

11. TEHOMUUNTAJAT

Tehomuuntajia varten on olemassa kansainvälinen standardi IEC 60076. Tehomuuntajat valmistetaan ja koestetaan tämän standardin mukaan. Useimmat kansalliset standardit pohjautuvat nykyään standardiin IEC 60076, joten ABB Transmit Oy:n muuntajat sellaisenaan täyttävät myös monien muiden kansallisten muuntajastandardien päävaatimukset.

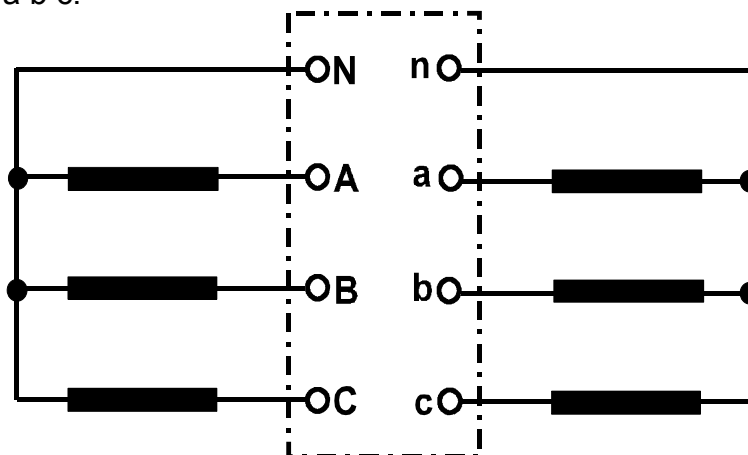
Eurooppalainen standardisointijärjestö CENELEC on myös vahvistanut pienin modifikaatioin IEC 60076 standardisarjan omaksi harmonisointidokumenttikseen nimellä HD 398. CENELECin piirissä standardisointityö on erittäin vilkasta ja on odotettavissa että muuntajia ja niiden varusteita tulee lähitulevaisuudessa koskemaan huomattava joukko EN-standardeja, joiden noudattaminen on EU:n jäsenmaille pakollista.

11.1. Tehomuuntajien liittimien merkitseminen

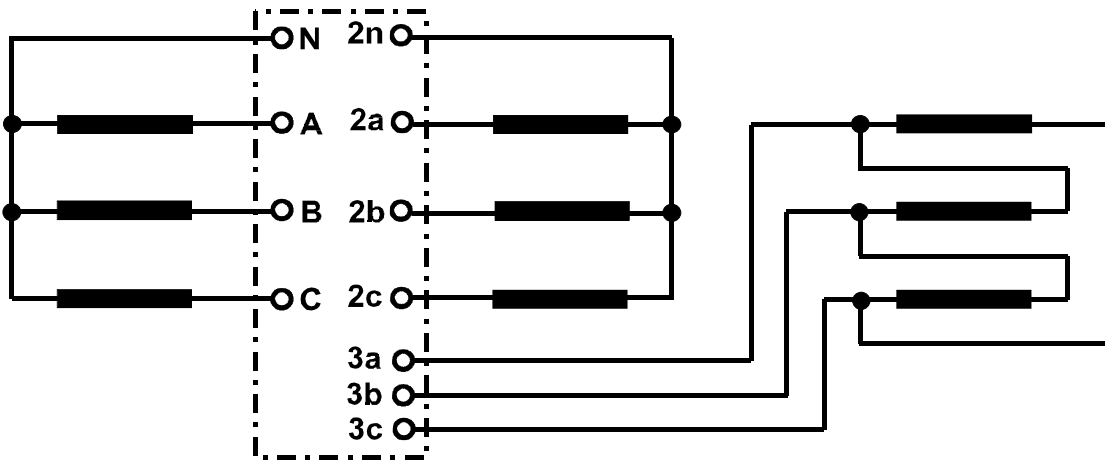
Muuntajan käämitykset numeroidaan suuruusjärjestyksessä siten, että suurinta jännitettä vastaa numero 1. Jos muuntajassa on kaksi yhtä suurta suurinta jännitettä, jompikumpi näistä valitaan käämitykseksi 1. Kolmivaihemuuntajan tasauskäämitykselle, jonka kaikkia vaiheita ei ole tuotu liittimille ja apukäämitykselle annetaan jännitteestä riippumatta suurimmat järjestysnumerot. Muuntajan jännitteiden, virtojen, impedanssien, kapasitanssien jne. symbolien alaindekseinä voidaan käyttää näin määriteltyjä järjestysnumeroita.

Muuntajan liittimet merkitään tämän periaatteen mukaan seuraavasti:

- Kolmivaihemuuntajissa liitinmerkkeinä käytetään suurimman jännitteen käämitykselle isoja kirjaimia A B C (ja X Y Z käämityksen loppupäille, jos ne on tuotu liittimille). Muille käämityksille käytetään vastaavasti pieniä kirjaimia a b c ja x y z. Kolmivaihemuuntajan tähtipiste merkitään kirjaimilla N ja n. Esimerkki kaksikäätymismuuntajan liittimien merkitsemisestä tämän mukaisesti on esitetty kuvassa 11.1a. Yksivaihemuuntajan liitinmerkkeinä käytetään A X ja a x.
 - Jos muuntajassa on enemmän kuin kaksi käämistä, lisätään, jos selvyuden kannalta on tarpeen, liitinmerkin eteen käämityksen järjestysnumero 1, 2, 3 jne. Esimerkki tästä tapauksesta on esitetty kuvassa 11.1b.
 - Säästökytketty käämitys käsitetään liitinmerkkien suhteen kahdeksi eri käämitykseksi. Yhteinen tähtipiste merkitään säästökytkennän suurimman jännitteen mukaan.
 - Jos käämityksessä on liittimille tuotuja väliottoja, merkitään nämä ko. käämityksen liittimeen kuuluvan kirjaimen jälkeen kirjoitetuilla numeroilla 1, 2, 3 jne.
- Liittimien järjestys muuntajan kannella on yläjännitepuolelta katsottuna vasemmalta lukien N A B C ja n a b c.



