

Johdatus vetytalouteen

Luento 1

Sähköjärjestelmän rakenne ja tehonsiirto

Matti Lehtonen, Aalto-yliopisto

Siirto- ja jakeluverkoston periaatekaavio

Voimalaitos

- generaattori (10,5 kV, 20 kV)
- generaattorimuuntaja (20/400 kV)

Kaukovoimansiirto

- tehovälimuuntaja (400/220 kV)
- 400, 220 (ja 110) kV johdot
- kytkinasema (220 kV)
- muuntoasema (400/220 kV)

Suurjännitejakelu

- 110 kV johdot

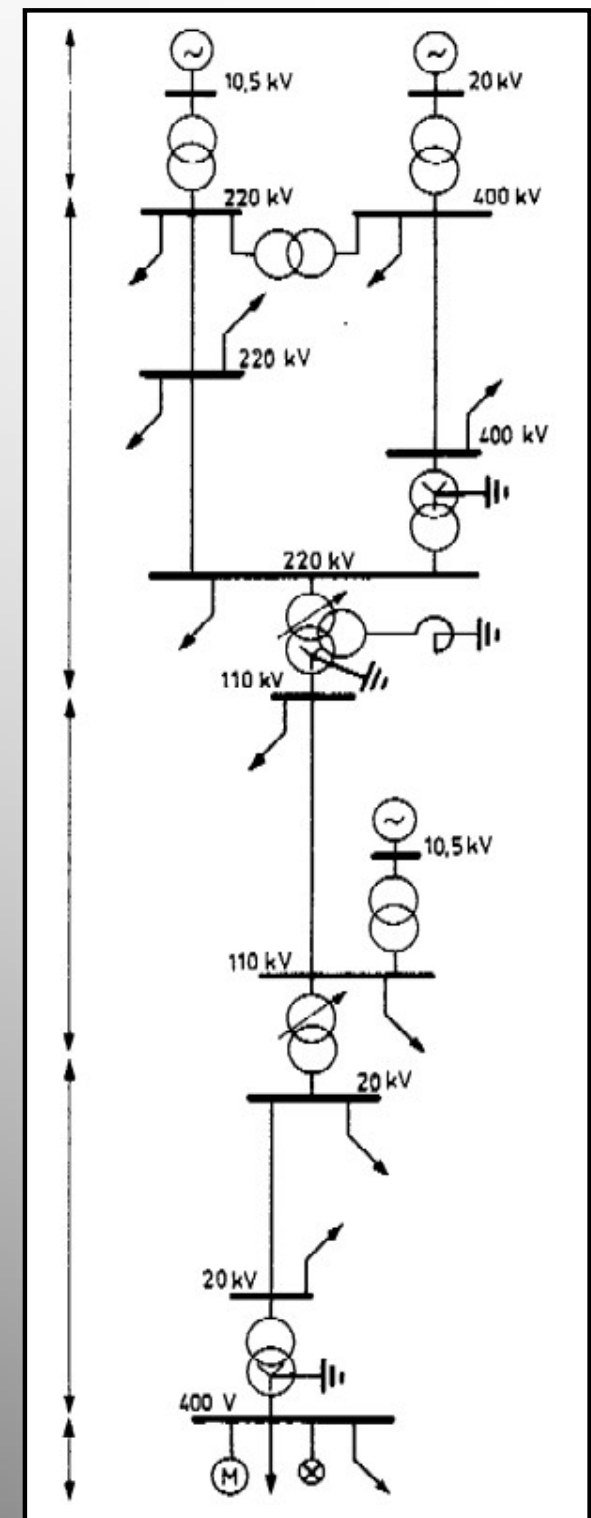
- syöttöasema (110/20 kV)

