

Lauri Aaltonen

PIENJÄNNITEVERKON JÄNNITTEEN- SÄÄTÄJÄT – JAKELUMUUNTAJAN KÄÄMIKYTKIN

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Lauri Aaltonen: Pienjänniteverkon jännitteensäätäjät – Jakelumuuntajan käämikytkin
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma
Pääaine: Sähkövoimatekniikka
Tarkastaja: professori Sami Repo
Toukokuu 2020

Pienjänniteverkkoon liitetty hajautettu tuotanto, joka koostuu pääasiassa katolle asennettavista aurinkovoimaloista, tulee yleistymään seuraavien vuosikymmenten aikana. Aurinkopaneelien hankintakynnystä on ja tulee madaltamaan paneelien hyötysuhteiden kasvu sekä hinnan lasku kuin myös poliittinen päätöksenteko sekä kuluttajien yhä ympäristöystävällisempään suuntaan hakeutuva käyttäytyminen.

Työn tarkoituksena on käsitellä jakelumuuntajan ja käämikytkimen toimintaa sekä miten käämikytkimellä voidaan vaikuttaa jännitteenlaatuun pienjänniteverkossa. Käämikytkin vaikuttaa muuntajan toisiopuolen jännitetasoon vaihtamalla, jännitteellisessä tilassa, muuntajan käämitys-suhdetta. Käämikytkintä ohjataan erilaisilla mittauksilla, joiden perusteella päätellään käämikytkimen toiminta kyseisessä tilanteessa.

Työn alussa perehdytään muuntajan toimintaperiaatteeseen, kytkentöihin, jännitehäviöihin sekä muuntajan rakenteeseen. Seuraavaksi keskitytään käämikytkimen rakenteeseen, kytkentäperiaatteeseen, välitöjärjestelyihin, nimellisarvoihin, ohjaukseen sekä valintakriteereihin. Viimeisimmässä osassa käsitellään jännitteensäätöä yleisellä tasolla, miten jännitteensäätö voidaan toteuttaa käämikytkintä eri tavoin ohjaten, käämikytkimellisten muuntajien yhteistoimintaa sekä sarjassa että rinnan. Luvun lopussa sivutaan myös moderneja käämikytkimen säätömenetelmiä. Lopussa esitetään yhteenveto työstä.

Käämikytkimellä varustettu jakelumuuntaja voisi tulevaisuudessa vastata hajautetun tuotannon aiheuttamiin jänniteongelmiin perinteisten menetelmien kuten verkon vahvistamisen sijaan. Tämä vaatii kuitenkin suuremman määrän hajautettua tuotantoa jakeluverkkoon ollakseen järkevä hankinta. Sähköautojen yleistyessä, jos latauksenhallintaa ei ole älykkäästi toteutettu, tulee kasvamaan myös kuormitus- sekä tuotantotilanteiden välinen ero entisestään. Tulevaisuudessa saatetaan myös alkaa käyttämään erilaisia tilaestimointi- ja neuroverkkoratkaisuja pienjänniteverkon asiakkaiden jännitteiden estimoinneissa, joiden perusteella ohjataan käämikytkintä.

Avainsanat: käämikytkin, hajautettu tuotanto, jännitteensäätö, pienjänniteverkko

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. JAKELUMUUNTAJAN TOIMINTA.....	2
2.1 Muuntajan sijaiskytkentä	2
2.2 Kolmivaihemuuntajan kytkennät.....	4
2.3 Jakelumuuntajan rakenne	5
3. KÄÄMIKYTKIMEN TOIMINTA.....	7
3.1 Käämikytkimen kytkentäperiaate.....	7
3.2 Nykypäivän käämikytkinratkaisut.....	9
3.2.1 Resisttiivinen öljytyypin käämikytkin.....	9
3.2.2 Reaktiivinen öljytyypin käämikytkin	10
3.2.3 Tyhjiötyyppinen käämikytkin	11
3.3 Tavallisimmat väliottojärjestelyt.....	11
3.4 Esimerkki reaktiivisen käämikytkimen kytkentäsekvenssistä	13
3.5 Käämikytkimen nimellisarvot	16
3.6 Käämikytkimen testaus	17
3.7 Valintakriteerit	18
3.8 Käämikytkimen automaattinen ohjaus	19
4. JÄNNITTEENSÄÄTÖ JAKELUVERKOSSA	21
4.1 Jännitteen nousu ja lasku.....	22
4.2 Jännitteen vaihtelun lievennyskeinot.....	23
4.3 Käämikytkimelliset strategiat jännitteensäätöön	25
4.3.1 Johtohäviön kompensointi.....	26
4.3.2 Käämikytkimet sarjassa	27
4.3.3 Käämikytkimet rinnan.....	29
4.3.4 Moderni käämikytkinsäätö.....	31
5. YHTEENVETO.....	33
LÄHTEET	35

