

9 MUUNTAJAT JA SÄHKÖLAITTEET

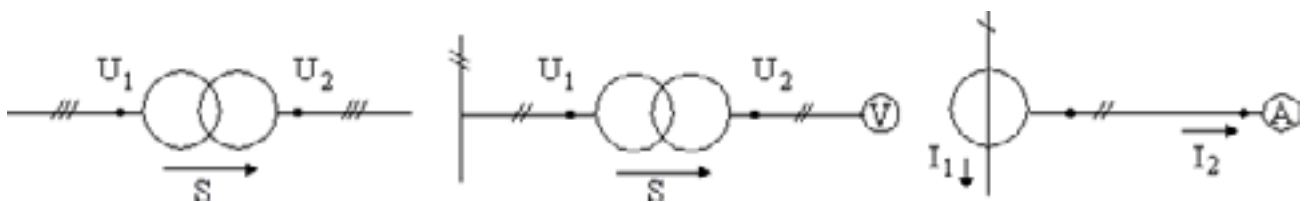
9.1 Yleistä

Vaihtojännitettä suurennetaan ja pienennetään muuntajilla. 1900-luvun alussa muuntaja aiheutti sen, että vaihtosähkö syrjäytti tasasähkön miltei kokonaan. Muuntajat ovat hinnaltaan verraten edullisia ja niiden käyttö tulee halvaksi, sillä ne eivät vaadi jatkuvaa huoltoa. Tämä johtuu siitä, että muuntaja on rakenteeltaan verrattain yksinkertainen, koska siinä ei ole liikkuvia osia. /4/

Muuntajien hyvistä ominaisuuksista johtuen tasasähköjärjestelmiä käytetään sähkön siirrossa ja jakelussa paljon vähemmän kuin vaihtosähköjärjestelmiä. Tasa- ja vaihtosuuntaajien kehittyessä tasajännitteiden käyttö on kuitenkin kaukovoimansiirrossa lisääntynyt.

Muuntajia valmistetaan laajalla tehoalueella alkaen pienistä signaalimuuntajista aina suurvoimansiirron tehomuuntajiin asti. Sähkölaitostekniikassa muuntajan tärkeimmät tehtävät ovat jännitteen asettelu voimansiirron ja jakelun kannalta edulliseen arvoon sähköverkon eri osissa, eri jänniteportaiden galvaaninen erottaminen toisistaan sekä jakeluverkkojen oikosulkuvirran rajoittaminen.

Muuntajat jaetaan tehtäviensä puolesta eri ryhmiin. Tässä kappaleessa käsitellään lähemmin voima- ja mittamuuntajien perusteita. Voima- eli tehomuuntajien tehtävänä on muuntaa jännite U_1 jännitteeksi U_2 sähköenergian siirron vaatimien tarpeiden mukaisesti (kuva 9.1a). Mittamuuntajien tehtävänä on muuntaa jännite tai virta mittakoeille ja releille sopivaan arvoon. Mittamuuntajat jaetaan edelleen jännite- ja virtamuuntajiin. Nimensä mukaisesti jännitemuuntajalla (kuva 9.1b) muunnetaan jännitettä ja virtamuuntajalla (kuva 9.1c) virtaa.

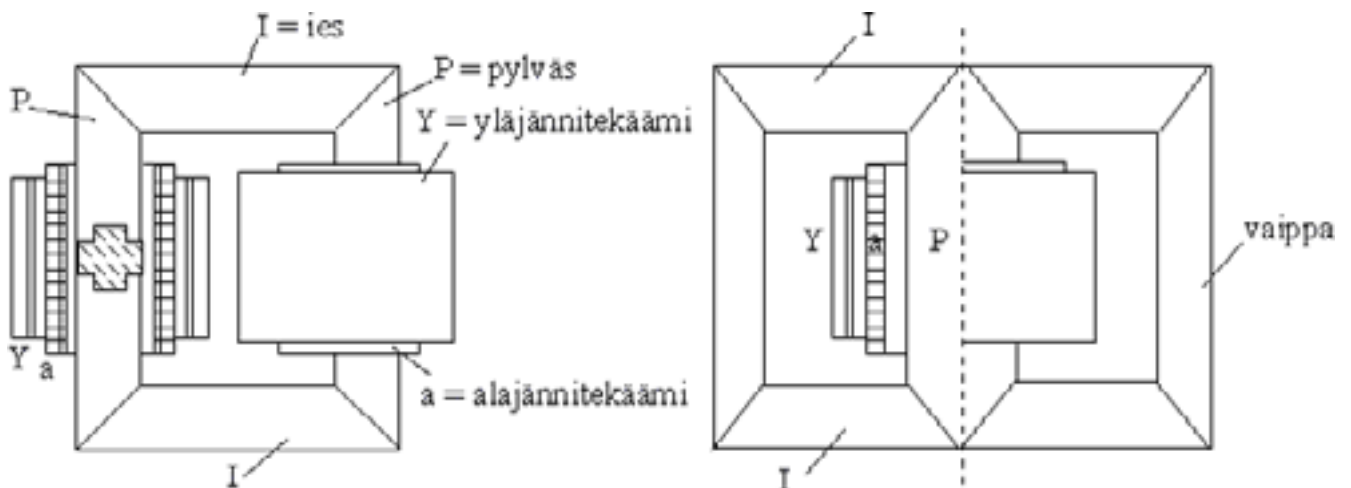


Kuva 9.1 a) Tehomuuntaja, S on siirrettävä sähköteho, b) jännitemuuntaja, V on jännitemittari, c) virtamuuntaja, A on virtamittari. /4/

9.2 Tehomuuntaja

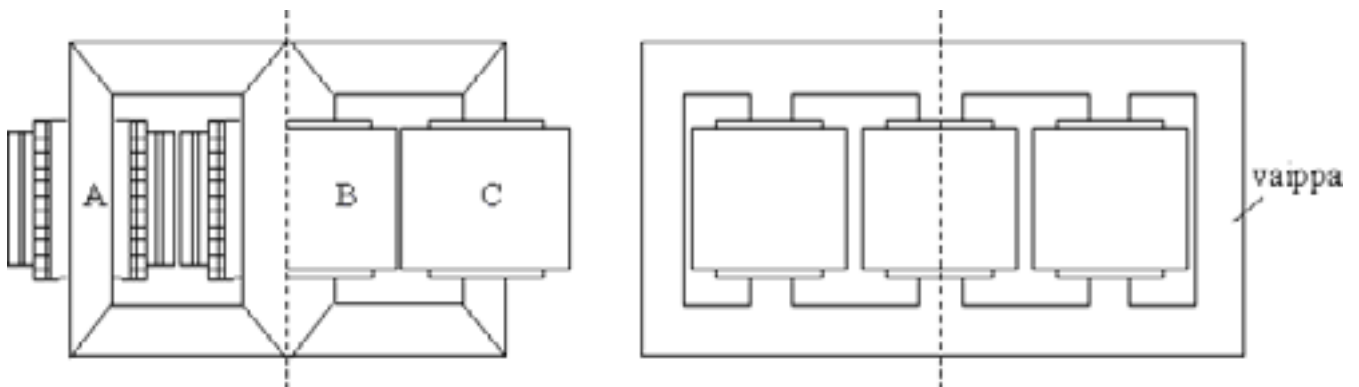
Muuntaja on staattinen sähkölaite. Sen aktiiviset osat ovat käämitykset ja rautasydän, jotka suorittavat muuntajan varsinaisen tehtävän. Passiivisia osia ovat mm. tukirakenteet, eristimet, muuntajaöljy ja jäähdytyslaitteet. Rakenteensa puolesta voi muuntaja olla joko sydän- tai vaippamuuntaja. Kuvassa 9.2a on yksivaiheinen sydänmuuntaja.