KUVA 11.1a. Kaksikäätymismuuntajan liitinmerkinnät.



KUVA 11.1b. Kolmikäämitysmuuntajan liitinmerkinnät.

11.2. Tehomuuntajien kytkennät ja rinnankäyttö

Tehomuuntajien kytkennät ja rinnankäyttö

Muuntajien kytkennät ilmoitetaan kirjainsymboleilla ja tunnusluvuilla. Kolmivaihemuuntajan käämityksen kytkentää kuvaamaan käytetään seuraavia kirjainsymboleja:

- Y ; y tähtikytkentä,
- D ; d kolmiokytkentä,
- Z ; z hakatähtikytkentä ja
- III ; iii avoin (kytkemätön) kolmivaihekäämitys.

Iso kirjain, joka merkitään ensimmäiseksi, tarkoittaa suurimman jännitteen käämitystä, pienet kirjaimet pienemmän jännitteen käämityksiä.

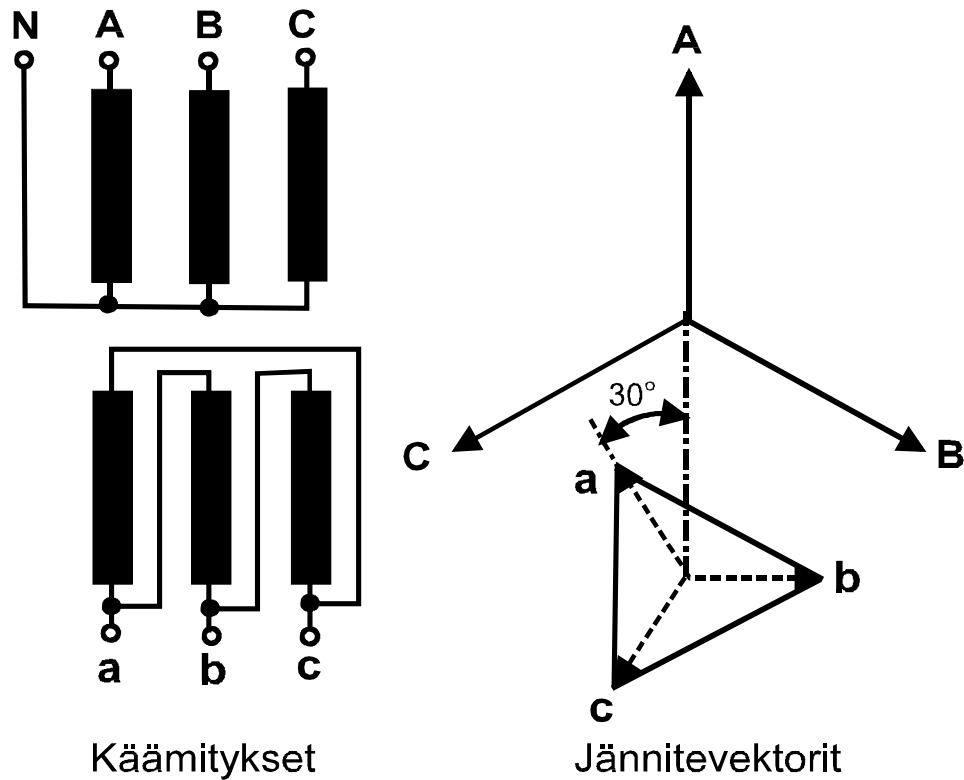
Jos tähti- tai hakatähtikäämityksen tähtipiste on tuotu liittimelle, merkitään tämä kirjaimilla N ja n välittömästi ko. käämityksen kirjainsymbolin jälkeen.

Jos käämityksessä on säästökytkentä, merkitään tämä kirjaimella a käämityksen kirjainsymbolin jälkeen.

Jos käämitys on kytkettävissä kahdelle tai useammalle jännitteelle, kirjoitetaan suurimman jännitteen kirjainsymboli ensin ja sen jälkeen muut kirjainsymbolit sulkeisiin.

Kytkenästä aiheutuvaa vaihesiirtoa kuvaamaan käytetään tunnuslukuina kellotaulun tuntilukemia. Tunnusluku on se kellolukema, jolle alajännitteiden (kuvitellut) vaihejännitevektorit asettuvat, kun samannimisen yläjännitevaiheen (kuviteltu) vaihejännitevektori asetetaan näyttämään 12 "kellotaululla". Tunnusluku 11 esim. tarkoittaa, että alajännite on 30 astetta edellä yläjännitteestä. Jos jännitevektorit ovat samansuuntaiset, on tunnusluku 0. Tunnusluku kirjoitetaan ko. alajännitekäämityksen kirjainsymbolin jälkeen. Pariton tunnusluku syntyy, jos toisen käämityksen kytkentä on tähti ja toisen joko kolmio tai hakatähti, muut yhdistelmät antavat parillisia tunnuslukuja.

Kirjainsymboleja ja tunnuslukuja käyttäen saadaan muuntajan kytkentä ilmoitetuksi lyhyesti ja yksikäsitteiseksi, esim. YNd11, Yy0, Dyn11, Dd0y5, D(D)yn11, Yy0(d11), YNa0 jne. Kuvassa 11.2a on esitetty miten YNd11 kytkentä (yleensä) tehdään.



