



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Sähkötekniikka ja elektroniikka

60. tuotantokausi

Luento 4 (5)

Kimmo Silvonen (X)

13.10.2021

Sähkövoimatekniikka ja sähköteho

Luento 13.10.2021

- ▶ Vaihtovirran teho P
- ▶ Kompleksinen teho $S = U \cdot I^* = P + jQ$
- ▶ Pätöteho, loisteho ja näennäisteho
- ▶ Kolmivaihejärjestelmä ja voimavirta
- ▶ Sähköliittymä, pistorasiat
- ▶ Yksivaiheinen sijaiskytkentä
- ▶ Vaihtovirtamoottorit lyhyesti; moottorit kuuluvat koealueeseen vain siltä osin kuin niitä on käsitelty laskuharjoituksessa
- ▶ Lisätietoa: Elektroniikka ja sähkötekniikka, sivut 359–372 ja 387–397.

Vaihtovirran teho vs. jännitteen ja virran vaihe-ero φ

$$\phi = \varphi = \varphi_U - \varphi_I \quad (\varphi = \varphi_u - \varphi_i)$$

- ▶ Hetkellinen teho $p(t) = u(t)i(t)$
- ▶ Keskimääräinen teho $P = \frac{W}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$

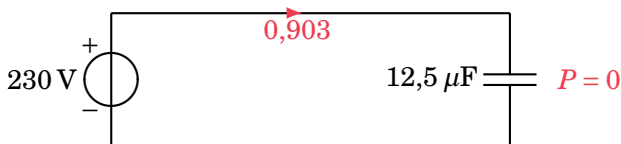
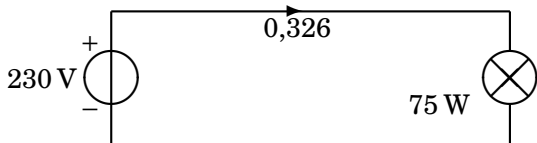
Esim. loistelamppu

$$\text{▶ Vaihtovirran teho } \underbrace{P}_{36 \text{ W}} = \underbrace{|U|}_{230 \text{ V}} \underbrace{|I|}_{0,157 \text{ A}} \underbrace{\cos \varphi}_{\approx 0,5} \approx 2 \frac{P}{U} \approx 0,5$$

- ▶ Kompleksiluvuilla laskettu $U \cdot I$ on fyysikaalisesti järjetön!
- ▶ $U \cdot I = |U| \angle \varphi_U \cdot |I| \angle \varphi_I = |U| \cdot |I| \angle (\varphi_U + \varphi_I) = \text{Bullshit}$
- ▶ $U \cdot I^* = |U| \angle \varphi_U \cdot (|I| \angle \varphi_I)^* = |U| \cdot |I| \angle (\varphi_U - \varphi_I)$
- ▶ Kompleksinen teho onkin $S = U \cdot I^* = P + jQ$
- ▶ Loistehon kompensointi, tehosoitus
- ▶ Sininen maito 1,5 l, energiasisältö: 2850 kJ = 0,792 kWh

Lamppu ja konkka *Light Bulb (R) vs. C*

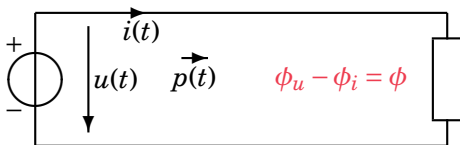
Kumpi kuumeni enempi?