Rautasydämeen kuuluu kaksi pylvästä, joiden ympärille on sijoitettu sylinterimäiset käämitykset. Pylväät on yhdistetty toisiinsa ikeillä. Pylväiden ja ikeiden rajoittamaa aukkoa rautasydämessä kutsutaan ikkunaksi. Pylväät ja ikeet muodostavat yhdessä suljetun magneettipiirin. Käämityksiä on kaksi. Niitä kutsutaan yläjännite- ja alajännitekäämitykseksi tai tehon kulkusuunnan mukaan ensiö- ja toisiokäämitykseksi. Käämimateriaalina käytetään kuparia tai alumiinia. Ensiökäämi ja vastaava toisiokäämi sijoitetaan yleensä samalle pylväälle. Tällöin hajavuo ja hajareaktanssit ovat pienemmät kuin käämien ollessa eri pylväillä. /1,10/ Kuvassa 9.2a käämitykset on jaettu kahteen osaan, ja ne on sijoitettu molemmille pylväille. Kuvassa 9.2b on yksivaiheinen vaippamuuntaja. Sen rautasydämen muodostavat kolme pylvästä ja kaksi iestä. Käämitykset on sijoitettu keskimmäiselle pylväälle.



Kuva 9.2 a) yksivaiheinen sydänmuuntaja b) yksivaiheinen vaippamuuntaja. /10/

Kuvassa 9.3 on esitetty kolmivaiheinen sydän- ja vaippamuuntaja. Sydänmuuntajassa (kuva 9.3a) on joka vaiheella oma pylväänsä, jolla on vaiheeseen kuuluvat kaksi käämistä. Kuvassa 9.3b on kolmivaiheinen vaippamuuntaja. Vaippamuuntajassa yhden vaiheen magneettivuolla on toisista vaiheista riippumaton paluutie. Suurin osa kolmivaihemuuntajista on sydänmuuntajia johtuen siitä, että sydänmuuntajan rakenne on yksinkertaisempi ja jäähdytyksen kannalta edullisempi kuin vaippamuuntajan.



Kuva 9.3 a) kolmivaiheinen sydänmuuntaja b) kolmivaiheinen vaippamuuntaja. /10/

Muuntajassa syntyvät häviöt lämmittävät sen rautasydäntä ja käämityksiä. Syntyvä lämpö on johdettava ilmaan. Suurissa muuntajissa on käytettävä tehokkaampia jäähdytysmenetelmiä kuin pienissä, sillä muuntajan häviöt ovat verrannollisia muuntajan geometrinen pituusmittojen kuutioon jäähdytyspinnan ollessa verrannollinen vain mittojen neliöön. Jäähdytysaineena käytetään joko ilmaa tai öljyä. Jäähdytysaineen mukaan muuntajaa nimitetään joko kuiva- tai öljymuuntajaksi.

Kuivamuuntajassa käämitykset ja rautasydän ovat suoraan kosketuksissa ympäröivään ilmaan. Lämpöhäviöiden vaikutuksesta muuntajaa ympäröivä ilma lämpiää lämpösäteilyn vaikutuksesta. Lämmin ilma virtaa kevyenä ylöspäin ja synnyttää muuntajan läheisyyteen ilmavirtauksen, joka siirtää lämmön ympäristöön. Tällöin puhutaan luonnollisesta ilmajäähdytyksestä. Kiihdytetyssä ilmajäähdytyksessä ilmavirtauksen nopeutta suurennetaan puhaltimilla, jolloin jäähdytyskyky paranee. Kuivamuuntajia pyritään käyttämään varsinkin räjähdys-, saastumis- ja palovaarallisissa tiloissa. /2/

Perinteinen ja yleisin jäähdytystapa on luonnollinen öljyjäähdytys. Tällöin muuntajan käämit ja rautasydän on upotettu öljysäiliöön, joka on täytetty muuntajaöljyllä. Käämeissä ja rautasydämessä syntyvä lämpö siirtyy öljyyn, joka kuljettaa sen säiliön seinämiin. Seinämistä lämpö siirtyy ympäröivään ilmaan. Säiliön jäähdytyspintaa lisätään tekemällä seinät aaltolevyistä tai käyttämällä erityisiä radiaattoreita, joissa sileät tai jäähdytysrivilliset putkistot toimivat jäähdyttiminä. Kiihdytetty öljyjäähdytys saadaan aikaan lisäämällä tuulettimet, jotka puhaltavat radiaattoreihin ilmaa.

Teho- eli voimamuuntajat voidaan käytännössä jakaa kahteen ryhmään, jakelu- eli pientehomuuntajiin ja suurtehomuuntajiin. Jakelumuuntajat jakautuvat rakenteeltaan seuraavasti: paisuntasäiliölliset jakelumuuntajat, hermeettisesti suljetut (kaasutiiviisti suljetut) jakelumuuntajat ja valuhartsieristeiset jakelumuuntajat. Näistä kaksi ensimmäistä muuntajaa ovat öljyeristeisiä ja -jäähdytteisiä. Kuivamuuntajat ovat valuhartsieristeisiä. Yleisin öljyeristeisistä muuntajista on paisuntasäiliöllä varustettu muuntaja. Hermeettisissä muuntajissa ei ole paisuntasäiliötä. Ne ovat täynnä öljyä ja

kaasutiiviisti suljettuja. Säiliö on mitoitettu kestävämmän ylikuormituksenkin aiheuttamaa ylipainetta. Hermeettisissä muuntajissa öljy vanhenee hitaammin kuin paisuntasäiliöllisissä muuntajissa. Yleensä muuntajaöljyyn on lisätty vanhenemista hidastava inhibiitti. /1/

9.3 Mittamuuntaja

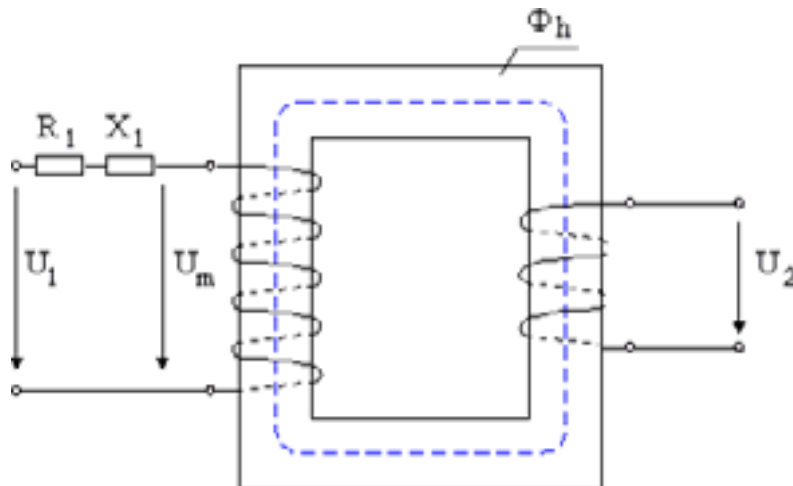
Mittamuuntajia käytetään mittaus- ja suojaustekniikassa. Yleisimmin käytetyt mittamuuntajat ovat virta- ja jännitemuuntaja. Niiden tehtävänä on muuntaa primääripiirin jännite- ja virtasuureet mittareille ja releille (toisiokojeet) sopivaan arvoon eli laajentaa mitta-alaa. Niitä käytetään siksi, että mittareiden ja releiden rakentaminen suurille virroille ja jännitteille on teknisesti vaikeaa. /5/