Käämitykset

Jännitevektorit

KUVA 11.2a. KytKentä YNd11.

Yksivaihemuuntajan käämityksen kytkennän kirjainsymbolit ovat I tai i ja kytkentä edellä olevan periaatteen mukaisesti joko li0 tai li6, säästökytkennässä la0.

Kolmivaihemuuntajan kytkentä määrää muuntajan tähtipisteen kuormitettavuuden, ns. vino-kuormitettavuuden. Jos kytkentä on Dyn –, Yzn – tai Dzn –, voidaan muuntajaa vinokuormittaa jatkuvasti 100 %, jos kytkentä on Yyn–, vain noin 10 %.

Kolmivaihemuuntajan kytkentä ilmoittaa myös muuntajan mahdollisuuden käydä rinnan toisen muuntajan kanssa.

Yleiset rinnankäyntiehdot ovat seuraavat:

- muuntajien nimellistehojen on oltava samaa suuruusluokkaa, tehojen suhde korkeintaan 3:1.
- muuntajien oikosulkuimpedanssien on oltava suunnilleen yhtä suuret, erotus korkeintaan noin 10 %.
- muuntajien nimellisjännitteiden on oltava yhtä suuret, toleranssi muuntosuhteissa korkeintaan 0,5 %.
- rinnankytkettäessä on toisiojännitteiden oltava keskenään samansuuntaiset.

Viimeinen ehto on täytetty, jos muuntajien kytkennöillä on sama tunnusluku ja muuntajien samannimiset liittimet yhdistetään keskenään sekä ensiö- että toisiopuolella. Jos tunnusluvut poikkeavat toisistaan 120° (tai 240°) saadaan toisiojännitteet samansuuntaisiksi kytkemällä toisessa muuntajassa toisiliitin b (tai c) toisen muuntajan a- liittimeen ja muut liittimet syklisesti siirtyen vastaavasti b- ja c- liittimiin. Tällä tavalla voidaan kytkeä rinnan muuntajat tunnuslukuryhmissä 0 – 4 – 8, 6 – 10 – 2, 1 – 5 tai 7 – 11. Tämän lisäksi voidaan vielä, sopivasti risteilemällä ensiö- ja toisiliitännät, kytkeä rinnan ryhmän 1 – 5 muuntajaryhmän 7 – 11 muuntajan kanssa.

11.3. Tehomuuntajien tekniset tiedot

ABB Transmit Oy:n jakelumuuntajatehdas valmistaa jakelumuuntajat sekä erikoismuuntajat ja suurmuuntajatehdas tehomuuntajat. Muuntajat ovat öljy- tai hartsieristeisiä, sisään-/ulosasennettavia yksi- tai kolmivaihemuuntajia. Muuntajahäviöt arvostetaan käyttöolosuhteista riippuen eri tavoin ja lisäksi arvosteluperusteet ovat maakohtaisia. Tämän takia on jakelumuuntajista esisuunniteltu ja standardoitu useita häviösarjoja, jotta kilpailukykyinen vaihtoehto aina löytyisi.

Sarjumuuntajien tekniset arvot on annettu seuraavissa taulukoissa.

Öljyeristeiset jakelumuuntajat

Taulukko 11.3a. Tekniset arvot: Häviösarja 1. Häviöt normaalit. Käämimateriaali alumiini tai alumiini/ kupari.

Teho kVA	Muuntosuhde V/V	Kyt-kentä	P_0 W	P_k W	Z_k %	Z_0 %	I_0 %	Kok.paino kg	Öljyä kg
315	20500±2x2,5%/410	Dyn11	600	4500	4,5	4,6	0,8	1220	270
500	20500±2x2,5%/410	Dyn11	720	6600	5,0	5,2	0,7	1650	340
630	20500±2x2,5%/410	Dyn11	890	7200	5,0	5,2	0,7	1800	380
800	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1200	8500	5,5	5,7	0,5	2240	450
1000	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1450	10200	5,5	5,7	0,5	2640	520
1250	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1600	11500	5,5	5,7	0,4	2955	580
1600	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1840	14100	5,5	5,7	0,4	3680	760
2000	20500±2x2,5%/410	Dyn11	2130	16000	6,0	6,4	0,3	4200	860
2500	20500±2x2,5%/690	Dyn11	2550	18000	6,0	6,4	0,3	5150	1040

Taulukko 11.3b. Tekniset arvot: Häviösarja 2. Alennetut tyhjäkäyntihäviöt. Käämimateriaali kupari.

Teho kVA	Muuntosuhde V/V	Kyt-kentä	P_0 W	P_k W	Z_k %	Z_0 %	I_0 %	Kok.paino kg	Öljyä kg
30	20500/410	Yzn11	103	585	3,9	1,2	1,8	330	90
50	20500/410	Dyn11	140	885	3,9	3,9	1,1	380	105
100	20500/410	Dyn11	220	1485	3,8	3,8	1,1	535	125
200	20500±2x2,5%/410	Dyn11	420	2295	4,0	4,0	0,9	1000	190
315	20500±2x2,5%/410	Dyn11	600	4500	4,5	4,6	0,8	1400	245
500	20500±2x2,5%/410	Dyn11	720	6600	5,0	5,2	0,7	1650	310
800	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1200	8500	5,5	5,7	0,5	2380	400
1000	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1450	10200	5,5	5,7	0,5	2780	600

Edellisten lisäksi on standardisoitu häviösarja 3, jossa on alennetut kuormitushäviöt. Tämän sarjan muuntajia käytetään Suomessa jonkin verran teollisuudessa häviösarjan 1 ja 2 sijasta.

