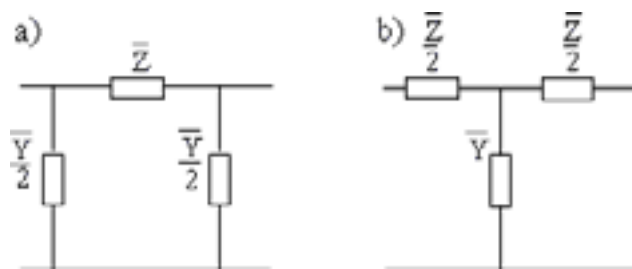


4 SÄHKÖVERKKOJEN LASKENTAA

Sähköverkkoja suunniteltaessa joudutaan tekemään erilaisia verkon tilaa kuvaavia laskelmia. Vaikka laskelmat tehdäänkin nykyaikana pääsääntöisesti tietokoneilla, suunnittelijoiden on kuitenkin hallittava peruslaskentatapausten teoria.

4.1 Sähköverkon sijaiskytkennät

Sähköverkkojen laskentaa varten verkon komponentit on kuvattava likimääräisellä sijaiskytkennällä. Alle 200 km pitkille voimansiirtojohdoille käytetään π - tai T-sijaiskytkentää (kuva 4.1).



Kuva 4.1 Sähköjohdon a) π - ja b) T-sijaiskytkennät.

$$(4.1) \quad \bar{Z} = (r + j\omega l)s = (r + jx)s = R + jX$$

$$(4.2) \quad \bar{Y} = (g + j\omega c)s = (g + jb)s = G + jB$$

missä

r on johdon resistanssi pituusyksikköä kohti [Ω/m]

l on johdon induktanssi pituusyksikköä kohti [H/m]

x on johdon reaktanssi pituusyksikköä kohti [Ω/m]

\bar{Z} on johdon kokonaisimpedanssi [Ω]

R on johdon kokonaisresistanssi [Ω]

X on johdon kokonaisreaktanssi [Ω]

s on johdon pituus [m]

ω on kulmataajuus [$1/s$]

c on johdon kapasitanssi pituusyksikköä kohti [F/m]

g on johdon konduktanssi pituusyksikköä kohti [S/m]

b on johdon susceptanssi pituusyksikköä kohti [S/m]

\bar{Y} on johdon kokonaisadmittanssi [S]

G on johdon kokonaiskonduktanssi [S]

B on johdon kokonaissusceptanssi [S].

Konduktanssi voidaan jättää huomioimatta, jos johdon nimellisjännite on pienempi kuin 220 kV. Alle 45 kV jännitteisillä avojohdoilla voidaan myös kapasitanssi jättää huomioimatta. Vähintään 110 kV jännitteisellä avojohdolla sijaiskytkennässä käytetään usein vain pelkkää reaktanssia, sillä suurjännitejohdon reaktanssi on huomattavasti suurempi kuin sen resistanssi. Pienjännitejohdoilla, joilla jännite on 400 V tai pienempi, tilanne on päinvastainen ja sijaiskytkennässä voidaan käyttää pelkkää resistanssia. Kaapeleilla voidaan käyttää samanlaista sijaiskytkentää kuin avojohdoilla. Kaapeleiden ominaisarvot poikkeavat kuitenkin huomattavasti avojohtojen arvoista.

Sähköverkkojen laskennassa muuntaja kuvataan sijaiskytkennässä yleensä oikosulkuimpedanssilla Z_k . Se muodostuu muuntajan oikosulkuresistanssista ja -reaktanssista eli

$$(4.3) \quad \bar{Z}_k = R_k + jX_k$$

Taulukoissa ilmoitetaan muuntajalle tavallisesti nimellisteho S_n , nimellisjännitteet U_n ja oikosulkujännite u_k tai z_k . Sille ilmoitetaan erikseen resistiivinen osa u_r ja reaktiivinen osa u_x . Arvot ilmoitetaan tavallisesti suhteellisenä arvona tai prosentteina muuntajakäänin nimellisjännitteestä. Ilmoitettujen suureiden perusteella oikosulkuresistanssin ja -reaktanssin arvot voidaan laskea yhtälöistä:

$$(4.4) \quad R_k = u_r \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$(4.5) \quad X_k = u_x \frac{U_n^2}{S_n}$$