Mittamuuntajat ovat kojeita, joissa rautasydämen ympärillä on ensiö- ja toisiokäämit. Jännitemuuntajan rakenneperiaate on aivan sama kuin tavallisella tehomuuntajalla. Jännitemuuntaja on voimamuuntajaan verrattuna erittäin pienitehoinen. Virtamuuntajan tehtävänä on normaalisti ensiövirran pienentäminen. Sen tähden ensiön kierrosluku on pieni ja toision kierrosluku on suuri. Virtamuuntaja valitaan joko suojaus- tai mittaustehtävään. Samaa virtamuuntajaa voidaan käyttää myös molempiin tarkoituksiin, sekä suojaukseen että mittaukseen. Tällöin virtamuuntajassa on useampia sydämiä. Sydämillä on yhteinen ensiökäämi, mutta kullakin sydämellä oma toisiokääminsä. Mittaukseen käytettävää sydäntä nimitetään mittaussydämeksi ja suojaukseen käytettävää sydäntä suojaussydämeksi. Ulosasennettavat virtamuuntajat ovat tavallisesti öljytäytteisiä ja hermeettisesti suljettuja, jotta öljy ei joudu alttiiksi ulkoilman kosteudelle. Ulkoisen eristyksen muodostaa tavallisesti posliinikuori. Sisäänasennettavissa virtamuuntajissa käytetään yleensä valuhartsieristystä. Sen etuna on suuri sähköinen ja mekaaninen lujuus.

9.4 Yksivaihemuuntajan ominaisuudet

9.4.1 Tyhjäkäynti

Muuntaja on tyhjäkäynnissä silloin, kun sen toisiokäämi on virraton ensiökäämin ollessa kytkettynä vaihtojännitteeseen U_1 . Ideaalisen eli häviöttömän yksivaihemuuntajan käämeissä ei synny virtalämpöhäviöitä, eikä rautasydämessä rautahäviöitä ja hajavuo on nolla eli sama magneettivuo lävistää ensiö- ja toisiokäämin (kuva 9.4). Muuntaja ei kuitenkaan käytännössä ole ideaalinen, vaan häviöitä ja hajavuota syntyy.



Kuva 9.4 Häviötön yksivaihemuuntaja tyhjäkäynnissä. Kuvassa R_1 on ensiökäämin resistanssi, X_1 on ensiökäämin reaktanssi, U_1 on ensiöjännite, U_m on vuo-jännite, Φ_h on päävuo. /10/

Ensiökäämi ottaa verkosta tyhjäkäyntivirran I_0 , joka normaalirakenteisilla tehomuuntajilla on n. 0,3 ... 2,0 % nimellisvirrasta I_n . Tyhjäkäyntivirta synnyttää ensiökäämin johdinkierrosten kanssa magnetomotorisen voiman (mmv) $N_1 I_0$. Tämä magnetomotorinen voima kehittää rautasydämeen magneettivuon Φ_h , jota nimitetään päävuoksi. Päävuo kulkee sekä ensiö- että toisiökäämin läpi. Hajavuo kulkee muuntajassa pitkän matkaa epämagneettisessa aineessa, jonka magneettivastus on paljon suurempi kuin rautasydämen. Tämän vuoksi hajavuo on päävuon rinnalla varsin vähäinen. Hajavuo vaikuttaa oleellisesti muuntajan ominaisuuksiin, sillä se ja tyhjäkäyntivirta määräävät muuntajan ensiökäämin hajainduktanssin (L_1) seuraavasti: /10/

$$(9.1) \quad L = N_1 \frac{\varphi_{\sigma 1}}{\sqrt{2} I_0}$$

missä

N_1 on ensiökäämin johdinkierrosten lukumäärä

$\varphi_{\sigma 1}$ on ensiökäämin hajavuo

I_0 on tyhjäkäyntivirta.

Hajareaktanssi voidaan laskea, kun tiedetään hajainduktanssi ja verkon taajuus:

$$(9.2) \quad X_{\sigma 1} = 2\pi f L_1$$

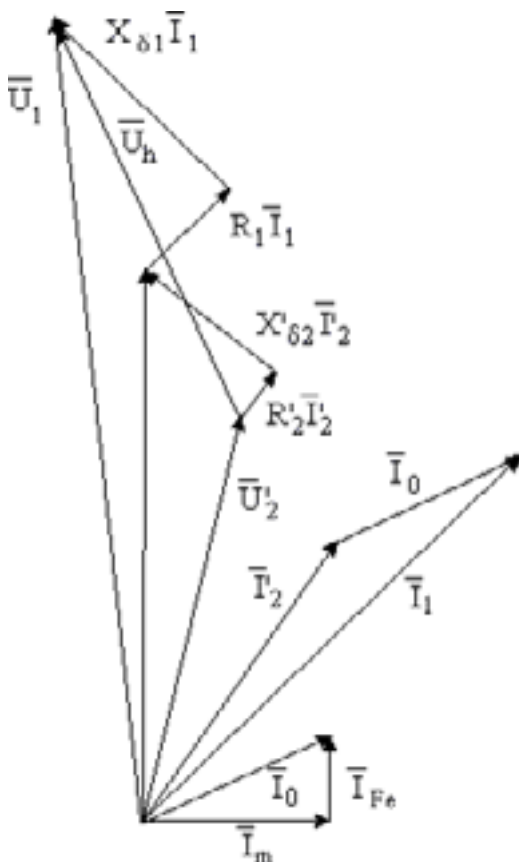
f on verkon taajuus.

9.4.2 Kuormitus

Mikäli muuntajan toisiokäämin napoihin kytketään ulkoinen kuormitus, toisiovo jännite saa aikaan kuormitukseen virran I_2 , joka synnyttää toisiovo magnetomotorisen virran $I_2 N_2$. Koska muuntajan vuo ei saa muuttua häviöttömässä, täytyy mmv:n $I_2 N_2$ kumoutua. Muuntajassa tämä tapahtuu ensiökäämin verkosta ottaman lisävirran I_a avulla. I_a asettuu suuruudeltaan sellaiseksi, että

$$(9.3) \quad I_a N_1 = I_2 N_2$$

Kun ensiön lisävirran ja toisiovirran mmv:t vaikuttavat magneettipiirissä toisiaan vastaan, niin virrat i_a ja i_2 kiertävät pylvästä joka hetki vastakkaisiin suuntiin. Toisiokäämin mmv aikaansaa kuitenkin toisiovo hajavuon, jota ensiökäämi ei voi kumota, koska tämä hajavuo ei kulje ensiökäämin kautta. Muuntajan ensiövirta muodostuu tyhjäkäyntivirran I_0 ja toisiovo kuormitusvirran aiheuttaman lisävirran I_a summana. Kuormitetun muuntajan täydellinen osoitinpiirros, jossa on otettu resistanssien ja hajareaktanssien aiheuttamat jännitehäviöt huomioon, on esitetty kuvassa 9.5.