Jakelumuuntajien muuntosuhdetta voidaan säätää $\pm 2 \times 2,5$ % yläjännitepuolelle sijoitetulla väliottokytkimellä.

Pylväsmuuntajissa 30...100 kVA on I-pylväskiinnittimet, joten asennus on mahdollista joko I- tai H-pylväeseen. Näissä muuntajissa ei yleensä ole väliottokytkintä.

Jakelumuuntajat valmistetaan pääsääntöisesti hermeettisesti suljettuna ja perinteisiä hengittäviä erillisellä paisuntasäiliöllä varustettuja muuntajia käytetään nykyään vain tehoalueen

yläpäässä. Taulukon arvot pätevät hermeettisille muuntajille, hengittäville pätevät samat arvot paitsi että painot muuttuvat hieman.

Taulukoissa annettu nolaimpedanssi Z_0 jakaantuu resistiiviseen ja reaktiiviseen osaan suunnilleen samassa suhteessa kuin vastaava Z_k -arvo, lukuunottamatta Yzn11 kytkettyjen muuntajien Z_0 joka on melkein puhtaasti resistiivinen.

Öljeristeiset tehomuuntajat, 3150...10000 kVA

Taulukko 11.3c. Tekniset arvot: Häviösarja 1. Häviöt normaalit. Käämimateriaali alumiini.

Teho kVA	U_n kV/kV	P_0 W	P_k W	Z_k %	Kok pai- no kg	Öljyä kg	Kulje- tus- paino
3150	20±2x2,5%/10,5	3500	25000	7,15	6350	1450	6350
	20±9x1,67%/10,5	3800	25500	7,15	8050	2300	6700
4000	20±2x2,5%/10,5	4400	29000	7,15	7400	1650	7400
	20±9x1,67%/10,5	4500	30000	7,15	9200	2570	7800
5000	20±2x2,5%/10,5	4900	36500	7,15	8550	1850	6900
	20±9x1,67%/10,5	5000	37500	7,15	10300	2850	8550
6300	20±2x2,5%/10,5	5600	48000	7,15	9900	2070	7800
	20±9x1,67%/10,5	5700	48500	7,15	11600	3100	9500
8000	20±2x2,5%/10,5	6500	57500	8,35	12200	2400	9600
	20±9x1,67%/10,5	6300	68000	8,35	13800	3380	10600
10000	20±2x2,5%/10,5	7300	77500	8,35	13800	2750	10300
	20±9x1,67%/10,5	6500	78000	8,35	16700	3480	13400

Muuntajissa on joko väliottokytkinsäätö $\pm 2 \times 2,5$ % (ylempi rivi taulukoissa) tai käämikytkinsäätö esim. $\pm 9 \times 1,67$ % (alempi rivi taulukoissa).

Jos alajännite on joku muu kuin 10,5 kV, esim. 6,3 kV ja yläjännite joku muu kuin 20 kV, kuitenkin korkeintaan 24 kV, ovat häviöt ja painot edelleen ylläolevien taulukoiden mukaiset. Kun yläjännite on suurempi kuin 24 kV muuttuvat taulukkoarvot.

Muuntajat ovat hengittävää rakennetta erillisellä paisuntasäiliöllä. Säiliö on aaltolevysäiliö väliottokytkinmuuntajissa 4000 kVA saakka, muissa muuntajissa on tyhjänkestävä radiaattorisäiliö.

Muuntajien jäähditys tapahtuu luonnollisella öljyn- ja ilmankierrolla, ONAN. Radiaattorisäiliöiden jäähdityskykyä voidaan lisätä käyttämällä tuulettimia, ONAF, jolloin muuntajaa voi kuormittaa suunnilleen yhden taulukkokypälän verran suuremmalla teholla.

Taulukkomuuntajissa on kytkentä Dyn11. Arvot pätevät likimain myös kytkennällä YNd11 tai YNyn0.

Muuntajien nolaimpedanssit ovat Dyn-kytkennässä noin 1,2 kertaa vastaava Z_k -arvo, YNd-kytkennässä noin 0,8 kertaa vastaava Z_k -arvo ja YNyn-kytkennässä on Z_0 hyvin suuri, suuruusluokkaa 50...70 %.

Öljyeristeiset 110 kV, 10...63 MVA tehomuuntajat (KATI)

Taulukko 11.3d. Tekniset arvot.

Teho MVA	P_0 kW	P_k kW	Z_k %	S_0 %	Painot/ kg	
					Kok.	Öljy
10	9,0	51	10	0,30	25000	6000
16	11,0	74	10	0,25	36000	9500
20	13,5	87	10	0,20	36000	9600
25	15,5	100	10	0,20	40000	9700
31,5	18,0	122	10	0,20	46500	11100
40	23,5	146	12	0,20	56500	13200
50	27,0	175	12	0,20	63000	14800
63	32,0	210	12	0,20	73000	17300

Jäähdytystapa on ONAN tai ONAN/ONAF. ONAN/ONAF-jäähdytteisissä muuntajissa on öljynlämpömittarin ohjaamat tuulettimet. Näillä muuntajilla saavutetaan nimelliskuormitettavuus ONAF-jäähdytyksellä ja n. 60-70 % kuormitettavuus ONAN-jäähdytyksellä.

Taulukon arvot ovat suuntaa-antavia ja ne muuttuvat kehityksen mukana. Tarkempia arvoja on saatavissa luetteloista ja muuntajan valmistajalta.

Taulukko 11.3e. Muuntajien jännitteet ja kytkentä.