$$I = \frac{U}{\frac{1}{j\omega C}} = j\omega CU = 2\pi fCU \angle 90^\circ$$

Siniaallon hetkellinen teho *Instantaneous Power*

Vaihtelee tuplataajuudella



$$u(t) = \sqrt{2}|U| \sin(\omega t + \phi_u)$$

$$i(t) = \sqrt{2}|I| \sin(\omega t + \phi_i)$$

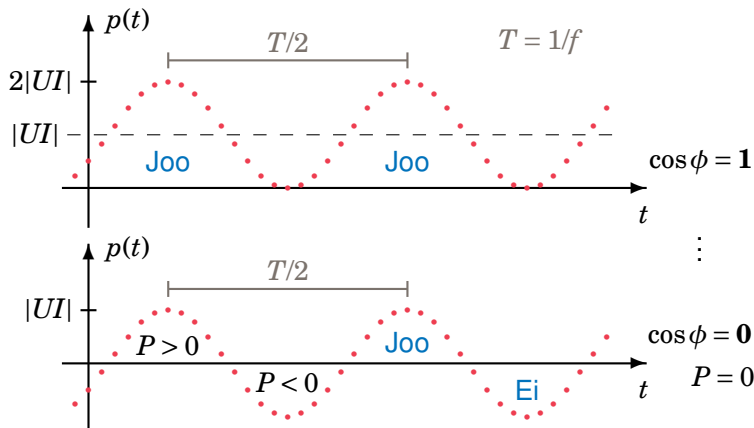
$$p(t) = ui = 2|UI| \sin(\omega t + \phi_u) \sin(\omega t + \phi_i)$$

$$= |UI| \cos(\phi_u - \phi_i) - |UI| \cos(2\omega t + \phi_u + \phi_i)$$

Teho virtaa *tietysti* jännitelähteestä kuormaan! Vai virtaako?

Resistiivinen vs. reaktiivinen kuorma Power Factor

Tehokerroin $\cos \phi$, alla ääritapaukset; usein $\cos \phi \approx 0,5$



Monivalintakysymyksiä on toivottu, tästä saatte: onko $|U| \cdot |I|$ yhtä suuri kuin hetkellisen tehon huippuarvo silloin, kun keskimääräinen teho on nolla? On!

Hetkellinen, keskimääräinen ja kompleksinen teho

Vaihtovirran teho ei ole UI kertaa I . Muista liittoluku I^* ! Mutta mikä on liittoluku?

$$p(t) = |UI|[\cos(\overbrace{\phi_u - \phi_i}^{\phi}) - \cos(2\omega t + \phi_u + \phi_i)]$$

$$P = P_{\text{Average}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = |UI| \cos \phi$$

$$S = UI^* = |U| \angle \phi_u (|I| \angle \phi_i)^* = |UI| \angle \overbrace{\phi_u - \phi_i}^{\phi}$$

$$S = \underbrace{|UI| \cos \phi}_P \text{ (W)} + j \underbrace{|UI| \sin \phi}_Q \text{ (VAr)} \quad \text{(VA)}$$

Oikea teho on pätötehoa P , loistehoa Q ei ole fyysikaalisena tehona olemassa! Liittoluvussa kulman ja imaginaariosan etumerkki vaihtuu.

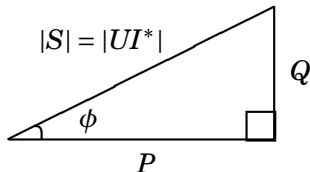
Näennäisteho $|S|$, pätöteho P , loisteho Q , Tehokolmio

Apparent Power, Active Power, Reactive Power, Power Triangle

Näennäisteho on vain näennäistä! Loistehon paras fysikaalinen tulkinta:

$|Q| = \sqrt{|p(t)_{\text{MAX}} \cdot p(t)_{\text{MIN}}|}$ eli hetkellisen tehon positiivisen ja negatiivisen maksimin itseisarvojen keskiarvo eli tulon neliöjuuri! (vrt. 1. vk 24.10.2011)

$$S = UI^* = P + jQ$$



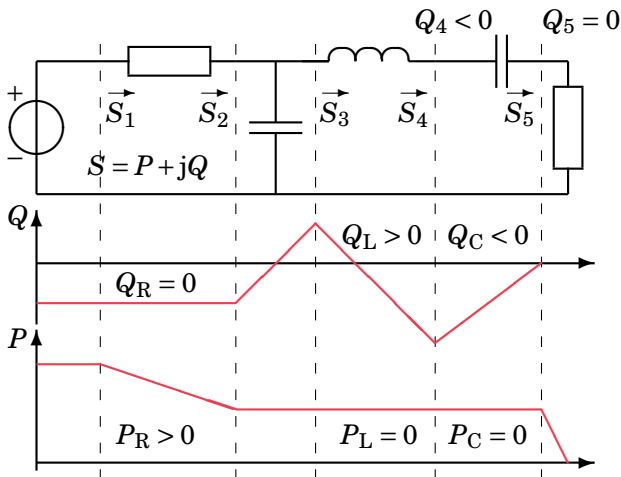
$$S = UI^* \quad U = ZI \quad I = YU$$

$$S = \frac{|U|^2}{Z^*} = Z|I|^2 = |U|^2 Y^* = \frac{|I|^2}{Y}$$

Tehon virtaus

Kertausesimerkki, lukuarvot esim. EjSt, s. 366.