Kuvassa

- \bar{U}_1 on ensiöjännite
- \bar{U}'_2 on ensiöön redusoitu toisiojännite
- R_1 on ensiökäämin resistanssi
- R'_2 on toisiokäämin resistanssi ensiöön redusoituna
- $X_{\delta 1}$ on ensiökäämin hajareaktanssi
- $X'_{\delta 2}$ on ensiöön redusoitu toisiokäämin hajareaktanssi
- \bar{U}_h on jännitehäviö
- \bar{I}_0 on tyhjäkäyntivirta
- \bar{I}_1 on ensiövirta
- \bar{I}'_2 on ensiöön redusoitu toisiovirta
- \bar{I}_{Fe} on rautahäviövirta ja
- \bar{I}_m on magnetoimisvirta.

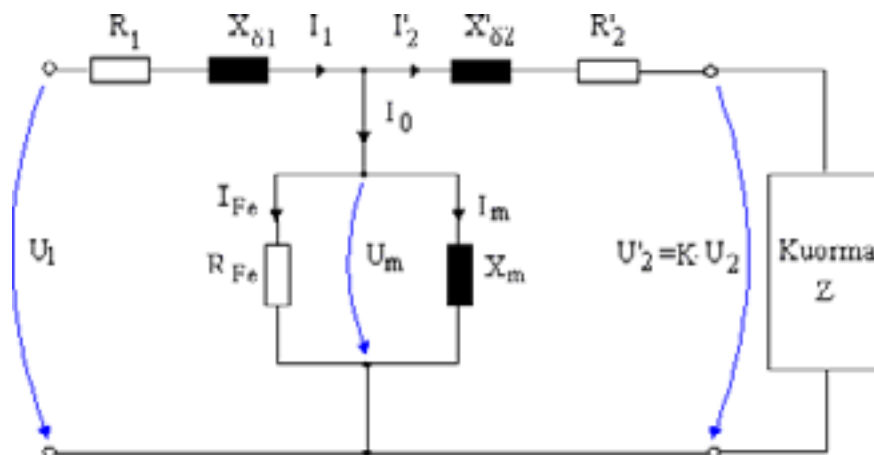
Kuva 9.5 Kuormitetun muuntajan osoitinpiirros.

9.4.3 Redusointi

Suoritettaessa muuntajilla laskutoimituksia ja erityisesti piirrettäessä muuntajien osoitinpiirroksia käytetään yleensä redusoituja suureita. Kun muuntajan muuntosuhde on yleensä suuri (esim. $20000\text{V}/400\text{V}=50$) olisi piirrosta piirrettäessä ensiöjännitteen osoitin piirrettävä 50 kertaa niin pitkäksi kuin toisiojännitteen osoitin. Tämä johtaisi suureen piirrokseen tai toisiojännitteen osoitin olisi hyvin lyhyt ja piirustustarkkuus huono. Muuntajissa suoritetaan yleensä toisiosuureiden redusointi ensiökäämin johdinkierrelukua vastaaviksi. Muuntajan jännitteitä laskettaessa kiinnostavin suure on jännitteiden itseisarvojen erotus eli muuntajassa syntyvä jännitteenalenema, joka ilmoitetaan yleensä prosentteina.

9.4.4 Sijaiskytkentä

Kuvassa 9.6 on esitetty muuntajan täydellinen sijaiskytkentä, jossa on otettu huomioon myös muuntajan tyhjäkäyntivirta.



Kuva 9.6 Muuntajan täydellinen sijaiskytkentä. Kuvassa R_1 on ensiökäämin resistanssi, $X_{\delta 1}$ on ensiökäämin hajareaktanssi, R'_2 on toisiokäämin resistanssi ensiöön redusoituna, $X'_{\delta 2}$ on ensiöön redusoitu toisiokäämin hajareaktanssi, R_{Fe} on rautahäviöresistanssi, X_m on magnetointireaktanssi, U_1 on ensiöjännite, U_m on vuo-jännite, I_0 on tyhjäkäyntivirta, I_1 on ensiövirta, I'_2 on ensiöön redusoitu toisiovirta. I_{Fe} on rautahäviövirta, I_m on magnetoimisvirta, Z on kuorma. /11/

Usein käytetään yksinkertaistettua sijaiskytkentää, jolloin jätetään tyhjäkäyntivirtaa kuvaava osuus pois sekä yhdistetään ensiön ja toision resistanssit sekä ensiön ja toision reaktanssit. Yhdistettyjä komponentteja voidaan merkitä R_k :lla ja X_k :lla. Ne saadaan laskemalla: /5,10/

$$(9.4) \quad R_k = R_1 + R'_2$$

$$(9.5) \quad X_k = X_1 + X_2'$$

R_k on nimeltään oikosulkuresistanssi ja X_k oikosulkureaktanssi. Näiden avulla voidaan laskea oikosulkuimpedanssi Z_k .

$$(9.6) \quad Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

Yleensä valmistaja ei ilmoita muuntajalle sen resistanssia ja reaktanssia suoraan ohmiarvoina, vaan ilmoittaa vain muuntajan suhteellisen oikosulkuimpedanssin (merkintä u_k tai z_k , laatu %). Tämän avulla voidaan laskea muuntajan oikosulkuimpedanssi Z_k , kun tiedetään nimellisjännitteet ja nimellisteho S_n .

$$(9.7) \quad Z_k = \frac{z_k U_n^2}{100 S_n}$$

Kun halutaan määrittää impedanssi ensiöpuolelta katsottuna, käytetään ensiön nimellisjännitettä ja vastaavasti käytetään toision nimellisjännitettä, jos halutaan määrittää impedanssi toisiopuolelta katsottuna. Suhteellinen oikosulkuimpedanssi z_k voidaan jakaa suhteelliseen oikosulkuresistanssiin r_k ja oikosulkureaktanssiin x_k .

$$(9.8) \quad z_k = r_k + jx_k$$

Muuntajan ns. kilpiarvoissa ilmoitetaan nimellisjännitteiden, nimellistehon ja oikosulkuimpedanssin lisäksi myös muuntajan tyhjäkäyntihäviöt P_0 ja nimelliset kuormitushäviöt P_k . Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi on laskettavissa nimellisten kuormitushäviöiden ja nimellistehon S_n avulla seuraavasti:

$$(9.9) \quad r_k = 100 \frac{P_k}{S_n} \%$$

Suhteellinen oikosulkureaktanssi saadaan laskettua, kun tiedetään suhteellinen oikosulkuresistanssi ja oikosulkuimpedanssi.

$$(9.10) \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

Muuntajan yksinkertaistetussa sijaiskytkennässä käytetyt arvot voidaan laskea seuraavasti:

$$(9.11) \quad R_k = \frac{r_k U_n^2}{100 S_n}$$

$$(9.12) \quad X_k = \frac{x_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n}$$

Yhtälöissä käytetään jännitteenä joko ensiön tai toision nimellisjännitettä riippuen siitä, onko sijaiskytkentä redusoitu ensiö- vai toisiopuolelle.

9.4.5 Jännitteenalenema ja jännitehäviö

Muuntajan likimääräinen jännitteenalenema (U_a) saadaan laskettua, kun tiedetään R_k ja X_k

$$(9.13) \quad U_a = |U_1| - |U_2| \approx IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi$$

missä

φ on vaiheensiirtokulma (virran ja jännitteen välinen kulma)

I on kuormitusvirta.