Yläjännite	110 ±9x1,67 % kV
Alajännite	21 tai 10,5 kV
Kytkentätunnus	YNd11 tai YNyn0

110 kV, 10...63 MVA tehomuuntajien nolaimpedanssit Z_0 ovat YNd11 kytkennällä noin 8...10 % yläjännitepuolella ja YNyn0 kytkennällä noin 45...55 % yläjännitepuolella ja noin 50...60 % alajännitepuolella.

11.4. Tehomuuntajien vastusarvojen laskeminen luetteloarvojen perusteella

Tehomuuntajien vastusarvot annetaan luetteloissa ja arvokilvissä yleensä prosentteina muuntajan nimellisimpedanssista Z_N , joka on

$$Z_N = \frac{U_N [\text{V}]}{I_N [\text{A}]} \quad [\Omega]/\text{vaihe} \quad , \quad (1)$$

jossa U_N = muuntajan nimellisjännite ja
 I_N = muuntajan nimellisvirta.

Kolmivaihemuuntajan nimellisjännitteellä tarkoitetaan yleisesti pääjännitettä, joten kolmivaihemuuntajan nimellisimpedanssi on

$$Z_N = \frac{U_N [\text{V}]}{\sqrt{3} I_N [\text{A}]} \quad [\Omega]/\text{vaihe} . \quad (2)$$

Yleensä on vain oikosulkuimpedanssi Z_k prosentteina (ja mahdollisesti nolaimpedanssi Z_0) annettu muuntajan arvokilvessä.

Oikosulkuresistanssi R_k prosentteina saadaan kaavasta

$$R_k = \frac{100 P_k [\text{W}]}{S_N [\text{VA}]} \quad \% \quad , \quad (3)$$

jossa P_k = kuormitushäviöt nimellisvirralla ja
 S_N = muuntajan nimellisteho.

Oikosulkureaktanssi X_k prosentteina on laskettavissa kaavasta

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} . \quad (4)$$

Vastusarvoille voidaan myös käyttää suhteellisia arvoja, jotka merkitään alaindeksillä r , siis Z_{kr} , R_{kr} ja X_{kr} ja jotka ilmoittavat kuinka mones osa vastus on muuntajan nimellisimpedanssista Z_N . Suhteellisten vastusarvojen lukuarvot ovat näin ollen sadasosa vastaavista prosenttiarvoista.

Jos vastusarvot on laskettava ohmeina vaihetta kohti pätevät seuraavat kaavat:

$$Z_{k1} = Z_{kr} \cdot Z_{1N} \quad \Omega / \text{vaihe}, \quad (5)$$

$$R_{k1} = R_{kr} \cdot Z_{1N} \quad \Omega / \text{vaihe ja} \quad (6)$$

$$X_{k1} = X_{kr} \cdot Z_{1N} \quad \Omega / \text{vaihe}. \quad (7)$$

Kaavat antavat vastusarvot redusoituina ensiöpuolelle; jos halutaan redusoida toisiopuolelle on ensiöpuolen vastusarvot kerrottava muuntosuhteen μ neliöllä, tai sijoitettava toisiopuolen nimellisimpedanssi Z_{2N} yllä oleviin kaavoihin.

$$\mu^2 = \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}} \right)^2 . \quad (8)$$

Kaavat voidaan (kolmivaihemuuntajia varten) saattaa seuraavaan muotoon:

$$Z_{k1} = Z_{kr} \cdot \frac{(U_{1N} [\text{kV}])^2}{S_N [\text{MVA}]} \quad [\Omega] / \text{vaihe} \quad , \quad (9)$$

$$R_{k1} = R_{kr} \cdot \frac{(U_{1N} [\text{kV}])^2}{S_N [\text{MVA}]} \quad [\Omega] / \text{vaihe} \quad \text{ja} \quad (10)$$

$$X_{k1} = X_{kr} \cdot \frac{(U_{1N} [\text{kV}])^2}{S_N [\text{MVA}]} \quad [\Omega] / \text{vaihe} \quad , \quad (11)$$

jossa U_{1N} = nimellisjännite (pääjännite) ja
 S_N = nimellisteho.

Muuntajien vastusarvoja tarvitaan laskettaessa jännitteen alennusta, oikosulkuvirtoja ja maasulkuvirtoja. Muuntajassa syntyvä suhteellinen jännitteenalennus U_{hr} saadaan likimain kaavasta:

$$U_{hr} \approx \frac{I}{I_N} (R_{kr} \cos \varphi + X_{kr} \sin \varphi), \quad (12)$$

jossa I = kuormitusvirta,
 $\cos \varphi$ = kuormituksen tehokerroin.

Symmetrinen kolmivaiheoikosulku välittömästi muuntajan toisioliittimissä aikaansaa oikosulkuvirran I_k

$$I_k \approx \frac{U_N}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{I_N}{Z_{kr}} \quad (13)$$

edellyttäen, että muuntaja on pieni (jakelumuuntaja) syöttävän verkon oikosulkutehooon nähden. Vastaavasti syntyy yksivaiheisessa oikosulussa oikosulkuvirta (maasulkuvirta) I_{k1v}

$$I_{k1v} \approx \frac{3 \cdot I_N}{2 Z_{kr} + Z_{0r}} \quad , \quad (14)$$

jossa Z_{0r} = suhteellinen nolaimpedanssi.

Laskemalla standardijakelumuuntajien taulukkoarvoilla voidaan todeta mm. että Yzn11 -kytketyn muuntajan I_{k1v} on noin 1,3 kertaa suurempi kuin vastaava I_k , kun taas Dyn11 -kytketyn muuntajan I_{k1v} on vähän pienempi kuin vastaava I_k .

