesti, kun yhtälöt kirjoitetaan kompleksimuotoon. Tätä laskutapaa sanotaan osoitinlaskennaksi. Esimerkiksi osoitinsuure A voidaan esittää kompleksitasossa reaalisuureen a ja imaginaarisuureen jb summana alla olevan kuvan mukaisesti.



summamuoto $\underline{A}=a+jb$

itseisarvo $A=\sqrt{a^2+b^2}$

vaihekulma $\tan\alpha = \frac{b}{a}$

kulmamuoto $\underline{A}=A\angle\alpha$

Osoittimien yhteen- ja vähennyslasku

$$A_1\angle\alpha_1 + A_2\angle\alpha_2 = A_1\cos\alpha_1 + jA_1\sin\alpha_1 + A_2\cos\alpha_2 + jA_2\sin\alpha_2$$
$$= (A_1\cos\alpha_1 + A_2\cos\alpha_2) + j(A_1\sin\alpha_1 + A_2\sin\alpha_2)$$
$$A_1\angle\alpha_1 - A_2\angle\alpha_2 = (A_1\cos\alpha_1 - A_2\cos\alpha_2) + j(A_1\sin\alpha_1 - A_2\sin\alpha_2)$$

Osoittimien kerto- ja jakolasku

$$A_1\angle\alpha_1 \cdot A_2\angle\alpha_2 = A_1e^{j\alpha_1}\cdot A_2e^{j\alpha_2} = A_1A_2e^{j(\alpha_1+\alpha_2)}$$
$$= A_1A_2\angle\alpha_1+\alpha_2$$
$$\frac{A_1\angle\alpha_1}{A_2\angle\alpha_2} = \frac{A_1}{A_2}\angle\alpha_1-\alpha_2$$

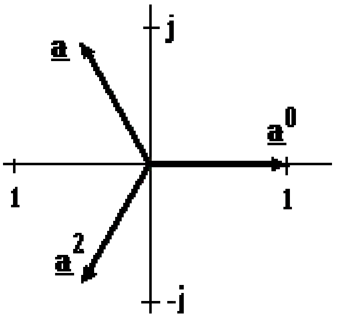
[Paavola, Martti, Sähkötekniikan oppikirja teknillistä opetusta ja ominpäin opiskelua varten, WSOY 1973]

Vaiheenkääntöoperaattori

Kolmivaihejärjestelmän symmetrisillä sähkösuureilla, jännitteellä ja virralla, on sama tehollisarvo, mutta 120º vaihe-ero. Perättäisten vaiheiden suureet voidaankin muodostaa edellisestä vaiheesta käyttämällä vaiheenkääntöoperaattoria a.

Esimerkiksi vaihesuureiden lausekkeet voidaan kirjoittaa: (Suureet osoitinsuureita)

vaiheenkääntämisen symboli $\underline{a}$



$$\underline{a} = 1\angle 120^\circ$$

jolloin

$$\underline{a}^0 = 1$$
$$\underline{a}^1 = \underline{a} = 1\angle 120^\circ = 1\angle -240^\circ$$
$$\underline{a}^2 = 1\angle 240^\circ = 1\angle -120^\circ$$

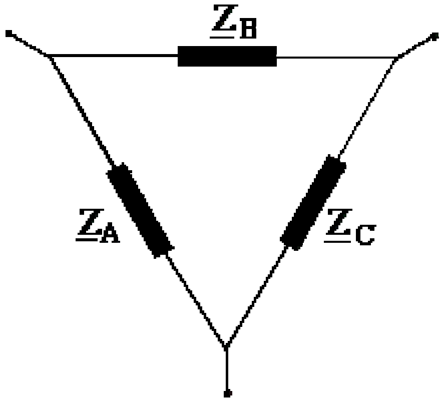
$$\underline{U}_R = \underline{U}_R$$
$$\underline{U}_S = \underline{a}^2\underline{U}_R$$
$$\underline{U}_T = \underline{a}\underline{U}_R$$

$$\underline{I}_R = \underline{I}_R$$
$$\underline{I}_S = \underline{a}^2\underline{I}_R$$
$$\underline{I}_T = \underline{a}\underline{I}_R$$

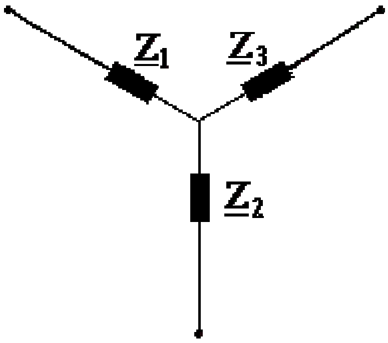
[Voipio, Erkki, Virtapiirit ja verkot, Otatieto 1996]

Kolmio-tähti-muunnos

Johtoverkon matemaattinen käsittely helpottuu, kun sen osia korvataan ekvivalenttikytkennöillä. Tavallisimmat muunnokset ovat kolmion muotoisen impedanssikytkennän muunnos ekvivalentiksi tähdeksi ja päinvastoin.



↔



$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2\underline{Z}_3}{\underline{Z}_3}$$

$$\underline{Z}_B = \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2}$$

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1}$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_A\underline{Z}_B}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C}$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_A\underline{Z}_C}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C}$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_B\underline{Z}_C}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C}$$

[Paavola, Martti, Sähköjohdot, WSOY 1975]

Sähköverkkoon Etusivulle Hakemistoon Kertaukseen I Kertaukseen II