Keskijännite- (välijännite-)jakelu

- 20 kV johdot

Pienjännitejakelu

- 0,4 kV johdot ja kuluttajat



Pohjoismainen yhteis- käyttöverkko



Nordel

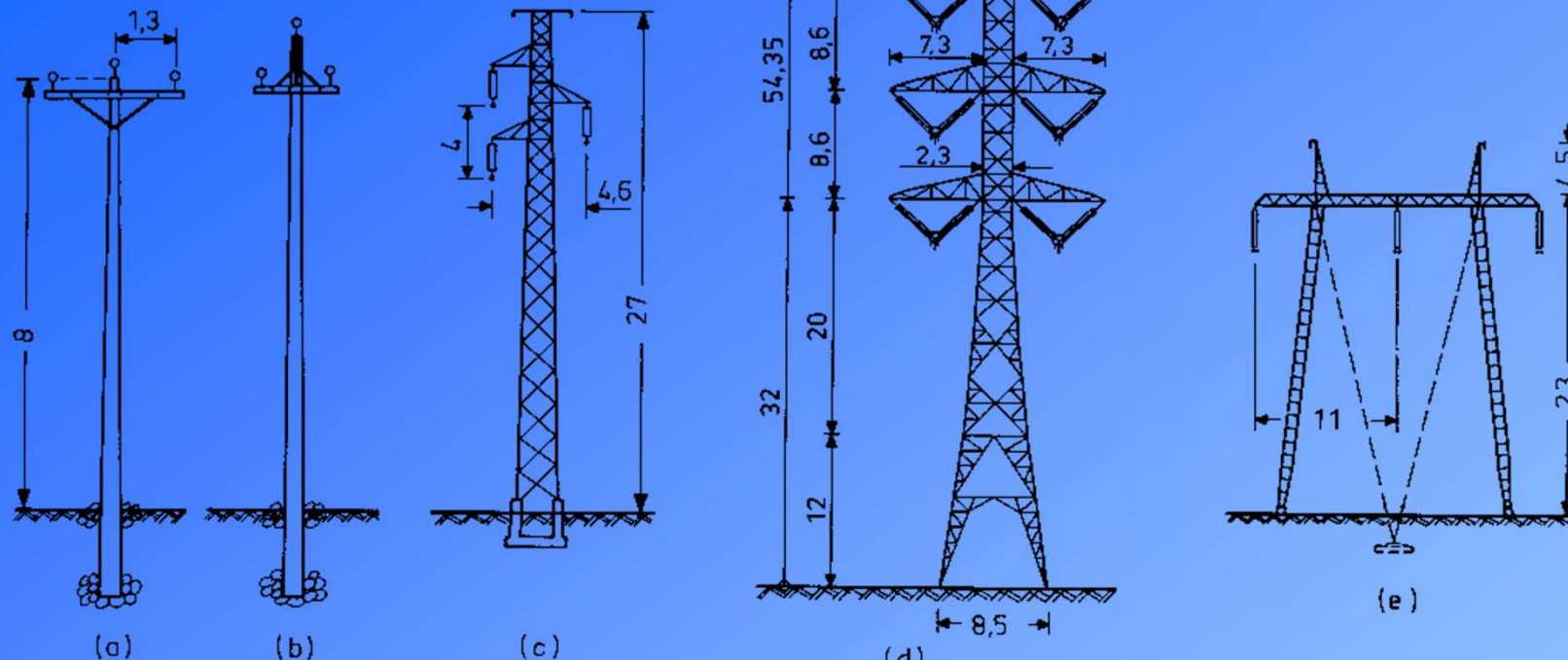
Suurjänniteilmalinjat

Suomessa voimajohdot rakennetaan tavallisesti käyttäen harustettuja pylviä; 400 kV johdoilla teräspylviä ja 110 kV johdoilla myös puupylviä. Vapaasti seisovia ristikkopylviä käytetään kaupunkialueilla. Vanhimmat johdot on rakennettu 1920-luvunlopulla ja ne ovat yhä käytössä.

110 kilovoltin – 400 kilovoltin johtoja käytetään Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin valtakunnallisissa voimansiirtoverkoissa sekä 110 kV johtoja jossain määrin myös alueellisessa voimansiirrossa.