Generaattorin resistanssi jätetään usein huomioimatta ja generaattori kuvataan pitkittäisellä tahtireaktanssillaan X_d . Tahtireaktanssi ilmoitetaan yleensä suhteellisenä arvona x_d . Vertailukohtana käytetään tahtigeneraattorin vaiheen nimellisreaktanssia. Tahtireaktanssin X_d arvo saadaan laskettua

$$(4.6) \quad X_d = x_d \frac{U_n^2}{S_n}$$

4.2 Redusointi

Sähköverkkoja laskettaessa on huomioitava, että kaikkia tarkasteltavia suureita on käsiteltävä samassa jänniteportaassa. Kun on valittu jokin jänniteporras, on muiden jänniteportaiden suuret redusoitava valittuun jänniteportaaseen. Laskujen suorittamisen jälkeen redusoidun verkon osat voidaan palauttaa alkuperäisiin jännitteisiin uudelleen

reduoimalla. Redusoidun suureen merkkinä käytetään heittomerkkiä. Jännitteet redusoidaan kertomalla ne muuntajan muuntosuhteella.

$$(4.7) \quad \bar{U}_2' = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}}\right)\bar{U}_2$$

Virrat redusoidaan kertomalla ne muuntosuhteen käänteisarvolla.

$$(4.8) \quad \bar{I}_2' = \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}}\right)\bar{I}_2$$

Impedanssit redusoidaan kertomalla ne muuntosuhteen neliöllä.

$$(4.9) \quad \bar{Z}_2' = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}}\right)^2 \bar{Z}_2$$

4.3 Jännitteenalenema

Kuormitusvirran I kulkiessa johtimessa syntyy sen impedanssissa jännitteenalenema. Tämän seurauksena jännite johdon loppupäässä on pienempi kuin sen alkupäässä. Jännitteenalenema on näiden jännitteiden erotus. Jännitteenalenemalla on suuri merkitys verkkoja mitoittaessa. Jännitteenalenema ilmoitetaan usein prosentuaalisena arvona. Hyvän sähkön laadun takaamiseksi sen tulisi olla siirtojohdoilla 5 - 15 %, maaseudun keskijännitejohdoilla 5 - 10%, taajamien keskijännitejohdoilla 0,5 - 2 %, maaseudun pienjännitejohdoilla 5 - 10 % ja taajamien pienjännitejohdoilla 2 - 3 %. /1/

Kuvan 4.2 tapauksessa johdon loppupäässä on kuorma, jonka ottama pätöteho on P ja tehokerroin on $\cos \varphi$ Käytännön laskelmia varten riittävän tarkka likimääräinen jännitteenalenema saadaan yhtälöstä:

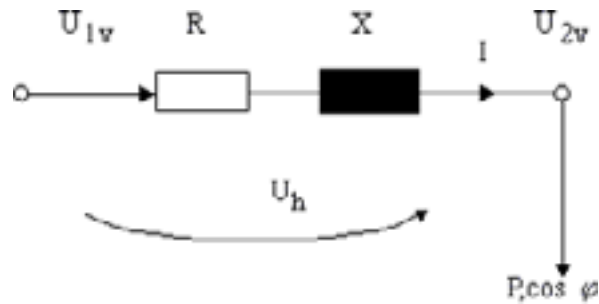
$$(4.10) \quad U_h' = \sqrt{3}(IR\cos\varphi + IX\sin\varphi) + \sqrt{3}(I_p R + I_q X)$$

missä

I_p on kuormitusvirran pätökomponentti

I_q on kuormitusvirran loiskomponentti

Kertoimen 3 ansiosta tulos saadaan pääjännitteenä. Lisäksi on huomioitava, miten kuormitus on jakautunut johdolle. Esimerkiksi jännitteenalenema on tasaisesti johdon varrelle jakautuneen kuormituksen tapauksessa puolet sellaisesta tapauksesta, jossa sama kokonaiskuormitus sijaitsisi kokonaan johdon loppupäässä.



Kuva 4.2 Jännitteenaleneman laskeminen.