Muuntajan jännitehäviö, joka on resistiivisen ja induktiivisen jännitehäviön geometrinen summa (esitetty kuvassa 9.5) on aina suurempi kuin jännitteenalenema, joka on ensiö- tai toisiopuolelle redusoitujen jännitteiden itseisarvojen erotus. On siis huomattava, että jännitteenalenema ja jännitehäviö eivät tarkoita samaa asiaa. Kuormitusvirran I aiheuttama jännitehäviö muuntajassa voidaan laskea Ohmin lain mukaan yhtälöstä: 5/

$$(9.14) \quad \bar{U}_n = \bar{I} \bar{Z} = \bar{I} R_k + j \bar{I} X_k = \bar{U}_1 - \bar{U}_2$$

9.4.6 Häviöt

Muuntajan häviöt voidaan jakaa kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöihin. Tyhjäkäynti- eli rautahäviöt (P_0) ovat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä, jotka aiheutuvat magneettivuon vaihtelusta rautasydämessä. Kuormitus- eli virtalämpöhäviöt (P_k) syntyvät käämien vastuksissa virran vaikutuksesta. Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten niiden suuruus pysyy koko ajan vakiona. Muuntajan kilpiarvoissa ilmoitetaan tavallisesti nimelliset kuormitushäviöt, jotka tarkoittavat muuntajan häviöitä nimelliskuormalla. Tämän arvon perusteella pystytään laskemaan kuormitushäviöt kuormalle S , kun tiedetään muuntajan nimellisteho S_n

$$(9.15) \quad P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 P_{kn}$$

missä P_{kn} on kuormitushäviöt nimellisellä kuormalla.

Tyhjäkäyntihäviöiden P_0 pysyessä vakiona kuormitushäviöt P_k ovat tavallisesti neliöllisesti riippuvaisia muuntajan kuormasta.

9.4.7 Hyötysuhde

Muuntajan hyötysuhde saadaan laskettua kaavasta: /5/

$$(9.16) \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_k}$$

missä

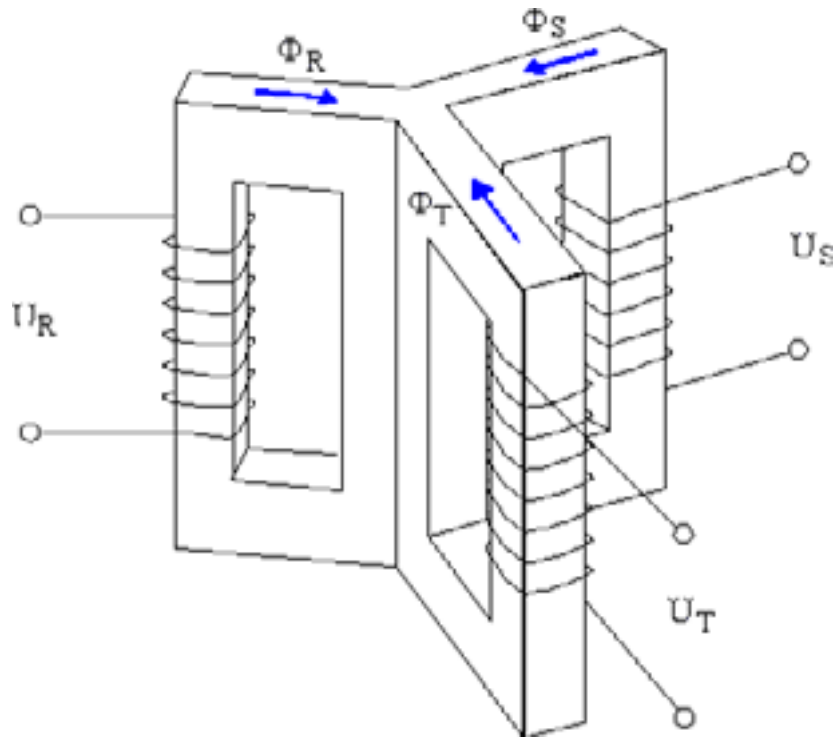
P_2 on muuntajan antama teho

P_1 on muuntajan ottama teho

9.5 Kolmivaihemuuntaja

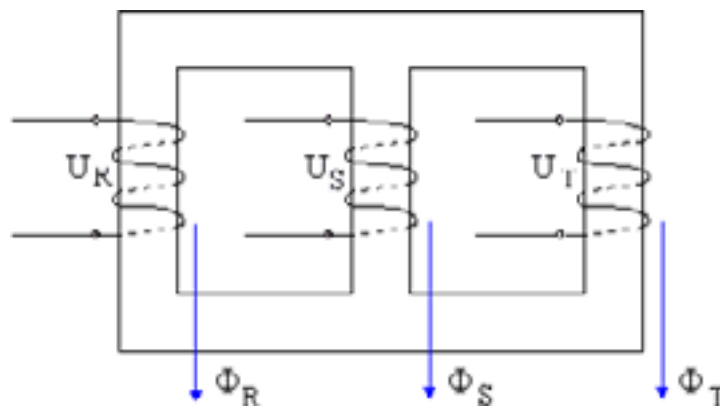
Sähköenergia siirretään käytännössä voimalaitoksilta kuluttajille kolmivaihejärjestelmää käyttäen. Kolmivaiheinen muuntaja saadaan esim. kytkemällä kolme yksivaihemuuntajaa tähtikytkentään. Jokaisen muuntajan magneettivuo kulkee omassa rautasydämessä. Tällöin muuntajat on kytketty yhteen sähköisesti, mutta eivät magneettisesti. Kolmivaihejärjestelmän jännitteet ovat 120 asteen vaihesiirrossa keskenään ja vuot noudattavat myös samaa 120 asteen vaihesiirtoa. Kun rakennetaan kolme yksivaihemuuntajaa kuvan 9.7 mukaisesti yhteen ja varustetaan ne yhdellä yhteisellä pylväällä, kulkevat kaikki vuot tämän pylvään kautta. Vuo-osoittimien summa on nolla. /10/

$$(9.17) \quad \bar{\Phi}_R + \bar{\Phi}_S + \bar{\Phi}_T = 0$$



Kuva 9.7 Symmetrinen kolmivaihemuuntaja (kuvassa vain ensiökäämit). /10/

Yhteisessä pylväässä ei kulje lainkaan magneettivuota ja se voidaan jättää rakenteesta pois. Kun vielä S-vaiheen ikeet lyhennetään, tulevat kaikki pylväät samaan tasoon ja päädytään tavalliseen kolmivaihemuuntajan rakenteeseen (kuva 9.8).



Kuva 9.8 Tavallinen kolmivaihemuuntaja (kuvassa vain ensiökäämit). /10/

Kolmivaihemuuntajan vaihekäämit voidaan kytkeä joko tähti-, kolmio- tai hakatähtikytkentään. Tähti- ja kolmiokytkentää käytetään sekä ylä- että alajännitekäämityksessä. Hakatähtikytkentää käytetään vain alajännitekäämityksessä. Kuva 9.9 esittää näistä kytkennöistä muodostetut kolmivaihemuuntajien standardoidut kytkennät. Nämä standardoidut kytkennät jakautuvat neljään kytkentäryhmään, joiden tunnusluvut ovat 0, 5, 6, 11. Jokaisessa kytkentäryhmässä on kolme kytkentää, joten käytännössä muuntajissa on valittavissa 12 erilaista kytkentää.

