

# 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](#)



# SÄHKÖASEMAT



---

Sähköasemalla tarkoitetaan sellaista kanta-, alue- tai jakeluverkon kohtaa, jossa voidaan:

- suorittaa kytkentöjä
- keskittää sähköenergian siirtoa
- muuntaa jännitettä
- jakaa sähköenergian siirtoa eri johdoille

---

Seuraavassa keskitytään käsittelemään vain kanta- ja alueverkkojen sähköasemia.

---

Sähköasemat muodostavat kanta- ja alueverkkoihin kohtia, joissa eri jännitteiset voimajohdot yhtyvät. Sähkö- eli kytkinasemat koostuvat [muuntajista](#) ja muista verkonhallintavälineistä. Vuonna 1992 kantaverkon sähköasemia oli 51 ja alueellisia sähköasemia 704.

---

Sähköaseman tärkeimpiin verkonhallintalaitteisiin kuuluvat:

- katkaisijat, jotka kykenevät vaurioitumatta avaamaan, sulkemaan ja johtamaan kuormitusvirran lisäksi myös oikosulkuvirran
- erottimet, jotka muodostavat luotettavan, yleensä näkyvän, avausvälin erotettavan virtapiirin ja muun laitoksen välille
- mittamuuntajat, jännite- ja virtamuuntaja, jotka mm. eristävät mittauspiirin suurjännitteisestä päävirtapiiristä
- kompensoimislaitteet, rinnakkaiskondensaattoriparistot ja rinnakkaiskuristimet eli reaktorit, jotka kompensoivat kapasitiivista loistehoa
- releet ja varokkeet (putkivaroke 36 kV:iin asti), jotka toimivat suojaustarkoituksissa

---

Sähköasemat pyritään sijoittamaan mahdollisimman lähelle kulutuksen painopistealueita [tehoäviöiden](#) minimoimiseksi.

---

[Elovaara, Jarmo ja Laiho, Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, 1990;

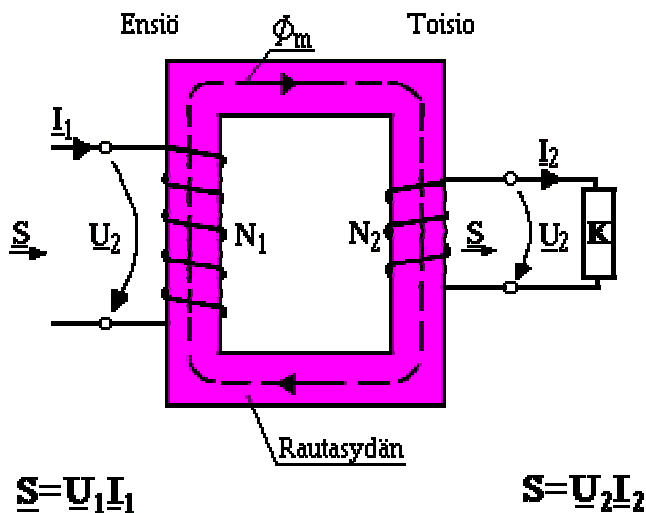
Sähkölaitostilasto, Sähkötarkastuskeskus ja Sähköenergialiitto ry, 1995]

# MUUNTAJA



Muuntajia käytetään sähköverkossa muuntamaan jännitettä ja eristämään kaksi eri jännitteistä verkkoa toisistaan. *Teho- eli voimamuuntajat* muuntavat jännitteen joko suuremmaksi tai pienemmäksi tarpeen mukaan. Ne voidaan jakaa suurteho- ja pienteho- eli [jakelumuuntajiin](#).

Yksivaihemuuntaja on yleensä rakenteeltaan kaksikämmimuuntaja, jonka ensiö- ja toisiokäämit on asennettu samalle rautasydämelle alla olevan kuvan mukaisesti.



Nimet ensiö ja toisio määräytyvät tehon virtaussuunnan mukaan.

Sähköteho  $S$  tuodaan ensiöpuolelle käämiin  $N_1$ . Sähköteho  $S$  otetaan toisiopuolelta käämistä  $N_2$  kuormitukseen  $K$ . Teho  $S$  siirtyy ensiöstä toisioon magneettivuon  $\Phi_m$  välityksellä.

Kolmivaihemuuntaja saadaan kytkemällä yhteen kolme yksivaihemuuntajaa, joista jokainen muodostaa yhden kolmivaihemuuntajan vaiheen. Kolmivaihemuuntajan vaihekäämit kytketään joko [tähteen, kolmioon tai hakatähteen](#).