Oikosulku- ja maasulkuvirtojen alkuhetken huippuarvot voivat hetkellisesti nousta yllä olevien kaavojen avulla laskettavien jatkuvuustilan virtoihin nähden 2...2,5 -kertaisiksi.

11.5. Tehomuuntajien kytkentävirtasysäys

Muuntajan jännitteen ja magneettivuon välinen vaihesiirtokulma on jatkuvuustilassa noin 90° . Kun jännitteetön muuntaja, jonka sydämessä vuo on noin nolla, kytketään verkkoon, tapahtuu siirtyminen tähän jatkuvuustilaan aina (pienemmän tai suuremman) tasoitusilmiön kautta johtuen rautasydämen magneettisesta hitaudesta. Tasoitusilmiö on suurimmillaan, jos jännitteen hetkellisarvo kytkemishetkellä on nolla. Vuo lähtee tällöin nousemaan sinimuotoisena epäsymmetrisesti nolasta ensimmäiseen huippuarvoonsa, joka tällöin tulee olemaan kaksinkertainen jatkuvuustilan vuon huippuarvoon nähden, tai jopa vähän suurempi, jos sydämessä kytkemishetkellä on samansuuntainen remanenssivuo. Tällä vuontiheydellä muuntajan sydän kyllästyy ja magnetoimisvirta nousee voimakkaasti. Tätä ilmiötä kutsutaan *kytkentävirtasysäykseksi*. Piirissä olevan resistanssin ansiosta vaimenee virta nopeasti ja saavuttaa jatkuvuustilaa vastaavan pienen arvonsa noin sekunnin kuluttua. Jakelumuuntajilla on todettu ensiövirran ensimmäisen huippuarvon olevan pahimmassa tapauksessa noin 8...12 kertaa muuntajan nimellisvirran huippuarvo, ja vaimennuksen puoleen arvoonsa tapahtuvan noin 0,30...0,05 sekunnissa. Virta on melkein täysin induktiivinen. Kytkentävirtasysäys voi aiheuttaa muuntajan suojalaitteiden toimimisen ellei tätä ilmiötä ole otettu huomioon sulakkeiden valinnassa tai releitten asettelussa.

11.6. Yliaallojen vaikutus muuntajan kuormitettavuuteen

Muuntajan kuormitus nimellisarvoilla edellyttää, että jännite ja virta ovat sinimuotoiset. Verkon epälineaariset osat, lähinnä suuntaajat, vääristävät sinikäyrän, jolloin muuntajan häviöt kasvavat ja kuormitettavuus pienenee. Esimerkiksi tasavirtamoottorikäytössä ja taajuusmuuttajakäytössä on tämä otettava huomioon syöttömuuntajan mitoituksessa.

Jännitekäyrän yliaallot suurentavat muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä. Tämä vaikutus on kuitenkin yleensä niin pieni, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon lukuunottamatta tapausta, jossa muuntaja on taajuusmuuttajan ja moottorin välissä, jolloin jännitteen epäsinimuotoisuus vaikuttaa rautasydämen mitoitukseen, ja tarvitaan aina erikoismuuntaja.

Tässä esitetty yksinkertaistettu häviöiden laskentamenetelmä on normitettu jakelumuuntajille 2500 kVA:n tehoon asti CENELECin julkaisussa HD 428.4 S1-1994 ("DETERMINATION OF THE POWER RATING OF A TRANSFORMER LOADED WITH NON-SINUSOIDAL CURRENTS"), jossa on annettu ohjeellisena myös jäljempänä mainitut q -arvot. Tehoaluetta rajaamatta ja teoreettisemmalta pohjalta laskentamenetelmiä käsitellään IEC julkaisussa 61378-1 ("CONVERTER TRANSFORMERS-Part 1: TRANSFORMERS FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS"), jossa esitettyjen menetelmien erona on että niissä tarkastellaan käämien ja muiden rakenneosien häviöiden kasvua erikseen erityyppisille muuntajarakenteille. Sitä voi soveltaa käytännössä vain muuntajavalmistaja, koska mm käämien osalta tarvitaan teoreettisesti lasketut lisähäviöt ja lisäksi on tunnettava muuntajan käämien järjestely toisiinsa nähden.

Virtakäyrän yliaallot suurentavat muuntajan kuormitushäviöitä, koska taajuudesta riippuva pyörrevirtojen ja virranahdon aiheuttama osuus kuormitushäviöistä kasvaa. Tämä kasvu on suuntaajakäytössä niin suuri, että muuntajan kuormitettavuus yleensä laskee huomattavasti. Muuntaja on valittava siten, että kuormitushäviöt suuntaajakäytössä eivät ylitä kuormitushäviöitä muuntajan (sinimuotoisella) nimellisvirralla I_N .

Tämä edellyttää, että kuormitusvirran perusaalto I_1 täyttää ehdon

$$\frac{I_1}{I_N} \leq \sqrt{\frac{1 + a_1}{\left[\sum_{n=1} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 + \sum_{n=1} n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]}}, \quad (1)$$

jossa I_1 = suuntaajakäytön virran perusaalto,
 n = yliaallon järjestysluku 1, 5, 7, 11, 13 jne. ,
 I_n = n:s yliaaltovirta,
 a_1 = virranahtautuman aiheuttama käämiresistanssin isäys perusaallolla
 50 Hz ja
 q = virranahtautuman aiheuttama käämiresistanssin lisäyksen taajuusriippuvuus.

Virranahtautuman taajuusriippuvuus on muuntajan rakenteellinen muuttuja, jonka arvoon vaikuttaa, missä kohtaa muuntajaa lähäviöt syntyvät. Foliokäämilliselle jakelumuuntajalle sen arvo on noin 1,5 ja lankakäämeihin varustetulle muuntajalle noin 1,7. Jos ei tiedetä muuntajan käämityyppiä, voidaan käyttää arvoa 1,7.