4.4 Häviöt

Sähköjohdoilla syntyy kuormitus-, vuoto- ja koronahäviöitä. Kuormitushäviöt ovat johdossa kulkevan kuormitusvirran aiheuttamia virtalämpöhäviöitä. Kolmivaihejohdon virtahäviöiden teho eli pätötehohäviöt saadaan yhtälöstä:

$$(4.11) \quad P_h = 3I^2R$$

Loistehohäviöt saadaan yhtälöstä:

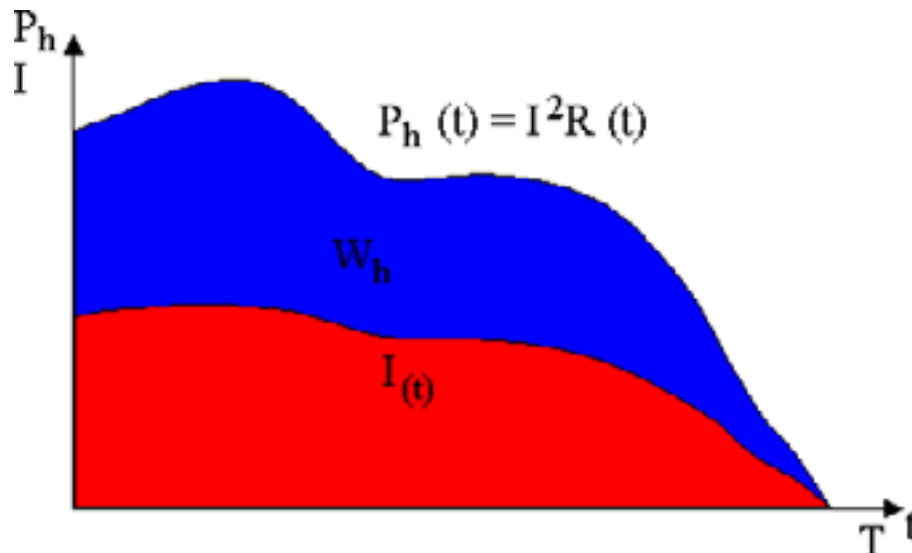
$$(4.12) \quad Q_h = 3I^2X$$

Kuormituksen mukaan vaihtelevien pätötehohäviöiden aiheuttama häviöenergia W_h saadaan integraalista:

$$(4.13) \quad W_h = \int_0^T P_h dt$$

missä T on vuoden pituus 8760 h.

Häviötehon P_h vaihtelua ajan funktiona ei kuitenkaan yleensä voida esittää matemaattisena lausekkeena. Vuotuinen häviöenergia voidaan määrittää esim. graafisesti kuvan 4.3 mukaisesti, kun kuormitusvirran ja pätötehohäviöiden pysyvyyskäyrät tunnetaan.



Kuva 4.3 Häviöenergian määrittäminen graafisesti. /1/

4.5 Sähköverkkojen laskenta käytännössä

Silmukoituna käytettävien siirtoverkkojen laskelmat ovat yleensä hankalia ja monimutkaisia. Käytännössä laskelmat tehdään aina tietokoneella. Laskelmia tarvitaan verkon suunnitteluvaiheessa sekä jo olemassaolevan verkon tilan tarkkailussa. Kuormitusten jakautuminen silmukoidun verkon eri haaroille selvitetään tehonjakolaskennalla. Laskennan lähtötietoina ovat solmupisteiden pätö- ja loistehot sekä generaattoreiden pätötehot ja jännitteiden itseisarvot. Solmupisteiden jännitteiden itseisarvot ja kulmat ratkaistaan iteroimalla Kirchoffin I. lain mukaisesta yhtälöryhmästä. Tämän jälkeen jokaisen johtohaaran virrat ja häviöt lasketaan Ohmin lain avulla. Vikavirtalaskennassa hankalin tehtävä on määrittää verkon impedanssi vikakohdasta laskettuna eli ns. Thevenin'in impedanssi. Silmukkaverkoissa vikavirralla on useita kulkureittejä, jolloin verkon impedansseista muodostuu monimutkaisia sarja- ja rinnankytkentöjä. Tehtävä voidaan ratkaista ns. solmupisteimpedanssimatriisin avulla.