R syö pätötehoa P , C ”tuottaa” ja L ”kuluttaa” loistehoa Q .

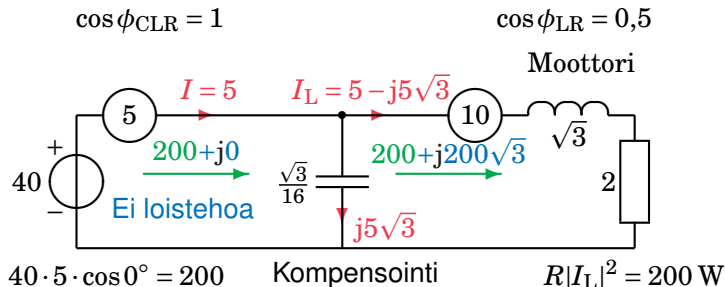


Kompensointikondensaattori *Compensation*

Moottoriin 200 W **tehoa** mahdollisimman pienellä virralla!

Tämä on laskuharjoitustehtävä 41 eri lukuarvoilla:

Esim. $U = 40$ V, $\omega = 2$, $P_R = 200$ W,

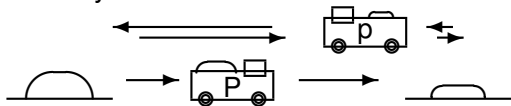


Kun C on lisätty, virta $I < I_L$, vaikka **teho** P_R ei muutu! $Q_C = -Q_L$.

Miten loisteho Q voi kasvattaa virtaa,

jos kerran loisteholla ei ole fyysikaalista vastinetta?

- ▶ Loistehoa syntyy, jos piirissä on energiavaroja (L tai C)
- ▶ Energiaa siirtyy edestakaisin energiavarojen ja lähteiden välillä
- ▶ Edestakaisin heiluva energia ei kulu, jos johtimissa ei ole vastusta. Täältä osin siis tehoa ei kulu
- ▶ Edestakaisen tehon p takia "kuorma-autovirtaa" tarvitaan enemmän tietyn keskimääräisen tehon P siirtämiseen:



- ▶ Alempi auto palaa tyhjänä takaisin, ylempi noudattaa sanontaa: "vie mennessäs — tuo tullessas"
- ▶ Mutta edestakainen teho ei ole yhtä suuri kuin loisteho!
Siksi loisteholla ei ole suoraa fyysikaalista vastinetta.

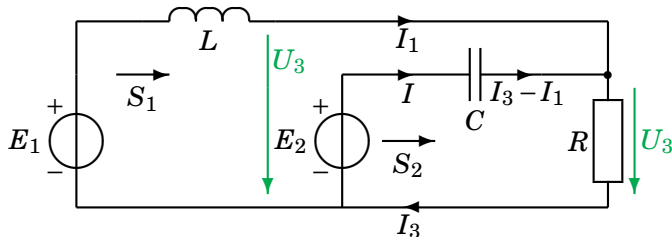
Esim. Tehon jakautuminen eri komponentteihin

$$E_1 = 10\angle 0^\circ \text{ V}, E_2 = 20\angle 90^\circ \text{ V}, R = 4 \Omega, L = 0,2 \text{ H}, C = 0,05 \text{ F}, \omega = 10 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$I_1 = 10 - j25 \quad I_2 = 20(-1 + j) \quad I_3 = -10 - j5 \quad \& \quad U_3 = -40 - j20$$