Muuntajan muuntosuhde  $\mu$  on ensiön nimellisjännitteen suhde toisio-  
nimellisjännitteeseen:

$$\mu = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

**Jännitteen muuntaminen kuluttaa osan muuntajan läpi virtaavasta sähkötehosta. Muuntajan antaman tehon suhde sen ottamaan ilmaistaan tehohyötysuhteella  $\eta$ .**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + P_k + P_0)}$$

missä

$P_1$  on muuntajan ottama teho ja  $P_2$  on muuntajan antama teho

$P_k$  on virtalämpö- eli kuormitushäviöt, jotka syntyvät käämeissä

$P_0$  on rauta- eli tyhjäkäyntihäviöt, jotka syntyvät rautasydämessä

---

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

---

[Aura, Lauri ja Tonteri, Antti, J., Sähkömiehen käsikirja 2, Sähkökoneet, WSOY 1986]

---

[Sähköasemiin](#) [Etusivulle](#) [Hakemistoon](#)

# JAKELUMUUNTAMOT



Jakelumuuntamot muuntavat jakeluverkkojen siirtojännitteet sähkönkuluttajien käyttöön soveltuvaksi pienjännitteeksi. Jakelumuuntamoiden jännitteet Suomessa ovat 20/0,4 kV tai 10/0,4 kV.

Suomessa olevat jakelumuuntamot vuonna 1995:

JAKELUMUUNTAMOT			
Kaapeliliitännäiset		Ilmajohtoliitännäiset	
rak. eli kiinteistö	koppi eli puisto	torni	pylväs
8 806	9 806	1 375	100 825

Alla olevissa kuvissa on esimerkit puistomuuntamoista ja pylväsmuuntamoista.



[Elovaara, Jarmo ja Laiho, Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo 1990;  
Sähkölaitostilasto, Sähkötarkastuskeskus ja Sähköenergialiitto ry, 1995]

# MUUNTAJAKYTKENNÄT

Kolmivaihemuuntajan vaihekäämit kytketään tähteen, kolmioon tai hakatähteen.

## Tähtikytkenä

• käyttö sekä ala- että yläjännitekäämityksissä

•  $U = (\sqrt{3}) * U_k$

•  $I = I_k$

• jännitteensäätö nollapistekäämikytkimellä

## Kolmiokytkenä

• käyttö sekä ala- että yläjännitekäämityksissä

•  $U = U_k$

•  $I = (\sqrt{3}) * I_k$

• jännitteensäätö vaihekäämikytkimellä

## Hakatähtikytkenä

• käyttö vain jakelumuuntajien alajännitekäämityksissä (pienillä jännitteillä ja tehoilla)

•  $U = (\sqrt{3}) * U_k$

•  $I = I_k$

• jännitteensäätö väliottokytkimellä

missä U ja I ovat pääjännite ja -virta ja  $U_k$  ja  $I_k$  käämijännite ja -virta

Standardoituja kolmivaihemuuntajien kytkentöjä on yhteensä 12, jotka jakautuvat neljään kytkentäryhmään. Ryhmien tunnuslukuina käytetään kellotaulun tuntilukemia 0 = 12, 5, 6 ja 11. Tunnuksluvun avulla ilmaistaan ensiö- ja toisiojännitteiden vaihekulmaero. Tunnuksluku kertoo mitä kellotaulun numeroa toisiojänniteosoitin osoittaa, kun vastaava ensiöjänniteosoitin osoittaa numeroa 12 eli 0. Toisin sanoen ensiöjänniteosoitin on kellon minuuttiosoitin ja toisiojänniteosoitin on tuntiosoitin. Esimerkiksi tunnuksluku 1 tarkoittaa, että alajännite on 30° jäljessä yläjännitteestä.

Alla olevassa taulukossa on esitetty Suomessa yleisimmin käytetyt kytkennät.