Tunnusluku	KytKentä	Osoitinkuvat		KytKennät	
		YJ	AJ	YJ	AJ
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Kuva 9.9 Kolmivaihemuuntajien standardoidut kytkennät. Suomessa yleisimmin käytetyt kytkennät on rajattu. KytKentää ilmaisevien tunnuskirjaimien merkitykset ovat seuraavat: Y on yläjännitekäämitys tähtikytkennässä, D on yläjännitekäämitys kolmiokytkennässä, y on alajännitekäämitys tähtikytkennässä, d on alajännitekäämitys kolmiokytkennässä, z on alajännitekäämitys hakatähtikytkennässä. /10/

Jos yläjännitekäämityksen nollapiste on käytettävissä muuntajan kannella, merkitään se kirjaimella N ja vastaavasti alajännitekäämityksen nollapiste kirjaimella n. Esimerkiksi YNyn0 -kytkennän tunnusluku ilmoittaa mitä numeroa kellotaulussa toisiojänniteosoitin osoittaa, kun vastaava ensiojänniteosoitin osoittaa numeroa 12 eli 0.

Tähti- ja kolmiokytkennät ovat yleisesti käytettyjä kytkentöjä kaikissa kolmivaiheisissa kojeissa. Hakatähtikytkentä on vain jakelumuuntajissa käytetty kytkentä, joka sähköjohdon kannalta vastaa täysin tähtikytkentää. Etuna on se, että hakatähtikytkentä sallii epäsymmetrisen kuormituksen, vääristämättä jännitteitä epäsymmetrisiksi. /4/ Hakatähtikytkennässä jokaisella pylväällä oleva käämi on jaettu kahteen osaan, joiden johdinkierrosluvut ovat yhtäsuuret. Vaihekäämeihin kytketään kaksi kääminpuolikasta eri pylväältä.

Kolmivaihemuuntajien rinnankäyttö on mahdollista, jos seuraavat ehdot toteutuvat: muuntajien jännitteet ovat samat, suurempitehoisen muuntajan oikosulkujännite ei saa olla suurempi kuin pienempitehoisen, muuntajien tehojen suhde saa olla enintään 1:3 ja muuntajien on kuuluttava samaan kytkentäryhmään. /10/

Sähköverkossa tapahtuvien jännitevaihteluiden pienentämiseksi muuntajan jännitettä on pystyttävä säätämään. Jännitettä säädetään muuntajan muuntosuhdetta muuttamalla. Yleensä muutetaan yläjännite-käämin johdinkierroslukua, koska virta on yläjännitepuolella pienempi kuin alajännitepuolella. Jännitteen säätöön käytetään joko väliottokytkintä tai käämikytkintä. Väliottokytkimellä voidaan säätää muuntajan muuntosuhdetta vain muuntajan ollessa jännitteetön. Käämikytkimellä voidaan muuttaa muuntajan muuntosuhdetta muuntajan ollessa jännitteellinen ja kuormitettu. Tästä johtuen se soveltuu jatkuvaan jännitteen säätöön, jolloin se jännitemittaukseen yhdistettynä säätölaitteena pitää sähköverkon jännitteen vakiona halutussa arvossa. /10/

9.6 Kytkinlaitteet

9.6.1 Katkaisijat

Katkaisijan on kyettävä vaaraa aiheuttamatta sulkemaan ja katkaisemaan virtapiirin suurin mahdollinen virta. Tämä merkitsee sitä, että katkaisijan on pystyttävä katkaisemaan virtapiirissä esiintyvä suurin oikosulkuvirta ja kytkemään nimellisjännitteinen virtapiiri oikosulkuun. Katkaisun on tapahduttava siten, että muulle syöttöverkolle aiheutuu mahdollisimman vähän häiriöitä, eikä katkaisija saa vioittua. Katkaisijat voivat toimia manuaalisesti tai automaattisesti. Tavallisin automaattinen katkaisijatoiminnan avautuminen tapahtuu ylivirran vaikutuksesta. /6,7/

Virtapiirin katkaisussa virta ei katkea välittömästi katkaisijan koskettimien avautuessa, vaan virtapiiri pysyy suljettuna valokaaren välityksellä. Valokaari sammutetaan sitä ympäröivän sammutusväliaineen avulla. Käytetyn sammutusväliaineen perusteella katkaisijat voidaan ryhmitellä seuraavasti: ilmakatkaisijat, öljykatkaisijat, vähäöljykatkaisijat, paineilmakatkaisijat, SF₆-katkaisijat ja tyhjökatkaisijat. /7/ Näistä vähäöljy-, SF₆- ja tyhjökatkaisimia käytetään yleisimmin. Erityisesti SF₆-katkaisijat ovat vähitellen korvaamassa vähäöljykatkaisijoita.

Vähäöljykatkaisija on öljykatkaisija, jossa öljyn määrä on erittäin pieni. Valokaaren katkaisu perustuu öljyn höyrystyessään kehittämään paineeseen ja paineen aikaansaamaan öljyvirtaukseen. Vähäöljy-katkaisijan ohjaaminen tapahtuu jousimekanismin avulla. Ohjaimen kiinnikytkentäjousi viritetään moottorilla tai käsin. Aukiohjausjousi virittyy ohjattaessa katkaisija kiinni. Vähäöljykatkaisijan tyypillinen käyttöalue on 7,2 - 123 kV. Vähäöljykatkaisijoiden määrä on viime vuosina pienentynyt. Monet valmistajat ovat lopettaneet niiden valmistamisen, mutta niitä on kuitenkin

edelleen runsaasti käytössä verkossa. Vähäjännitekatkaisijoita on korvattu lähinnä SF₆-katkaisijoilla ja keskijännitteellä myös tyhjö-katkaisijoilla.

SF₆-katkaisijoissa käytetään valokaaren katkaisuun SF₆-kaasua. Sen ominaisuuksia ovat suuri jännitekestoisuus, palamattomuus, kaasun kemiallinen pysyvyys, suuri valokaaren jäähdytyskyky ja kaasun myrkyttömyys. Valokaaren seurauksena SF₆-katkaisijaan muodostuu kuitenkin myrkyllisiä yhdisteitä. Uusissa asennuksissa SF₆-katkaisija on viime vuosina korvannut yli 36 kV jännitteillä paineilmakatkaisijan ja alle 36 kV jännitteillä paineilma- ja vähäjännitekatkaisijan lähes täydellisesti.

Tyhjökatkaisijan toiminta perustuu valokaaren katkaisukammiossa olevaan pieneen paineeseen, jossa ilman sähkölujuus on hyvä. Tyhjökatkaisijoiden käyttö ja valmistus on keskittynyt keskijännitealueelle. Parhaiten tyhjökatkaisija sopii käyttöön, jossa vaaditaan n. 20 kA katkaisukyky ja suuri katkaisutiheys.