$$S_L = Z_L \cdot |I_1|^2 = 1450j$$

$$S_C = -j \frac{1}{\omega C} \cdot |I_2|^2 = -1600j$$



$$S_1 = E_1 I_1^* = 10 \cdot (10 + 25j) = 100 + 250j \quad (1)$$

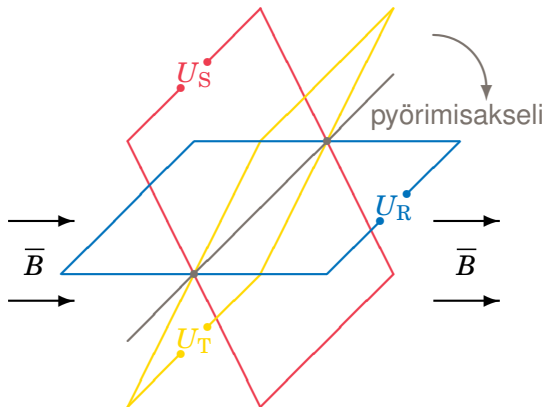
$$S_2 = E_2 I^* = 20j \cdot (-20 - 20j) = 400 - 400j \quad (2)$$

$$S_R = (-40 - 20j)(-10 + j5) = 500 + 0j = \text{Re}[S_1 + S_2] \quad (3)$$

$$S_1 + S_2 = S_L + S_C + S_R \quad (4)$$

Kolmivaihejärjestelmä 3-Phase System

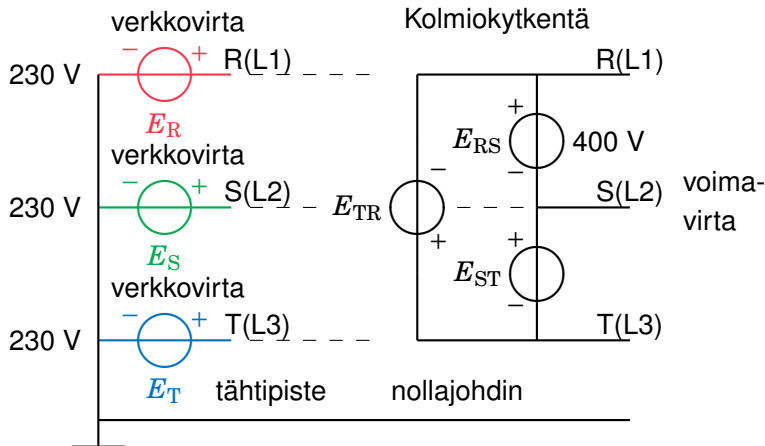
Generaattorin kolme käämiä (RST, RYB) samalla akselilla



Jos kaikki Suomen järvet, arviolta $250 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, kevytmaidoksi muuttuisivat, sitä vastaava sähköenergia riittäisi 1500:ksi vuodeksi (taantuma-Suomen vuosikulutus oli noin 85 TWh).

Tähti- (Y) ja kolmiokytkentä (∇)

RGB-värit ovat tässä selvennyksenä — niillä ei ole yhteyttä käytäntöön



Pääjännite / vaihejännite

Vaihejännitteet ovat tasavälein ympyrän kaarella, symmetria

$$E_{RS} / E_R$$

$$415 / 240 \text{ V}$$

$$400 / 230 \text{ V} \quad \hat{e}_{RS} = 566 \text{ V}$$

$$380 / 220 \text{ V}$$

$$e_R(t) = \hat{e} \sin(\omega t - 0^\circ) \quad E_R = E \angle 0^\circ$$

$$e_S(t) = \hat{e} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad E_S = E \angle -120^\circ$$

$$e_T(t) = \hat{e} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad E_T = E \angle -240^\circ$$

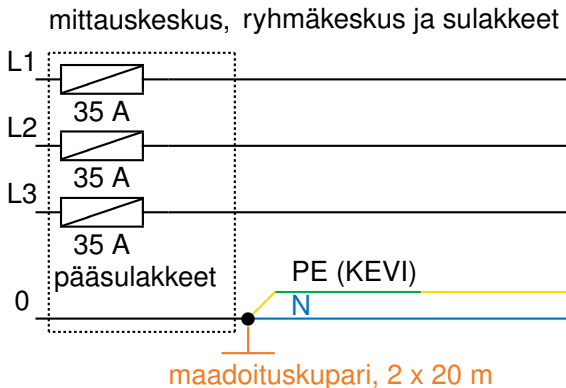
Maakaapeli ja maadoituskupari

Hehkulamppu ja moottorinkäynnistyskondensaattori (lisätty sivu)