Tun- nus- luku	Kyt- ken- tä	Osoitinkuvat		Kytkenät	
		YI	AI	YI	AI
0	Yy0				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

- Y yläjännitekäämitys tähtikytkenässä
- D yläjännitekäämitys kolmiokytkenässä
- y alajännitekäämitys tähtikytkenässä
- d alajännitekäämitys kolmiokytkenässä
- z alajännitekäämitys hakatähtikytkenässä

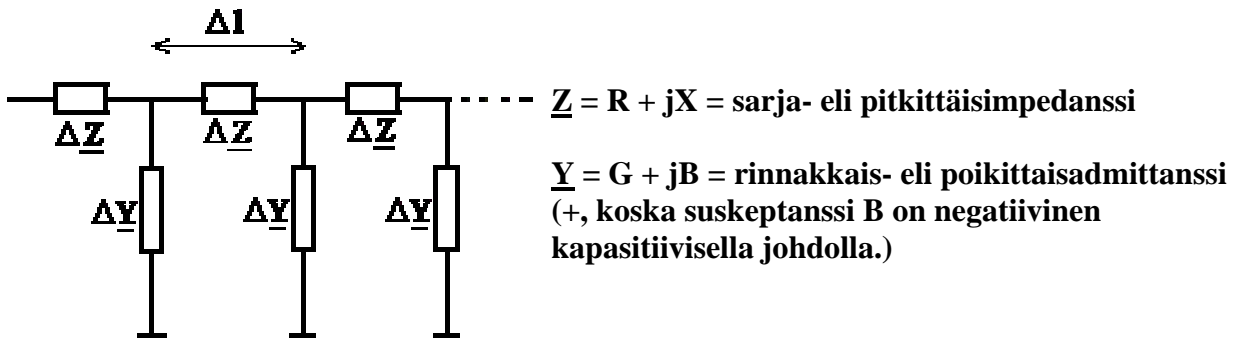
[Aura, Lauri ja Tonteri, Antti, J., Sähkömiehen käsikirja 2, Sähkökoneet, WSOY 1986]

# YKSIVAIHEINEN SIIAISKYTKENTÄ



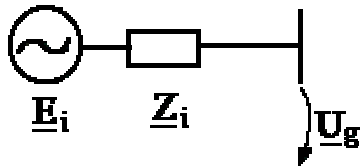
Sähköverkko voidaan kuvata yksivaiheisella sijaiskytkennällä. [Symmetristen kolmivaiheverkkojen](#) laskennassa keskeisiä rakennenosia kuormien lisäksi ovat johdot, generaattorit ja muuntajat.

## 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:

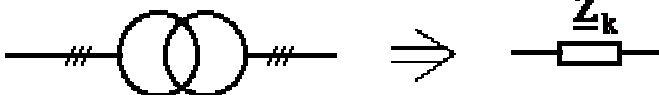
Muuntajaa kuvataan verkostolaskennassa oikosulkuiimpedanssilla

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

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](#)



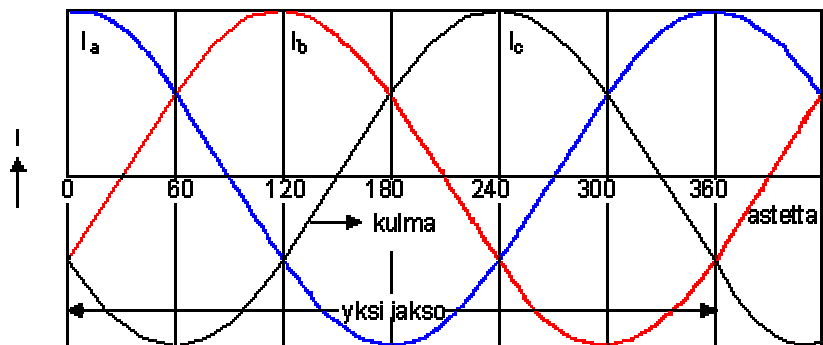
# KOLMIVAIHEJÄRJESTELMÄ



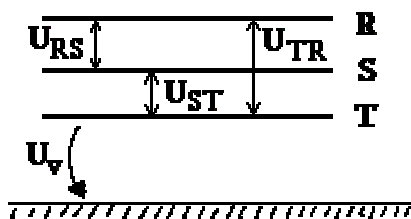
- [Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä](#)
- [Kolmivaihejärjestelmän jännitteet](#)
- [Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät](#)
- [Tehot kolmivaihejärjestelmässä](#)
- [Kuormitusvirta](#)