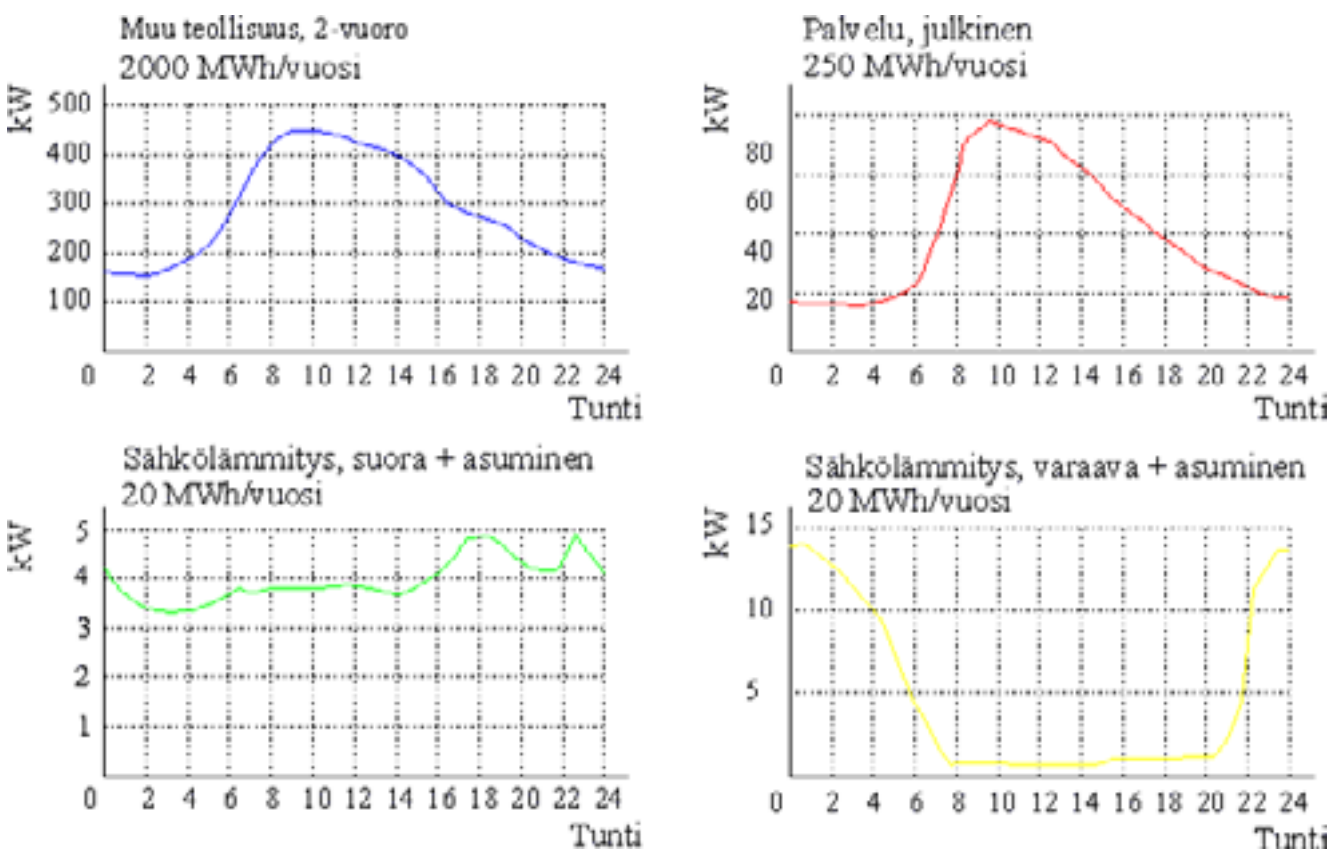
Siirtoverkoissa on huolehdittava järjestelmän stabiilisuudesta. Normaalisissa käyttötilanteissa kaikki verkkoon kytketyt generaattorit pyörivät samalla sähköisellä kulmanopeudella eli ne ovat tahdissa ja verkon tila on stabiili. Häiriötilanteissa saattaa yksi tai useampi generaattori joutua epätahtiin, mistä aiheutuu suuria häiriövirtoja. Jos generaattori putoaa tahdistista hitaasti generaattorin ja verkon keskinäisten suhteiden muuttuessa, puhutaan staattisen stabiilisuuden katoamisesta. Nopeiden häiriötilojen, kuten oikosulun yhteydessä puhutaan dynaamisesta stabiilisuudesta. Stabiilisuushäiriö leviää helposti koko maata käsittäväksi, joten sen estäminen on tärkeä asia verkkoa suunniteltaessa ja käytettäessä.