Vaihtoehtoisesti voidaan kirjoittaa kuormitusvirran tehollisarvolle I (perusaalto ja yliaallot) ehto:

$$\frac{I}{I_N} \leq \sqrt{\frac{1 + a_1}{\left[1 + \frac{a_1}{\sum_{n=1} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \cdot \sum_{n=1} n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]}}}. \quad (2)$$

Hakasulkulausekkeen arvo riippuu oleellisesti lähäviökertoimen a_1 :n arvosta. Jos yliaaltopitoisuus kuormitusvirrassa on suuri, on aiheellista käyttää erikoismuuntajaa, jonka a_1 arvo on pieni.

Kertoimen a_1 arvoa voidaan arvioida jakelumuuntajan koon ja toisiojännitteen perusteella likimain

$$a_1 = 0,04 \frac{S_N}{U}, \quad (3)$$

jossa S_N = muuntajan nimellisteho MVA (≤ 4 MVA) ja
 U = muuntajan toisiojännite kV ($\leq 1,1$ kV).

a_1 arvo on normaali-jakelumuuntajilla 200 kVA muuntajassa noin 0,02 ja kasvaa suunnilleen muuntajan tehon suhteessa, ollen 2000 kVA muuntajassa noin 0,19, kun toisiojännite on 400 V. 525 V ja 693 V muuntajilla lähäviökertoimen on varsinkin tehoalueen yläpäässä alhaisempi, johtuen pienemmästä nimellisvirrasta. Se muuttuu 200 kVA:n arvosta 0,02 likimain

tehon suhteessa siten, että arvo 0,19 saavutetaan 525 V:lla 2500 kVA:n ja 693 V:lla 3150 kVA:n teholla.

Tasavirtakäytössä on esim. 6-pulssisillan yliaaltojen maksimiarvot teoreettisesti $I_n = I_1/n$. Käytännössä kommutoinnin vaikutuksesta ja piirin induktanssin ansiosta varsinkin korkeamman järjestysluvun yliaallot jäävät pienemmiksi. Tyypilliset hakasulkulausekkeen arvot tälle käytölle ovat luokkaa

$$\sum_{n=1} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 = 1,1 \dots 1,16 \quad (4)$$

ja

$$\sum_{n=1} n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 = 5 \dots 6 \quad (5)$$

joten esim. 200 kVA muuntajan perusaallon virta saa olla korkeintaan noin 90 % (kokonaisvirran tehollisarvo noin 95 %) muuntajan nimellisvirrasta ja 2000 kVA muuntajan perusaallon virta korkeintaan noin 73 % (kokonaisvirran tehollisarvo noin 78 %) muuntajan nimellisvirrasta.

Kun muuntaja on taajuusmuuttajan ja moottorin välillä, aikaansaa vääristynyt jännite suurempia virtayliaaltoja kuin tasavirtakäytöissä ja muuntajan kuormitettavuus laskee vielä pienempään arvoon. Kuten edellä mainittiin tässä käytössä on joka tapauksessa käytettävä erikseen mitoitettua muuntajaa.

Sähköisen infrapunakuivaimen säätö tapahtuu leikkaussäätönä vastarinnankytketyillä tyristorikytkimillä. Syöttömuuntajan kuormitusvirta pienenee, $\cos \varphi$ huononee ja yliaaltosisältö kasvaa säädettäessä kuivaimen tehoa pienemmäksi. Syöttömuuntajaa ei kuitenkaan tarvitse ylilimitoittaa, koska kuormitusvirran pieneminen kompensoi riittävästi yliaaltosisällön suurenemisesta aiheutuvan häviöiden kasvun. Jos muuntajalla on muuta kuormaa, ei sen suuruus saa kasvaa vaikka infrapunakuivaimen ottama kuormitusvirta pienenee tehoa säädettäessä.

11.7. Tehomuuntajien suoja- ja valvontalaitteet

Muuntoasemalla olevien differentiaali-, ylivirta-, maasulku- yms. suojiin lisäksi itse muuntajassa on suojausta ja valvontaa varten seuraavanlaisia laitteita:

- Paisuntasäiliö, jonka tilavuus vastaa öljyn minimi- ja maksimilämpötiloja vastaavien tilavuuksien erotusta, ja joka huolehtii siitä, että varsinainen muuntajasäiliö on aina täynnä öljyä.
- Kaasurele, joka toimii öljyeristeisten tehomuuntajien suojana silloin, jos muuntajassa esiintyy sisäisiä vikoja, kuten paikallista ylikuumentumista, purkaus- tai valokaari-ilmiöitä tai sisäisiä oikosulkuja. Kaasureleen toiminta perustuu muuntajassa tapahtuvaan kaasunkehitykseen tai suureen vian aiheuttamaan öljysyöksyyn. Releessä on hälytys- ja laukaisukosketin. Laukaisukosketin kytketään aina muuntajan pääkatkaisijoitten laukaisupiiriin.
- Öljyn lämpötilan mittari, joka mittaa muuntajassa olevan öljyn huippulämpötilaa. Mittarissa on tavallisesti aseteltavat hälytys- ja laukaisukoskettimet.
- Öljynkorkeuden osoitin, joka on tavallisesti sijoitettu paisuntasäiliön pätyyn, näyttää paisuntasäiliössä olevan öljyn pinnan korkeuden. Osoitin on suurissa muuntajissa varustettu ylä- ja alarajan hälytyskoskettimella.
- Ilmankuivain, jossa muuntajan hengittämä ilma öljyn tilavuuden vaihdellessa johdetaan sisäänhengitysvaiheessa kuivausaineen läpi. Kuivausaine sitoo itseensä hengitysilmassa olevan kosteuden.
- Käämikytkimen suojarle, joka suojaa käämikytkintä vaurioitumiselta. Suojareleessä oleva laukaisukosketin kytketään muuntajan pääkatkaisijoiden laukaisupiiriin.