9.6.2 Erottimet

Erottimen tehtävänä on muodostaa turvallinen avausväli erotettavan virtapiirin ja muun laitoksen välille sekä saattaa laitoksen osa jännitteettömäksi turvallista työskentelyä varten. Erottimen on pystyttävä suljettuna johtamaan vaurioitumatta, avautumatta ja liiaksi lämpenemättä kaikki virtapiirissä esiintyvät kuormitus- ja oikosulkuvirrat. Erotinta ei ole tarkoitettu kuormitetun virtapiirin avaamiseen tai sulkemiseen. Sen avaaminen ja sulkeminen saa tapahtua pääsääntöisesti vain jännitteettömänä. /7/

Erottimen auki- ja kiinniohjaus tapahtuu käsi-, moottori- tai paineilmaohjattuna. Moottori- ja paineilmaohjattuja erottimia voidaan kauko-ohjata kytkinaseman valvomosta tai erityisellä kauko-ohjauslaitteistolla pitkienkin matkojen päästä. Suomen ilmasto-olosuhteissa on ulosasetettävissä erottimissa kiinnitettävä erityistä huomiota mekaaniseen kestävyys. Erottimen on toimittava myös kovalla pakkasella ja jäätävissä olosuhteissa.

Kuormanerotin on erikoisrakenteinen erotin, joka pystyy tavallisen erottimen tehtävien lisäksi katkaisemaan tietyn kuormitusvirran ja kytkemään pienehkön oikosulkuvirran. Kuormanerotinta käytetään erottamaan kuormitusvirrallisia verkon osia toisistaan. Varokekuormanerotin on vapaalaukaisulaitteella ja sulakkeilla varustettu kuormanerotin. Yhdenkin sulakkeen palaminen aiheuttaa kuormanerotin aukiohjautumisen. Varokekuormanerotinta käytetään yleisimmin jakelumuuntamoissa katkaisijan korvaavana kytkinlaitteena.

9.7 Kompensointilaitteet

Pätötehon lisäksi monet sähkölaitteet vaativat myös loistehoa toimiakseen. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi oikosulkumoottorit ja muuntajat. Näissä laitteissa varsinaisen työn tekee pätöteho ja loistehoa tarvitaan magneettikentän ylläpitämiseen. Esimerkiksi tyhjäkäynnissä pyörivä oikosulkumoottori ottaa verkosta lähes puhdasta loisvirtaa.

Kun kuorman tarvitsemaa loistehoa ei tuoteta paikallisesti, ottaa kuorma sen verkosta. Tällöin kuorman ottama virta kasvaa. Virta voidaan jakaa alla olevan kaavan mukaisesti pätö- ja loiskomponentteihinsa.

$$(9.18) \quad I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2}$$

missä

I_p on virran pätökomponentti

I_q on virran loiskomponentti.

Kaavasta voidaan nähdä miksi loistehon siirtäminen verkossa on haitallista. Mikäli loistehoa tuotettaisiin kulutuskohteen läheisyydessä voitaisiin kokonaisvirtaa, jonka mukaan verkon laitteet mitoitetaan, pienentää. Kun loisteho tuotetaan kulutuskohteen lähistöllä rinnakkaiskondensaattoriparistolla, puhutaan rinnakkaiskompensoinnista. Pienentyneestä virrasta on monia etuja. Ensinnäkin johtimista vapautuu siirtokapasiteettia pätötehon siirtoa varten. Kompensoimalla loistehoa voidaan verkon pätötehon siirtokykyä parantaa olennaisesti. /8,9/

Toiseksi kompensoinnilla voidaan pienentää pätötehohäviöitä. Kompensoidessa loistehoa kulutuskohteessa voidaan pienentää edellä esitetyn kaavan I_q -komponenttia. Täten kokonaisvirran pienentyessä myös syntyvät häviöt pienenevät ja komponenttien (kaapelit, muuntajat keskuskeskukset) lämpötila pienenee.

Sarjakompensoinnissa vaikutetaan johdon reaktanssiin kytkemällä sen kanssa kondensaattori sarjaan. Tällöin johdon jännitteenaleneman lauseke saa muodon:

$$(9.19) \quad U_{av} = I_p R + I_q (X_L - X_C)$$

missä

U_{av} on jännitteenalenema (vaihejännite)

X_L on johdon reaktanssi

X_C on kondensaattorin reaktanssi.

Sarjakompensoinnilla pienennetään johdon sähköistä pituutta. Sitä käytetään lähinnä siirtoverkoissa.

Sähköyhtiöt ja tukkumyyjät laskuttavat asiakkaitaan myydyn pätötehon lisäksi myös loistehosta. Normaalisti kuluttaja saa ottaa verkosta ilmaiseksi loistehoa noin 20 % pätötehon tarpeestaan. Tämän ylittävältä osalta loistehomaksut nousevat jyrkästi. Esimerkiksi suurissa teollisuuslaitoksissa liiallinen loistehon otto verkosta voi aiheuttaa satojentuhansien markkojen ylimääräisen laskun.

9.7.1 Loistehon tuotanto

Tarvittavaa loistehoa voidaan tuottaa kahdella tavalla, joko tahtikoneilla tai kondensaattoreilla.

9.7.2 Tahtikoneet

Loistehoa on perinteisesti tuotettu tahtikoneilla. Tahtikonetta ylimagnetoitaessa tuottaa kone ylimääräistä loistehoa verkkoon. Vastaavasti alimagnetointi kuluttaa sitä. Tahtikoneet sopivat loistehon tuotantoon hyvän säädettävyyden vuoksi. Aikaisemmin suuret koneet tilattiin yleensä ylimagnetoitimahdollisuudella juuri loistehon tuotantoa silmälläpitäen. Nykyään se ei ole taloudellisesti kannattavaa, sillä loistehon tuotanto lisää koneen häviöitä ja pienentää kuormitettavuutta. Nykyisin suurten tahtikoneiden loistehon tuotantokyyky on suurelta osin varattu reserviksi erilaisten häiriötilanteiden varalle.

9.7.3 Kondensaattorit

Nykyisin loistehon kompensointi pyritään toteuttamaan kondensaattoreilla. Yksittäisiä kondensaattoreita käytetään vain lähinnä loistelamppujen kompensoinnissa. Muulloin yksittäisistä kondensaattoreista kasataan joko kondensaattoriyksiköjä tai kondensaattoriparistoja, jotka mitoitetaan ja joita ohjataan tarpeen mukaan. Pienjännitekondensaattoreista puhuttaessa voidaan ne jakaa kahteen ryhmään: valaisinkondensaattorit ja tehokondensaattorit.

Pienjännitteellä kondensaattoriyksiköt ovat normaalisti kolmivaiheisia sisäisesti joko kolmioon tai tähteen kytkettyjä, jolloin yksikön kannessa on kolme liittintä. Erikoisia käyttötarkoituksia varten valmistetaan kuudella liittimellä varustettuja yksiköitä, jolloin yksikkö voidaan kytkeä ulkoisesti joko tähteen tai kolmioon.

Kytkemällä useita kondensaattoriyksiköitä rinnan samaan telineeseen saadaan kondensaattoriparisto. Mikäli paristoja ei voi säätää, puhutaan kiinteästä kondensaattoriparistosta. Paristojen teholuokat ovat 50 - 300 kvar.

Suurjänniteparistot muodostetaan kytkemällä yksivaiheisia yksiköitä kuhunkin vaiheeseen jännitteestä riippuen tarpeellinen määrä sarjaan ja tehosta riippuen rinnan. Yksikköjännite on tavallisesti 6350 V, jolloin tähtikytkennän paristoja jännite on 11 kV ja kahden sarjaan kytketyn yksikön jännite 22 kV.