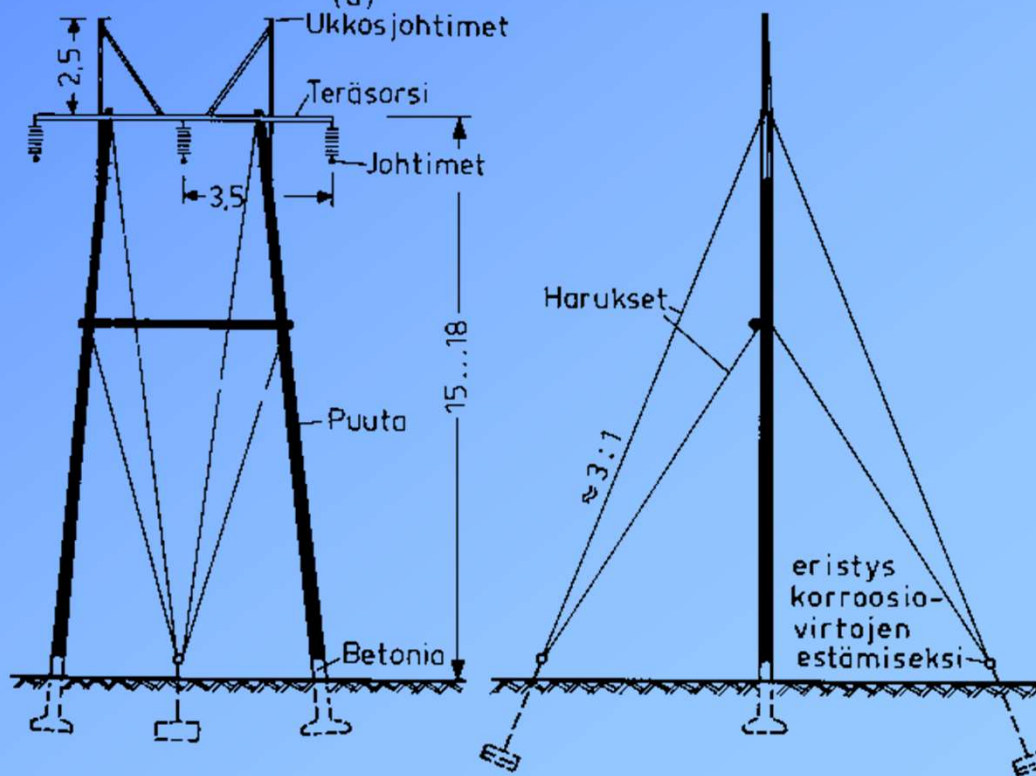


Avojohtdot

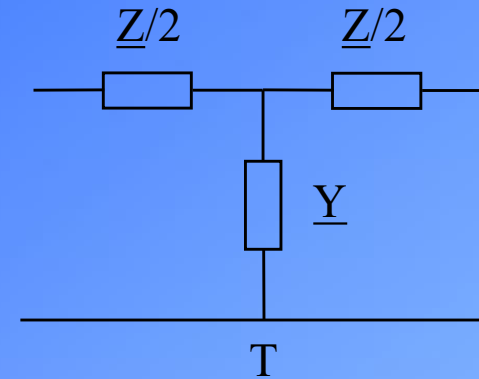
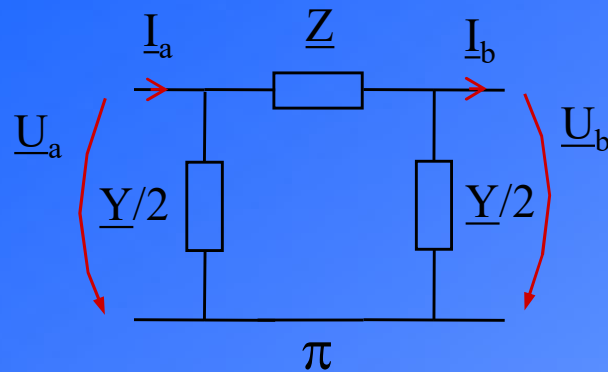


- a) ja b) 20 kV puupylväitä
- c) vapaasti seisova 110 kV pylväs I-ketjuin
- d) vapaasti seisova 440 kV metallipylväs V-ketjuin
- e) 400 kV harustettu metallipylväs

110 kV harustettu puupylväs



Johdot



$$\underline{Z} = (r + j\omega l) s$$

$$\underline{Y} = (g + j\omega c) s$$

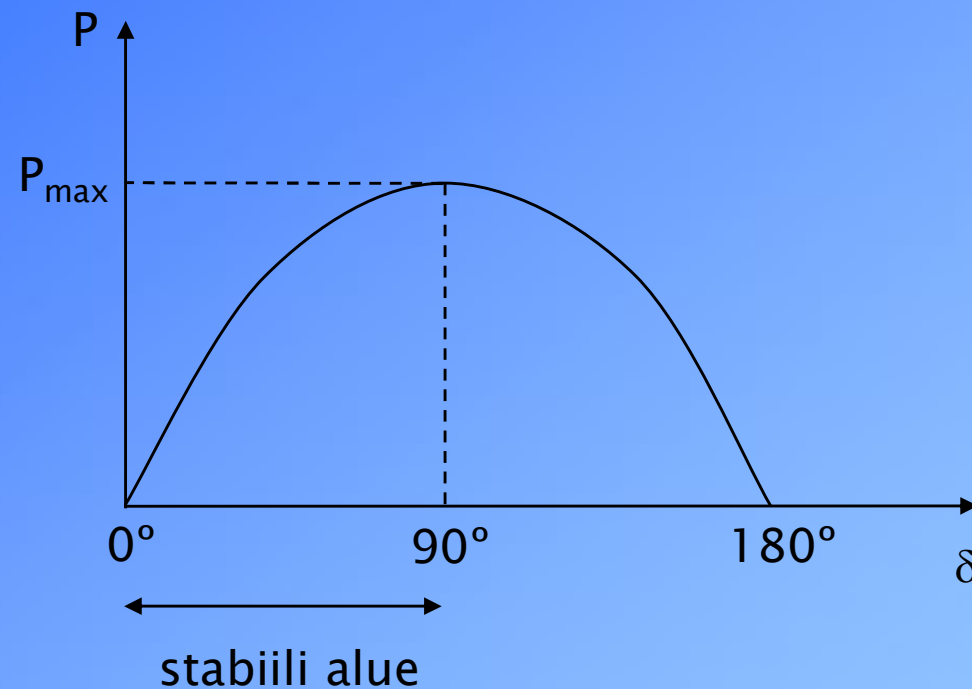
$$\left\{ \begin{array}{l} s = \text{pituus} \\ r = \text{resistanssi} / s \\ l = \text{induktanssi} / s \\ g = \text{konduktanssi} / s \\ c = \text{kapasitanssi} / s \end{array} \right.$$