## • 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  $120^\circ$  vaihesiirto.



## Kolmivaihejärjestelmän jännitteet



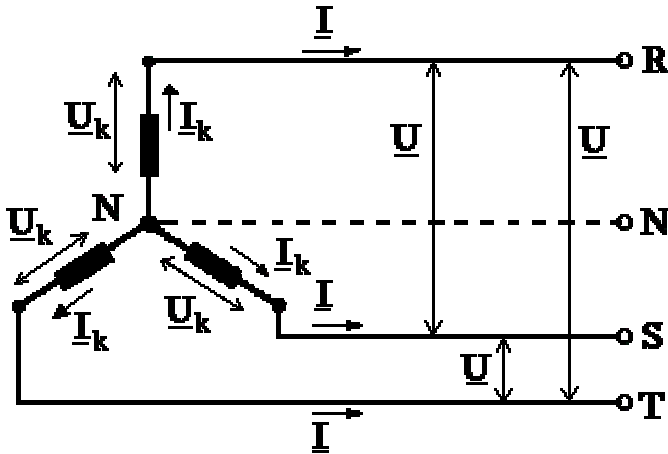
Kolmivaihejärjestelmän *pääjännitteellä*  $U$  tarkoitetaan kahden vaihejohtimen välistä jännitettä,  $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ . Vaihejohtimen ja todellisen tai kuvitellun nollajohtimen eli maan välinen *vaihejännite*  $U_V$  saadaan jakamalla pääjännite luvulla  $(\sqrt{3})$ .

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.

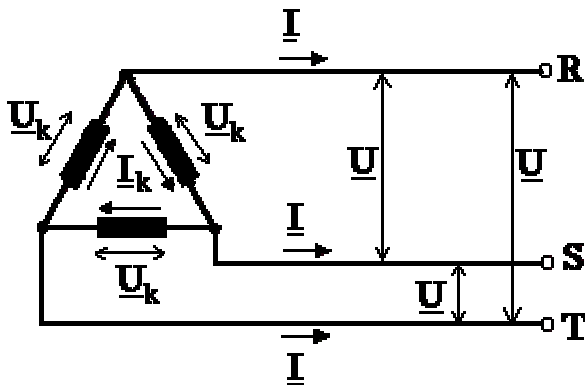
## • Tähti- ja kolmiokytketyt kolmivaihejärjestelmät

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

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]

# TEHOHÄVIÖT

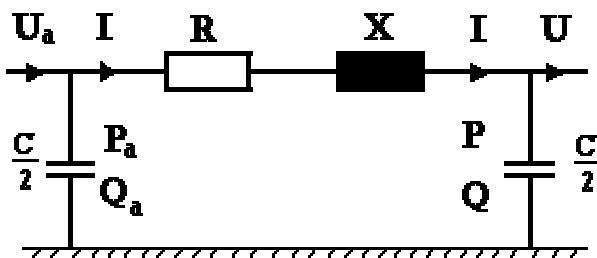


Virran kulkiessa johtimen läpi syntyy johdon impedanssissa ( $R, X$ ) [jännitteenalenemaa](#) ja tehohäviötä.

Teho- eli kuormitushäviöitä ovat kuormitusvirran synnyttämät pätöteho- eli virtalämpöhäviöt ja loistehohäviöt.

Kolmivaihejohtimessa, jonka resistanssi on  $R$  ja jossa kulkee virta  $I$ , syntyy virran neliöön verrannollinen pätötehohäviö  $P_{hv} = I^2 R$ , joten koko kolmivaihejohdon pätötehohäviö on  $P_h = 3 I^2 R$ . Pätötehohäviö muuttuu lämmöksi ja menee siten hukkaan.

Alla olevassa kuvassa on kolmivaihejohdon sijaiskytkentä, jonka resistanssi ja induktiivinen reaktanssi vaihetta kohti ovat  $R$  ja  $X$ . Johdon alkuun syötetään pätöteho  $P_a$  ja loisteho  $Q_a$  ja johdon loppuun saapuu pätöteho  $P$  ja loisteho  $Q$ . Virta on koko johdossa  $I$ .



Virran pätö- ja loiskomponentti johdon lopussa ovat:

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} U} \quad \text{ja} \quad I_q = \frac{Q}{\sqrt{3} U}$$

Koska  $I^2 = I_p^2 + I_q^2$ , on johdolla syntyvä pätötehohäviö  $P_h$

$$P_h = P_a - P = 3 I^2 R = 3 (I_p^2 + I_q^2) R = 3 \left( \frac{P^2}{3U^2} + \frac{Q^2}{3U^2} \right) R, \text{ joten}$$

$$P_h = \left( \frac{P}{U} \right)^2 * R + \left( \frac{Q}{U} \right)^2 * R$$

**Johdon induktiivisessa rektanssissa syntyvälle loistehohäviölle  $Q_h$  saadaan vastaavasti**

$$Q_h = \left(\frac{P}{U}\right)^2 * X + \left(\frac{Q}{U}\right)^2 * X$$

---

**Loistehon siirto vaikuttaa molempiin häviöihin, joten sitä on rajoitettava *kompensoinnin* avulla. Loistehon kehittämiseen käytetään kondensaattoria, mikä voidaan kytkeä vaiheiden välille kolmio- tai tähtikytkentänä. Kompensointi voidaan siis toteuttaa joko rinnakkais- tai sarjakompensointina.**