Joka kodin sähköliittymä *Electricity at Home*

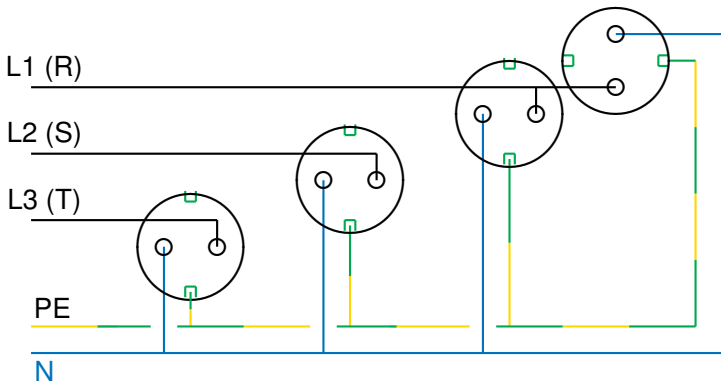
Tehokkain tapa säästää energiaa on lämmittää termostaatteja!



L1 = Line 1, PE = Potential Earth, KEVI = kelta-vihreä

Pistorasiat *Schuko Outlet* (*Schutzkontakt*)

Kahden pistorasian välillä voi olla 400 V jännite!

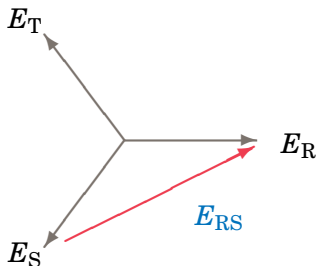


Suositus: nollajohdin kytketään pistorasiassa vasemmalle tai ylös.

Osoitindiagrammi *Phasor Diagram*

vrt. vektorien vähennyslasku vs. Kirchhoffin jännitelaki

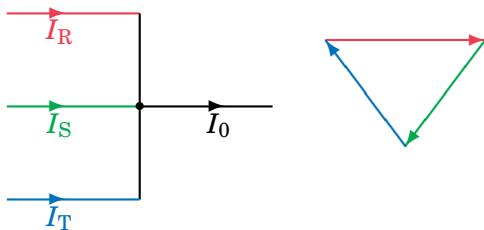
$$E_R = \frac{E_{RS}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \quad E_{RS} = \sqrt{3} E_R \angle 30^\circ$$



$$-E_S + E_R - E_{RS} = 0 \Rightarrow E_{RS} = E_R - E_S$$

Nollajohtimen virta *Neutral Wire Current* $I_0 = 0$

Vai onko sitä?



$$I_0 = I_R + I_S + I_T$$

$$I_0 = I\angle 0^\circ + I\angle -120^\circ + I\angle -240^\circ = 0$$

Kolmivaihejärjestelmän hetkellinen teho

on ajasta riippumaton vakio! *Constant Instantaneous Power*

$$u_R(t) = \sqrt{2}|U| \sin(\omega t + \phi_u)$$

$$i_R(t) = \sqrt{2}|I| \sin(\omega t + \phi_i)$$

$$u_S(t) = \sqrt{2}|U| \sin(\omega t + \phi_u - 120^\circ)$$

$$i_S(t) = \sqrt{2}|I| \sin(\omega t + \phi_i - 120^\circ)$$

$$u_T(t) = \sqrt{2}|U| \sin(\omega t + \phi_u - 240^\circ)$$

$$i_T(t) = \sqrt{2}|I| \sin(\omega t + \phi_i - 240^\circ)$$

$$p(t) = u_R(t)i_R(t) + u_S(t)i_S(t) + u_T(t)i_T(t) = 3|UI| \overbrace{\cos(\phi_u - \phi_i)}^{\phi=\varphi} \neq f(t)$$

Kolmivaihejärjestelmän teho *System Power Example*

Joka vaiheessa on **sama** kompleksinen teho!