Suurjännitteisillä johdoilla reaktanssi $X = \omega L$ dominoi pitkittäisimpedanssia ja susceptanssi $B = \omega C$ dominoi poikittaisadmittanssia

Tehonsiirto siirtojohdolla – Tehokulmayhtälö

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta$$

U1 = alkupään jännite
U2 = loppupään jännite
U1, U2 välinen kulma = δ
X = johdon reaktanssi



Staattisen stabiilisuuden rajateho

Tehonsiirto siirtojohdolla – esimerkki

Maksimi teoreettinen siirtoteho 500 km mittaisella 400 kV johdolla, kun johdon reaktanssi on 0,4 Ω/km (= 200 Ω)

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta = \frac{400^2}{200} \sin 90^\circ \text{ MW} = 800 \text{ MW}$$

Käytännössä kulma δ joudutaan rajoittamaan noin 45 asteeseen jolloin maksimiteho on noin 565 MW

Johdon reaktanssi/m saadaan $X=\omega L=2\pi fL=100\pi L$

Induktanssi/m (L) saadaan oheisesta yhtälöstä, jossa

d =vaiheiden keskietäisyys, r =johtimen säde

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r} \right]$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Jakeluverkon rakenne

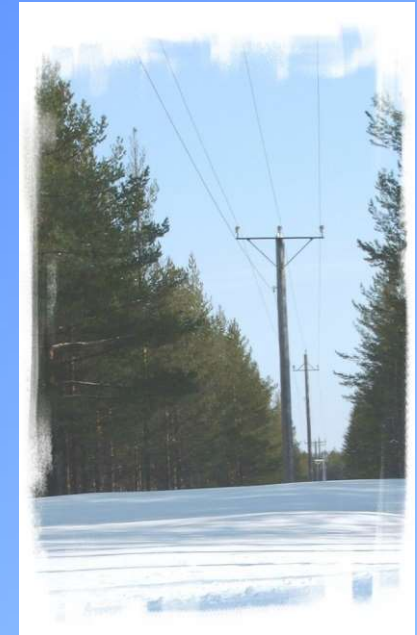
Keskijänniteverkko (1/3)

- 3-vaiheinen, 20 kV
 - ei nollajohdinta
- silmukoitu, käytetään säteittäisenä
 - erottimet, osassa kauko-ohjaus
 - korvausmahdollisuudet vikatilanteissa
- maasta erotettu tai sammutettu (kompensoitu)
- suojaus releillä + katkaisijoilla
- tyypillinen siirtomatka 20...30 km (Lapissa jopa 100 km)
- tyypillinen siirtoteho muutamia megawatteja

Jakeluverkon rakenne

•Keskijänniteverkko (2/3)

- Ilmajohdot
 - teräsalumiinijohtimet 25...201 mm²
 - hinta 10...20 k€/km
- Päällystetyt ilmajohdot, PAS-johdot
 - ohut eristys pinnassa - ei täyttä jännitekestoisuutta
 - kapeampi johtokatu; usein kaksois- tai kolmoisjohtona
 - 20...30 % kalliimpi kuin vastaava avojohto



Jakeluverkon rakenne

Keskijänniteverkko (3/3)

- Maakaapelit
 - täysi eristyskyky, muovieristys
 - poikkipinnat 120...240 mm²
 - hinta 30...50 k€/km kaivuolosuhteista riippuen
 - trendinä mm. Tanskassa ja Ruotsissa
- Keskijänniteilmakaapeli SAXKA - vähän käytetty