Edellä mainitut suoja- ja valvontalaitteet ovat vakiovarusteita 110 kV, 10..63 MVA tehomuuntajissa. Jakelumuuntajissa on öljynkorkeuden osoitin vakiovarusteena. Suuremmat jakelumuuntajat suositellaan varustettaviksi myös kaasureleellä, ilmankuivaimella sekä öljyn lämpömittarilla.

Lisävarusteena muuntajille voidaan toimittaa mm:

- Käämin lämpötilan kuvaaja, joka osoittaa käämityksen kuumimman kohdan lämpötilaa.
- Öljyn ja käämin lämpötilan kaukomittausanturi, joka voidaan kytkeä esim. valvomossa olevaan osoitinkojeeseen.
- Muuntaja voidaan haluttaessa varustaa lämpömittarilla, jossa on käytön valvontaa varten mA- ulostulo (4...20 mA) tai potentiometrianturi.
- Muuntajan lämpötiloja (esim. käämien hot spot) voidaan seurata myös optisen lämpötilamittauksen avulla. Tarvittavat anturit ja ulostulot saadaan erikoistilauksesta muuntajaan.
- Ylipaineventtiili, joka estää paineen nousun liian suureksi muuntajan säiliössä, jos muuntaja vaurioituu vakavasti. Ylipaineventtiili voidaan varustaa laukaisukoskettimella, joka kytketään muuntajan pääkatkaisijoiden laukaisupiiriin.

11.8. Kuivamuuntajat

Ympäristön suojelun vaatimukset muuntajatekniikan suhteen ovat nousseet. Vaikka öljymuuntajat muodostavatkin sähköisten ominaisuuksiensa ansiosta hyvän teknisen ratkaisun keskijännitealueella, on niiden käyttö monessa tapauksessa rajoitettu tai vaatii erikoisia palosuojajärjestelyjä. Nykyaikainen Resibloc-hartsimuuntaja on vaihtoehto palovaarallisiin tiloihin pienen palokuormansa ja itsestäänsammuvuutensa ansiosta. Itsestäänsammuvuus on IEC 60092-101:n mukainen.

Kuivamuuntajat mitoitetaan yleisesti standardin IEC 60726 ja CENELECin julkaisun HD 464 S1 mukaan. On huomattava että kyseiset standardit sallivat teknisesti vaatimattomampiakin ratkaisuita (mm perinteinen lakkapaperieristeinen avokääminen kuivamuuntaja, jolle jo pienikin kosteus voi olla vaarallinen) ja valinta on viimekädessä ostajan asiantuntemuksen varassa. On erityisesti syytä huomioida kylmään ympäristöön tulevien muuntajien osalta, että standardi sallii perusversiona rakenteen, jolle on sallittu vain -5 °C alin ympäristölämpötila ja että standardin mukainen vaativin luokka on suunniteltu vain -25 °C lämpötilaan..

Resibloc-muuntajan ainutlaatuinen epoksi-lasikuitueristys antaa erittäin hyvän suojan kosteutta ja vaikeita ympäristöolosuhteita vastaan, ne mm. kestävät normaalirakenteisena -40 °C pakkasta ja äärimmäisiä kuormitusvaihteluita ilman halkeamia.

Hartsieristeen ja kerroskäämirakenteen ansiosta Resibloc- muuntajien jännitekestoisuus on erittäin hyvä. Eristys on mitoitettu niin että muuntajat kestävät samat koejännitteet kuin öljyeristeiset muuntajat ja tämä pätee myös syöksyjännitteellä. Jokaiselle muuntajalle suoritetaan kappalekokeena osittaispurkausmittaus korotetulla jännitteellä.

Muuntajia valmistetaan 36 kV käyttöjännitteelle saakka ja noin 15 MVA maksimiteholle. Alajännitekäämin nimellisjännite on yleensä $\leq 1,1$ kV, mutta on mahdollista tehdä muuntajia aina 12 kV alajännitetasolle saakka.

Yläjännitekäämissä vakioalue ulosotoille on $\pm 2 \times 2.5$ %.

Käämien eristeluokka on F ja käämien lämpeneminen sen mukaan enintään 100 K.

Vakiorakenteisten muuntajien kotelointiluokka on IP 00. Jos vaaditaan kosketussuojausta tai suojausta tippuvaa vettä vastaan, voidaan muuntajat toimittaa asennettuina kaappeihin, joiden kotelointiluokka on IP 21 tai IP 23. Koteloinnin jäähdytystä heikentävä vaikutus on huomioitu muuntajan mitoituksessa.

Hartsimuuntajien ylikuormitettavuus on julkaisun IEC 60905 "Loading guide for dry-power transformers" mukainen.

Muuntajat toimitetaan vakiona kaksikanavaisella PTC suojauksella varustettuna. Lisäksi voidaan sovittaessa toteuttaa lämpötilan valvonta myös kapillaarilämpömittarilla tai PT 100 anturilla.

Taajuusmuuttaja-, tasasuuntaaja- ja syklokäyttöihin valmistamme muuntajia, joiden mitoituksessa on otettu huomioon yliaaltojen vaikutus. Ne voivat olla myös 3- tai useampi käämisiä.