---

[Paavola, Martti, Sähköjohtojen laskeminen, WSOY 1969]

---

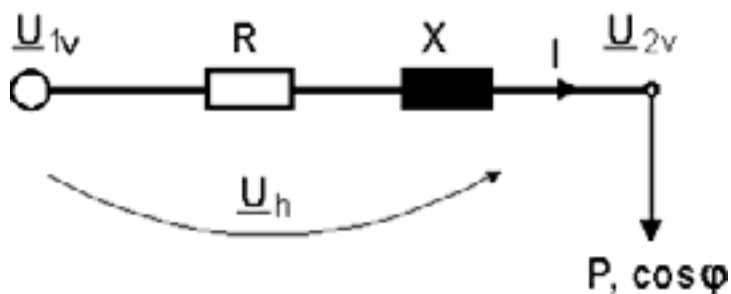
[Etusivulle](#) [Sähköasemiin](#) [Hakemistoon](#)

# JÄNNITTEENALENEMA



Virran kulku johtimessa synnyttää johdon impedanssissa [tehohäviöitä](#) ja jännitteenalennamaa.

Tarkastellaan alla olevan kuvan mukaista tilannetta, jossa johto on kuvattu pelkällä sarjaimpedanssilla (kapasitanssi ja konduktanssi jätetty pois).



Johdon loppupäässä on kuorma, jonka pätöteho on  $P$  ja kuorman tehokerroin on  $\cos\phi$ . Kulma  $\phi$  on johdon loppupään jännitteen ja kuormitusvirran välinen vaihesiirtokulma. Kuormitusvirran  $I$  kulkiessa johtimessa syntyy sen impedanssissa *jännitehäviö*, jonka vuoksi johdon loppupään jännite  $\underline{U}_2$  on eri suuri kuin johdon alkupään jännite  $\underline{U}_1$ . Jännitehäviö on näiden jännitevektoreiden erotus.

$$\underline{U}_h = \underline{U}_{1v} - \underline{U}_{2v} = \underline{I} \underline{Z} = \underline{I} (R + jX)$$

Laskettaessa [kuormitusvirtaa](#) tulisi jännitteenä yhtälössä käyttää johdon loppupään jännitteen arvoa  $\underline{U}_{2v}$ , mutta tätähän ei yleensä tiedetä. Tavallisesti virhe jää kuitenkin merkityksettömän pieneksi, vaikka laskennassa käytetäänkin alkupään jännitettä  $\underline{U}_{1v}$ .

Sähkönjakeluverkossa yleensä on tärkeä tietää *jännitteenalennama*, joka on jännitteiden  $\underline{U}_{1v}$  ja  $\underline{U}_{2v}$  itseisarvojen erotus.

$$U_h = |U_{1v}| - |U_{2v}|$$

Yksinkertaisempiin laskelmiin (ei tarvita vektorilaskentaa) ja käytännössä riittävään tarkkuuteen päästään laskemalla jännitteenalennama likimääräislausekkeella

$$U'_h = IR \cos\phi + IX \sin\phi = I_p R + I_q X$$

**$I_p$  = kuormitusvirran pätökomponentti**

**$I_q$  = kuormitusvirran loiskomponentti**

**R = johdon kokonaisresistanssi/vaihe**

**X = johdon kokonaisreaktanssi/vaihe**

---

**Edellä mainittuja yhtälöitä käytettäessä on syytä muistaa, että niistä tulos saadaan vaihejännitesuureena ts. jos lasketaan esim. prosentuaalisia jännitteenalennuksia on vertailujännitteenä käytettävä myös vaihejännitettä.**

**On myös syytä muistaa, että em. likimääräisyhtälö kertoo jännitteiden itseisarvojen erotuksen, joka on riittävä jakeluverkkolaskelmissa. Siirtojohtojen tehonsiirrossa on jännitteiden itseisarvojen erotuksen lisäksi merkitystä myös jännitteiden välisellä kulmalla, joten siirtoverkkolaskelmat on tehtävä ensin mainitun yhtälön mukaisesti osoitinlaskentana.**

---

[Partanen, Jarmo: Sähköenergiatekniikan perusteet, LTKK Opetusmoniste 1996]

---

[🟡 Etusivulle](#) [🟢 Hakemistoon](#)