Maakaapeli



Keskijänniteilmakaapeli

400/1000 voltin riippukierrejohto (AMKA)

- AMKA -johto on ns. riippukierrejohto, ja se muodostuu mustalla muovilla eristetyistä vaihejohtimista, jotka on kierretty kannatusköytenä toimivan paljaan metalliköyden ympärille. Kannatusköysi toimii samalla nolla- ja maadoitusjohtimena (PEN-johdin). Johto on ripustettu puupylväisiin kiinnitettyjen kannattimien varaan. Johtoa käytetään pääasiassa taajamien ulkopuolella jakeluverkoissa sekä katujen, teiden ja lenkkipolkujen tms. valaistusverkoissa.
- Johdon korkeus maasta on yleensä vähintään 4 metriä ja tiestä 5,5 metriä



NIMELLISJÄNNITE

$U_0/U = 0,6/1 \text{ kV}$

Johtimen suurin sallittu lämpötila

- jatkuvassa käytössä	+70°C
- oikosulussa (enintään 5 s)	+135°C
Alin suositeltu käsittelylämpötila	-20°C



Vaihemerkinnät

Johtojen siirtokapasiteetti

- Tehokulma rajoittaa tehonsiirtokykyä pitkillä suurjännitteisillä siirtojohdoilla
- Lyhyillä johdoilla ja jakeluverkoissa siirtokyvyn määrää joko terminen kuormitettavuus (= maksimi virta) tai johdon resistanssissa ja reaktanssissa tapahtuva jännitteenalennema ($\max \Delta U$)

Esimerkki: kaapelin siirtokyky

Kaapelille on määritelty maksimivirta (A), jonka se kussakin asennusolosuhteessa kestää lämpenemättä liikaa (terminen raja)

Esimerkiksi, jos 20 kV kaapelin maksimivirta on 200 A ja kuorman tehokerroin $\cos\phi=0.9$ on maksimi teho vastaavasti:

$$P_{max} = \sqrt{3} UI \cos \phi = \sqrt{3} 20 \text{ kV} 200 \text{ A} 0.9 = 6235 \text{ kW} \sim 6.2 \text{ MW}$$

Huomaa: U = pääjännite & I = vaihevirta

Vaihejännitteillä: (vaihejännite =pääjännite/ $\sqrt{3}$ = $20/\sqrt{3}$ kV)

$$P_{max} = 3 UI \cos \phi = 3 \frac{20}{\sqrt{3}} \text{ kV} 200 \text{ A} 0.9 = 6235 \text{ kW} \sim 6.2 \text{ MW}$$

Esimerkki – keskijännitteisen avojohdon siirtokyky

Pitkillä KJ-avojohdoilla siirtokyvyn määrää jännitteenalennus: $\Delta U = |U_1| - |U_2|$
jonka likiarvo voidaan laskea pitkittäiskomponenttina $\Delta U = RI_p + XI_q$

Missä R ja X on johdon resistanssi ja reaktanssi, I_p ja I_q on päto- ja loisvirta.

Esimerkki: 40 km 20 kV johdon impedanssi on $0,3 + j0,3 \Omega/\text{km}$. Johto syöttää 1 MW kuormaa jonka tehokerroin ($\cos\phi$) on 0,9. Mikä on jännitteenalennus.

Pätovirta: $P = \sqrt{3} UI_p \Leftrightarrow I_p = 28,9 \text{ A}$

Loisteho $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ & $S = P/\cos\phi \Leftrightarrow Q = 0,484 \text{ Mvar}$

Loisvirta: $Q = \sqrt{3} UI_q \Leftrightarrow I_q = 14 \text{ A}$

Johdon impedanssi $Z = R + jX = s(r + jl) = 40(0,3 + j0,3) = 12 + j12\Omega$

$\Delta U = RI_p + XI_q = 12 \times 28,9 + 12 \times 14 \text{ V} = 515 \text{ V}$ ($\sim 4,5\%$ vaihejännitteestä)