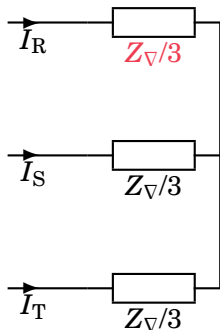
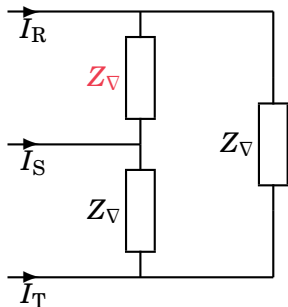
S :n ja Z :n kulma ei riipu jännitteen ja virran kulmista, vaan kyseisten kulmien erotuksesta ϕ , esim. $|U_V| = 120$ V, $|I_V| = 30$ A, $\phi = 30^\circ$:

$$\begin{aligned} S &= U_R I_R^* + U_S I_S^* + U_T I_T^* \\ &= (120 \angle 0^\circ) \cdot (30 \angle -30^\circ)^* \\ &\quad + (120 \angle -120^\circ) \cdot (30 \angle -150^\circ)^* \\ &\quad + (120 \angle -240^\circ) \cdot (30 \angle -270^\circ)^* \\ &\approx (120 + 0j)(26 + 15j) \\ &\quad + (-60 - 104j)(-26 + 15j) \\ &\quad + (-60 + 104j)(0 - 30j) \\ &\approx 3 \times 3120 + 3 \times 1800j \\ &= 3U_V I_V^* \end{aligned}$$

Kolmio-tähti-muunnos impedansseille ($\nabla \Rightarrow Y$)

Esim. molemmat kiukaat lämmittävät yhtä hyvin

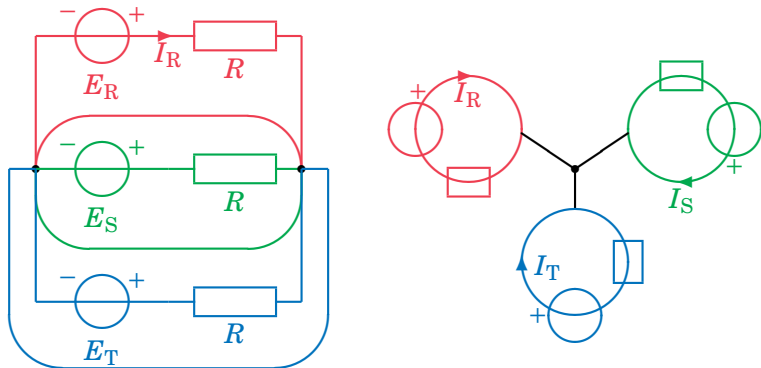
$$\frac{Z_{\nabla}}{3} = Z_Y \quad \frac{R_{\nabla}}{3} = R_Y \quad \frac{L_{\nabla}}{3} = L_Y \quad 3C_{\nabla} = C_Y$$



Yksivaiheinen sijaiskytkentä *1-Phase Equivalent*

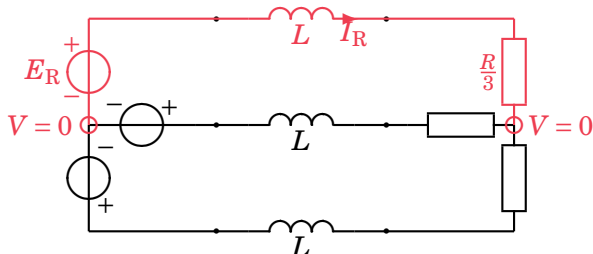
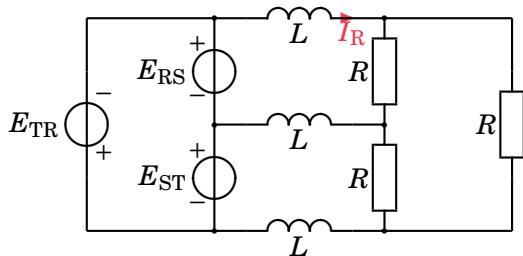
Muodostuu tähtikytkentäisestä verkosta, väreillä ei ole tässä yhteyttä käytäntöön

Nollapotentialissa olevat tähtipisteet voidaan yhdistää – käytännössä näin tehdäänkin:



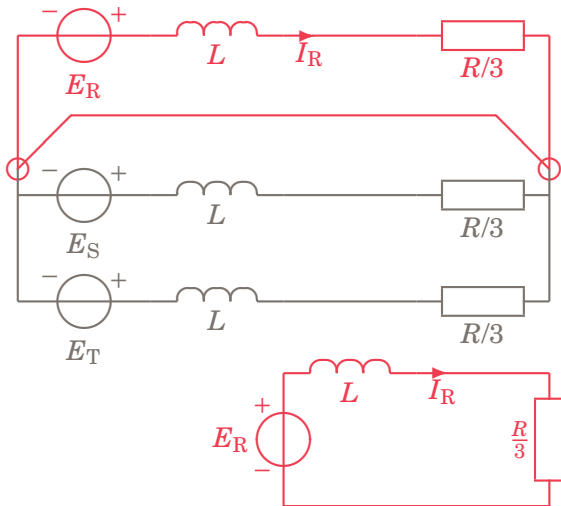
Muunnos: kolmiokytkentä → tähtikytkentä

R-vaihe on merkitty punaisella, renkaat ovat samassa potentiaalissa $V = 0$



Yksivaiheinen sijaiskytkentä 3-to-1 Phase

Vaiheiden edustajaksi arvottiin vaihe **R**; esim. I_R ei muutu piirimuunnoksessa!



Moottorit ja generaattorit; moottorityyppejä

Moottori toimii usein generaattorina, mutta ei aina

- ▶ Tasavirtakoneet. Kommutointi eli napaisuuden vaihto.
- ▶ Vaihtovirtakoneet. Toiminta on usein verrattavissa muuntajaan.
- ▶ Staattori indusoi roottoriin virran, joka muodostaa magneettikentän.
- ▶ Tahtikone: roottori pyörii samalla nopeudella kuin magneettikenttä (synkroninen nopeus n_s).
- ▶ Epätahtikone: roottori pyörii pienemmällä nopeudella kuin magneettikenttä (jättämä).
- ▶ Oikosulkumoottori on yleisin epätahtikone. Roottorin häkkikäänitys: urissa sauvat ja niiden päissä oikosulkurenkaat.
- ▶ Harjaton DC-moottori on pohjimmiltaan 3-vaiheinen AC-moottori, jonka ohjain toimii tasavirralla

Epätahtimoottorin pyörimisnopeus n , tahtinopeus n_s

3-vaihemoottorissa on vähintään 6 napaa ($p = 1$)

- ▶ Napapariluku p ; jokainen käämi(vyyhti) tuottaa magneettisen pohjois- ja etelänavan.
- ▶ Napaluku $2p$; napajako $\tau = 360^\circ/(2p)$
- ▶ Tahtinopeus $n_s = \frac{f}{p}$ eli magneettikentän pyörimisnopeus.
- ▶ Pyörimisnopeuden n säätö on mahdollista taajuusmuuttajalla tai napaparien määrän valinnalla (s on jättämä): $n = (1 - s)n_s$.

p	$n_s \left[rpm = \frac{1}{60s} \right]$	$n = (1 - s)n_s$, kun $s = 0,15$
1	3000	2550
2	1500	1275
3	1000	850
4	750	637,5
5	600	510
6	500	425

Jättämä s riippuu mekaanisesta kuormasta

vrt. laskuharjoitustehtävä 44

- ▶ Jättämä $s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Delta n}{n_s}$ (lausutaan usein prosentteina)
- ▶ Kuormitus vaikuttaa jättämään ja siten todelliseen pyörimisnopeuteen n .
- ▶ Tyhjäkäynnissä $s = 0$ eli $n \approx n_s$
- ▶ Mekaaninen kulmanopeus $\omega = 2\pi n = \frac{(1-s)\omega}{p}$ ($\omega = 2\pi f$)
- ▶ Käynnistysvirta on moninkertainen verrattuna jatkuvan tilan virtaan. Tähti–kolmio–käynnistin pienentää käynnistysvirtaa kertoimella $\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577$
- ▶ Moottorin hyötysuhde $\eta = \text{akseliteho} / \text{sähköteho}$
- ▶ Momentti = voima x säde

Tulossa ensi viikolla

- ▶ Neljäs passiivinen piirielin onkin siirtojohto!
- ▶ Sähkövirran aaltoluonne
- ▶ Harrastaako virta pintaliittoa?
- ▶ Mistä jännitelähde tietää, mitä johdon päähän on kytketty?
- ▶ Aallon kulku-aika ja heijastuminen
- ▶ Mitä erikoista on antenni- tai ethernet-kaapelissa?
- ▶ Mitä terminaattori puuhaa lapamadon kaa?

- ▶ Loppukurssi käsittelee tämän jälkeen elektroniikkaa