Automatiikkaparisto pitää sisällään kondensaattoriyksiköjä, joista jokainen on varustettu kontaktoreilla ja sulakkeilla. Pariston loistehosäädin ohjaa yksiköiden kontaktoreja loistehotilanteen mukaan. Säädin mittaa virran ja jännitteen välistä vaihekulmaa. Siihen on aseteltu induktiivinen ja kapasitiivinen havahtumisraja, joiden sisällä se pyrkii pitämään loistehon kytkemällä yksiköjä päälle ja pois. Pariston säätöporras koostuu modulista, joka muodostuu kontaktorista, sulakkeista ja purkausvastuksesta. Moduulit on asennettu kaappiin, jonka ovenssa on loistehosäädin.

9.7.4 Reaktorit

Oikein toteutetusta kompensoinnista on paljon hyötyä, kuten edellä on kuvattu. Liiallinen kompensointi on huono asia, sillä silloin kompensoidun verkon jännite nousee. Siksi loistehoa on voitava myös kuluttaa verkosta. Siirtoverkossa tällainen tilanne on esimerkiksi pienen kuorman aikana, jolloin johto käy aliluonnollisella teholla. Loistehon kulutus tapahtuu kuristimella eli reaktorilla. Kuristimia käytetään lisäksi vaimentamassa kondensaattoriparistojen kytkentätransientteja, yliaaltosuodattimissa, maadoituksissa ja virranrajoittimina (sarjakuristin).

Suurjännitekuristimet ovat yleensä ilmasydämissä ja -jäähdytteisiä kun taas pienjännitekuristimet ovat yleensä rautasydämissä. Pienjännitekuristimet ovat yleensä koteloituja.

9.8 Varokkeet ja varokeautomaatit

9.8.1 Varokkeet

Eräs yksinkertainen tapa suojata verkon johtimia ja laitteita, on käyttää varokkeita oikosulku- ja ylikuormitussuojina. Sähköturvallisuusmääräykset määrittelevät varokkeen siten, että varoke on laite, jossa yhden tai useamman tähän tarkoitukseen valmistetun ja mitoitettun osan sulaminen avaa tietyssä ajassa piirin, johon se on kytketty katkaisemalla virran tämän yllittäessä tietyn arvon.

Varokkeen pääosat ovat varokepesä, vaihdettavissa oleva sulake ja sulakekansi. Varokkeita käytetään pääasiassa silloin, kun katkaisija ja sitä ohjaava rele ei taloudellisista syistä tule kysymykseen. Varokkeiden pääasiallisena käyttöalueena ovat alle 500 V jännitteet nimellisvirtojen ollessa 800 A asti. Keskijännitepuolella varokkeita käytetään lähinnä vain pienten teho- ja jännitemuuntajien oikosulkusuojina. [7]

Rakenteensa perusteella varokkeet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: tulppa-, kahva- ja putkivarokkeet.

Tulppavaroke on tarkoitettu pienjänniteverkkojen yleiskäyttöön. Tulppavaroke käsittää varokepesän, pohjakoskettimen, sulakkeen ja sulakekannen. Tulppasulakkeen katkaisukyky on varsin heikko. Siksi sitä käytetään pienehköille virroille.

Kahvarokkeita käytetään pienjänniteverkossa kuten tulppavarokkeitakin. Kahvasulake kiinnitetään paikoilleen erillisen työkalun kanssa. Kahvarokkeissa ei yleensä ole kosketussuojaa. Suurimmillaan kahvarokkeiden nimellisvirrat ovat luokkaa 800 A ja

niiden katkaisukyky on yli 100 kA. Kahvavarokkeita käytetään tyypillisesti sähköyhtiöissä ja teollisuudessa.

Putkivarokkeita käytetään keskijänniteverkoissa. Sulakelanka on sijoitettu keraamisen putken sisään. Putki on täytetty valokaaren sammuttamista varten kvartsihiekkalla. Sulakelangan palaminen laukaisee toiseen kosketinkupuun sijoitetun iskutapin, jolla voidaan esimerkiksi laukaista kuormanerotin, ja joka samalla osoittaa sulakelangan palaneen poikki. Putkivarokkeita valmistetaan 36 kV saakka. Suurimmat nimellisvirrat ovat 100 - 200 A. /8,9/

9.8.2 Sulaketyypit

Sulakkeita on erilaisia. Rakenteensa perusteella ne voidaan jakaa tulppa-, kahva- ja putkisulakkeisiin kuten vastaavat varokkeetkin. Sulakkeiden yhteydessä on usein kaksikirjaiminen tunnus, joka kertoo minkälaisen kuorman suojaksi sulake on suunniteltu. Kirjaimilla on seuraavat merkitykset: g on sekä oikosulku- että ylikuormitussuojaksi soveltuva, a on vain oikosulkusuojaksi soveltuva, G on vain johdon suojaukseen soveltuva, M on vain moottoripiirin suojaukseen soveltuva ja R on puolijohdesuojaukseen soveltuva sulake. /3/

Tyypillisimmät kirjainyhdistelmät ovat gG ja aM.

Sulakkeet voivat olla joko ns. nopeita tai hitaita. Nopeissa sulakkeissa on tyypillisesti ohut sulakelanka, jolla on korkea sulamispiste. Tällaiset sulakkeet sulavat nopeasti suurilla ylivirroilla.

Hitaiden sulakkeiden sulakelanka on paksumpi. Siihen on tehty heikkoja kohtia, jotka sulavat pitkäaikaisessa ylikuormituksessa. Hitaat sulakkeet eivät reagoi lyhytaikaisiin ylivirtoihin niin nopeasti kuin nopeat sulakkeet.

9.8.3 Varokeautomaatit

Varokeautomaatit eli johdonsuojakatkaisijat ovat ylivirtasuojia, joilla pyritään korvaamaan varokkeen ja sulakkeen tehtäviä. Niissä on magneettipiirin avulla toimiva hetkellislaukaisu suurilla virroilla ja bimetallilaukaisija pienillä virroilla. Rakenteensa vuoksi johdonsuojakatkaisijat ovat käyttökelpoisia myös automaattisen avautumisen jälkeen. Varokeautomaatin laukeamisesta voidaan saada myös hälytys. Tästä syystä ne ovat suosittuja mm. erilaisissa apujännitepiireissä.

LÄHTEET

/1/ ABB Strömberg, Jakelumuuntajat, esite

/2/ ABB Strömberg, Resiblock hartsimuuntajat, esite

/3/ ABB Strömberg, Teknisiä tietoja ja taulukoita, 1990, 586 s.

/4/ Aura L., Tonteri A., Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, WSOY 1995, 446 s.

/5/ Aura L., Tonteri A., Sähkämiehen käsikirja 2, WSOY 1986, 373 s.

/6/ Aura L., Tonteri A., Sähkölaitostekniikka, WSOY 1993, 431 s.

/7/ Elovaara J., Laiho Y., Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo 1988, 487 s.

/8/ Hiltunen V.& Laitinen M., Loistehon kompensointi, Sähköasennukset 2 Sähköurakoitsijaliiton koulutus ja kustannus Oy

/9/ Jaatinen J., Pienjänniteverkon kompensointi, Sähköurakoitsijaliiton koulutus ja kustannus Oy, 1991, 142 s.

/10/ Sähkötekniikan käsikirja, osa 1, Tammi 1975, 673 s.

/11/ Wallin, P., Sähkömittaustekniikan perusteet, Otatieto 1991, 114 s.