20 kV verkon vaihejännite = $20/\sqrt{3} \text{ kV} \sim 11,5 \text{ kV}$

Tehomuuntajat

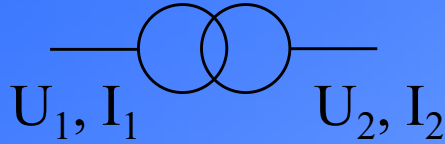
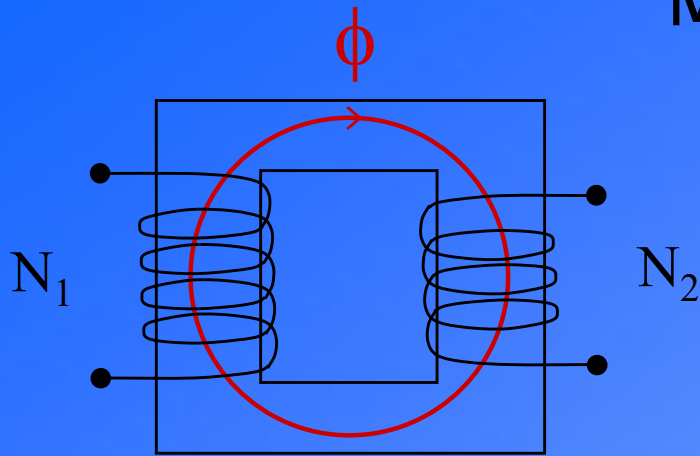
Muuntajan varusteet:

- läpivientieristeimet
- öljyn jäähdyttimet
- käämikytkin
- paisuntasäiliö
- suoja- ja valvontalaitteet



110 kV sähköaseman muuntaja

Muuntajan toiminta



Kierrosjännite sama

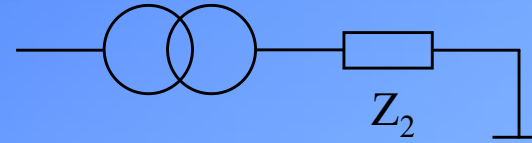
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Teho säilyy

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 = \sqrt{3} U_1 I_1$$

$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Toisios impedance Z_2 ensiöstä nähtynä ?

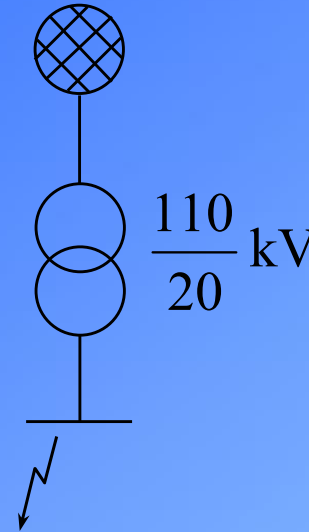
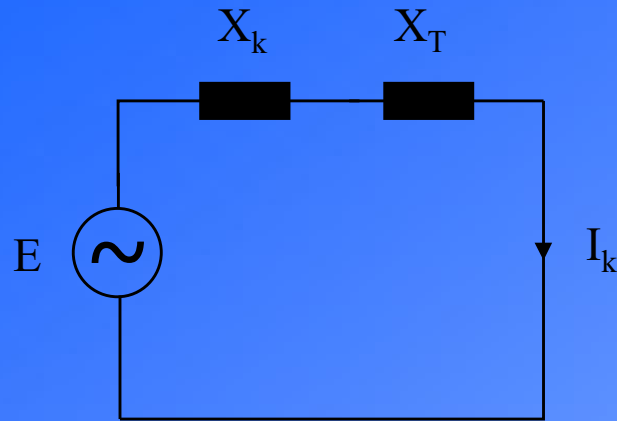


toisiossa $Z_2 = \frac{U_2}{I_2}$

ensiössä $Z_2' = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2}}{I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_2$

tavallisesti merkitään $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$

Esimerkki: Oikosulkuvirta sähköaseman kiskossa



$S_k = 1000$ MVA
verkon oikosulkuteho

$U_k = 10\%$
Muuntajan impedanssi(%) ja
Nimellisteho $S_N = 20$ MVA

$$X_k = \frac{U_1^2}{S_k} = \frac{110^2}{1000} = 12,1 \Omega \quad (110 \text{ kV})$$

$$X_T = u_k \frac{U_2^2}{S_N} = 0,1 \cdot \frac{20^2}{20} = 2 \Omega \quad (20 \text{ kV})$$

X_k on siirtoverkon reaktanssi

X_T on muuntajan oikosulkureaktanssi

*Koska nämä on määritelty eri jännitteelle
redusoidaan muuntajan toiselle puolelle*

20 kV tasossa $E = \frac{U_2}{\sqrt{3}}$

$$I_{k_2} = \frac{U_2}{\sqrt{3}(X_k' + X_T)} = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}\left(\left(\frac{20}{110}\right)^2 \cdot 12,1 + 2\right) \Omega} = \underline{\underline{4,81 \text{ kA}}}$$