Jakeluverkkojen laskelmat ovat tavallisesti siirtoverkkojen laskelmia huomattavasti yksinkertaisempia. Tämä johtuu jakeluverkkojen säteittäisestä käyttötavasta, jolloin

virralla on ainoastaan yksi kulkutie. Jakeluverkkojen suuren määrän vuoksi laskelmat tehdään kuitenkin nykyaikana pääsääntöisesti tietokoneilla sähköyhtiön tietojärjestelmien avulla.

Verkkotietojärjestelmä (VTJ) sisältää verkon käsittelyyn tarvittavat toiminnot sekä tietokannan, joka sisältää yksityiskohtaiset teknilliset tiedot sähköasemilta, muuntamoilta sekä keski- ja pienjänniteverkosta. Järjestelmän tehtäviin kuuluvat verkkotietojen ylläpito, sähköjakeluverkon seurantalaskenta ja suunnittelu. Nykyaikaiset verkkotietojärjestelmät perustuvat graafiseen käyttöliittymään. Verkkotietojen ylläpidossa käytetään yleensä CAD-työkalua, johon liitettyllä digitointilaitteella tiedot syötetään tietokantaan.

Verkon seurantalaskennassa lasketaan verkon eri osien maksimitehot ja -virrat, teho- ja energiahäviöt, jännitteenalenemat ja vikavirrat. Siinä voidaan tarkastaa myös relesuojauksen toimivuus. Erityisesti kiinnostaa huipputeho, koska se on yleensä määräävä tekijä verkon komponentteja mitoitettaessa. Huipputehot saadaan muuntamalla ne asiakkaiden vuosienenergiaista, jotka tiedetään, sillä sähköyhtiöiden laskutus perustuu niihin. Uusimmissa järjestelmissä energia/teho-muunnos perustuu kuluttajaryhmäkohtaisiin kuormituskäyriin. Yksi mahdollinen kuluttajaryhmäjako on kotitalous, maatalous, sähkölämmitys, jalostus, palvelu ja loma-asutus /2/. Kuvassa 4.4 on esitetty neljän kuluttajaryhmän kuormituskäyrät.



Kuva 4.4 Esimerkki kuormituskäyristä /2/.

Vanhemmissa järjestelmissä huipputehon laskeminen perustuu Velanderin kaavaan.

$$(4.14) \quad \frac{P_{\max}}{\text{kW}} = k_1 \frac{W}{\text{MWh}} + k_2 \sqrt{\frac{W}{\text{MWh}}}$$

Siinä W on vuosienergia ja k_1 sekä k_2 ovat Velanderin kaavan kertoimia, jotka on saatu käytännön kokemuksen ja mittausten perusteella. Esim. kotitalouskuluttajille k_1 on 0,29 ja k_2 on 2,50, kun vuosienergia annetaan megawattitunteina. Lisäksi on huomioitava, miten eri kuluttajaryhmien tehontarve vaihtelee eri kellonaikoina.

Suunnittelulaskentaa käytetään suunniteltaessa uusia verkkoja. Siinä voidaan hyödyntää jo olemassaolevia verkon osia.

Asiakastietojärjestelmään (ATJ) tallennetaan eri asiakkaiden sähkönkäyttötiedot. Tärkein tieto on asiakkaan vuosittainen sähkönkulutus. Järjestelmää käytetään ensisijaisesti sähkölaskutuksen apuna. Siitä saadaan myös laskentaohjelmien tarvitsemat energiatiedot.

LÄHTEET

/1/ Aura L. & Tonteri A.J., Sähkölaitostekniikka, WSOY 1993, 433 s.

/2/ Lakervi E., Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu, Otatieto 1996, 110 s.