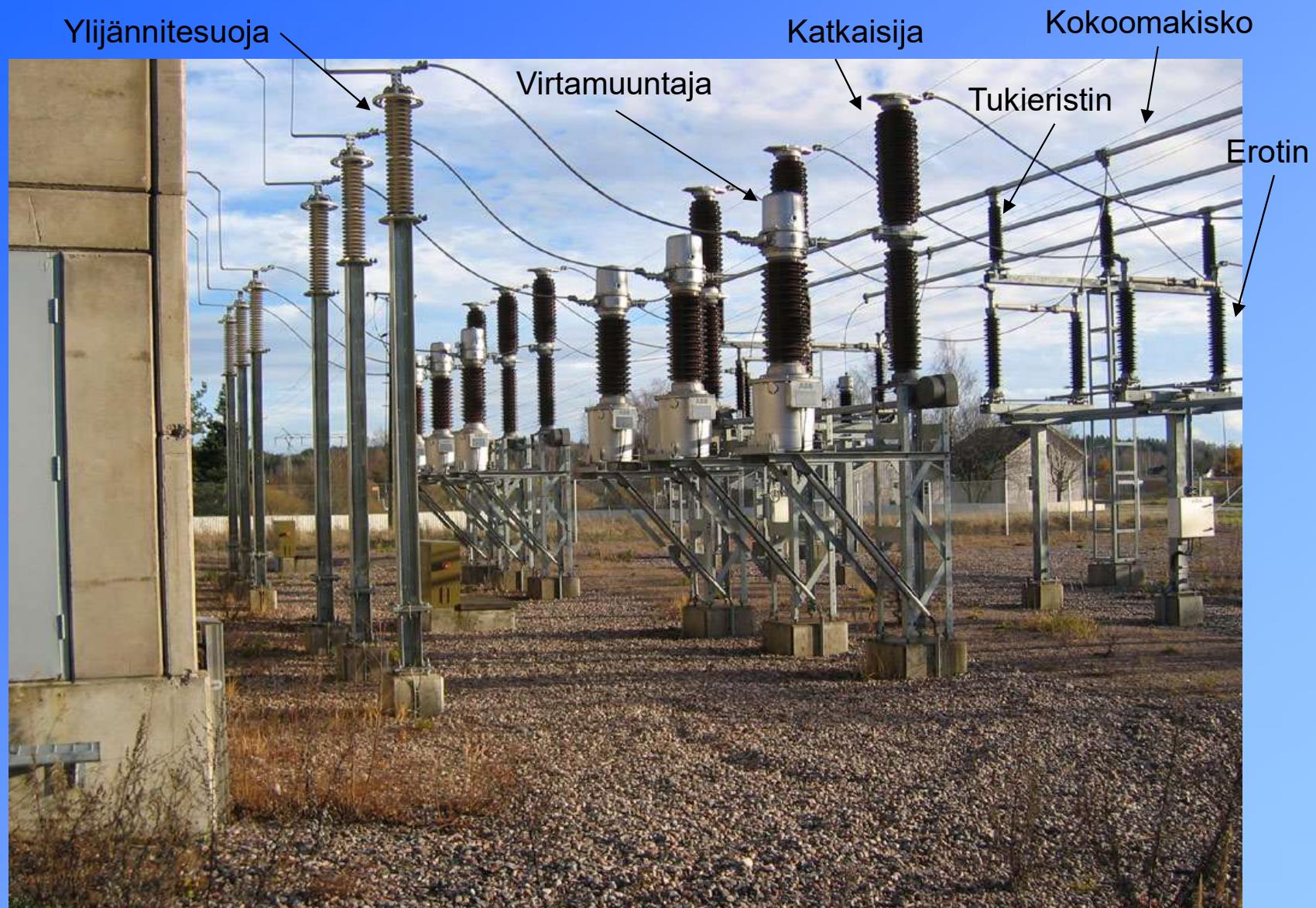
110 kV tasossa $E = \frac{U_1}{\sqrt{3}}$

$$I_{k_1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}(X_k + X_T')} = \frac{110 \text{ kV}}{\sqrt{3}\left(12,1 + \left(\frac{110}{20}\right)^2 \cdot 2\right) \Omega} = \underline{\underline{0,875 \text{ kA}}}$$

tarkistus:

$$I_{k_1} = \frac{U_{2n}}{U_{1n}} I_{k_2} = \frac{20}{110} \cdot 4,81 \text{ kA} = 0,875 \text{ kA}$$

Kytkinasemalaitteet



Kytkinasemalaitteet

110kV katkaisijat

Virtamuuntajat

Ylijännitesuojat

Muuntajan läpivientieristimet



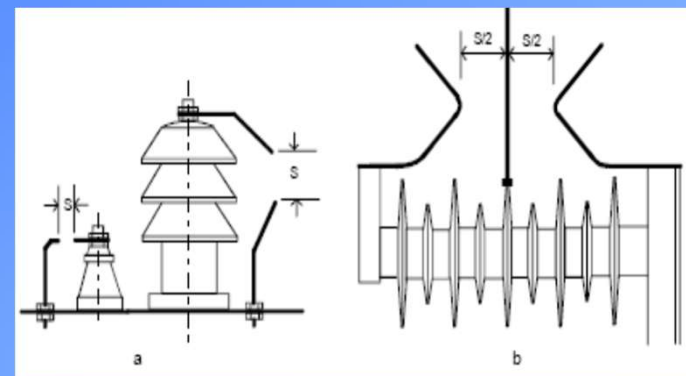
Kytkinasemalaitteet



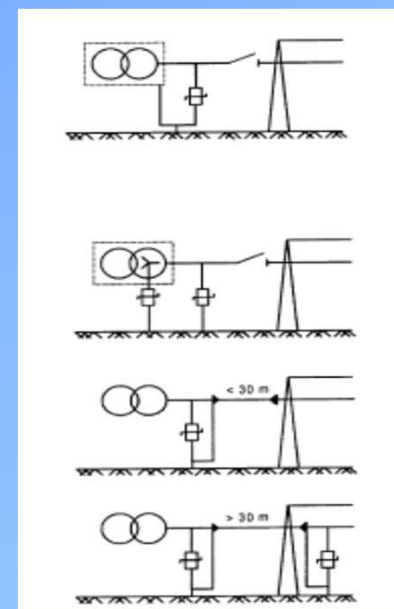
Ylijännitesuojat

- **Ylijännitesuojat (kipinäväli tai metallioksidisuoja)**

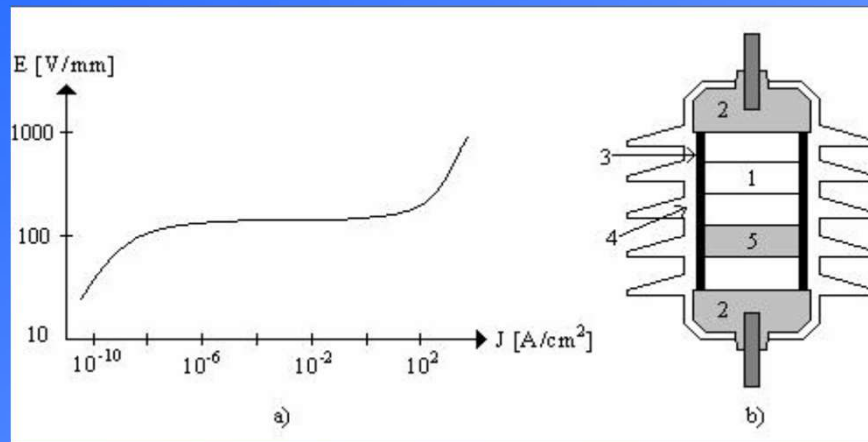
- Rajoitetaan laitoksen mitoituksen ylittävät jännitteet
- Käyttö: tehomuuntajat, kaapelipäätteet, generaattorit
- Ilmaeristeisen ja kiinteällä eristyksellä eristetyn komponentin rajapinnassa
- Suojelee kiinteää eristystä läpilyönniltä



a) yksivälisuoja, b) lintuestein varustettu kaksivälisuoja.



Venttiilisuojat



Metallioksidisuojan tyypillinen ominaiskäyrä (kuva a) ja venttiilisuojan rakenne (kuva b)
1 = metallioksidilieriö, 2 = päätelektrodit, 3 = metallinen tukisylinteri, 4 = kuorimateriaali,
5 = metallinen välilevy.

Venttiilisuoja siirtyy ylijännitteellä johtavaksi ja siirtää ylijännitepulssein maahan
Suoja palautuu ylijännitteen mentyä ohi takaisin eristävään tilaan
Venttiilisuoja toimii vain lyhytaikaisilla ylijännitteillä (salamat)

Jakeluverkon rakenne

Jakelumuuntamo

- 20 kV johdon ja muuntajan välissä yleensä erotin
 - ylijännitesuoja tai suojakipinäväli
- Muuntamorakenne + muuntaja
 - ilmajohdoissa pylväsmuuntamo, 1- tai 2-pylväsrakenne
 - kaapeliverkoissa puisto- tai kiinteistömuuntamo
- Pienjännitekeskus
 - pylväsmuuntamossa pylväsvarokekotelot
 - puistomuuntamossa 'oikea' keskus
- Muuntajan runko on suojamaadoitettu