1. JOHDANTO

Viimeisten vuosikymmenten sisällä on ilmaston lämpeneminen noussut yhä suuremmaksi puheenaiheeksi niin politiikassa kuin tekniikan aloillakin. Perinteisten tuotantomuotojen, kuten hiilivoimaloiden, rinnalle on alkanut ilmestymään kuluttajien omaa tuotantoa. Suomessa uusiutuvat sähköntuotantomuodot kuten tuulivoima ja aurinkovoima ovat tällä hetkellä sähköntuotantomuodoista suurimmassa kasvussa ja aurinkovoimaita onkin jo otettu paljon käyttöön kotitalouksissa ja muissa rakennuksissa, joissa ennen on ollut vain sähkön kulutusta.

Tämä hajautetun sähköntuotannon määrän kasvu vaikuttaa jännitteeseen pienjänniteverkossa, koska verkko on suunniteltu siten että oletuksena on, että kuluttajilla ei ole omaa tuotantoa. Jos on todella kirkas päivä, niin katoilla olevat aurinkopaneelit voivat aiheuttaa pienjänniteverkkoon jännitteen nousua. Jotta verkon jännitteen laatu saataisiin pysymään standardien mukaisissa arvoissa, on yksi vaihtoehto varustaa jakelumuuntaja käämikytkimellä. Käämikytkimellinen muuntaja pystyy pitämään kiskojännitteen halutussa arvossa mittaamalla kiskojännitettä ja asettaen käämikytkimen asennon tämän mittauksen perusteella.

Tässä työssä perehdytään jakelumuuntajaan, käämikytkimen toimintoihin ja sen vaikutukseen jakelumuuntajan toimintaan sekä käämikytkimen vaikutuksiin ja toimintoihin pienjänniteverkossa. Tarkoituksena ei ole käsitellä tyristorikomponentein toteutettuja käämikytkimiä vaan keskittyä ainoastaan mekaanisien portaiden säädöllä varustettuihin käämikytkimiin. Työssä ei ole myöskään tarkoitus perehtyä tehokerrointa korjaaviin kondensaattoreihin, niiden asetteluun verkossa eikä niiden vaikutuksiin käämikytkimen ohjauksen kannalta.

Luvussa 2 tarkastellaan jakelumuuntajan toimintaa. Sen jälkeen luvussa 3 tutustutaan käämikytkimen toimintaan ja rakenteeseen. Luvussa 4 pohditaan käämikytkimen ohjausta ja käämikytkimien kommunikaatiota ja lopuksi luvussa 5 on yhteenveto koko työstä.

2. JAKELUMUUNTAJAN TOIMINTA

Suomen vaihtosähköverkossa voidaan muuntajan avulla muuntaa jännitetasoa. Muuntajat mahdollistavat tehokkaan sähkönsiirron muuntamalla voimalan generaattorin tuottaman vaihtosähkön suurempaan jännitetasoon. Mitä suurempi jännitetaso on, sitä vähemmän syntyy häviöitä sähkönsiirrossa. Lähempänä kulutusta jännitetasoa taas laskeaan kulutuksen laitteille sopivaan tasoon.

Muuntajaan tulee sinimuotoinen vaihtojännite, joka saa aikaan sinimuotoisesti värähtelevän magneettivuon, joka indusoi vaikutuskentässään olevan käämin ylle vaihtojännitteen. Jos käämi, johon tämä jännite indusoituu, on kierretty tietylle kierrosluvulle N , niin jännitteen funktioksi muodostuu

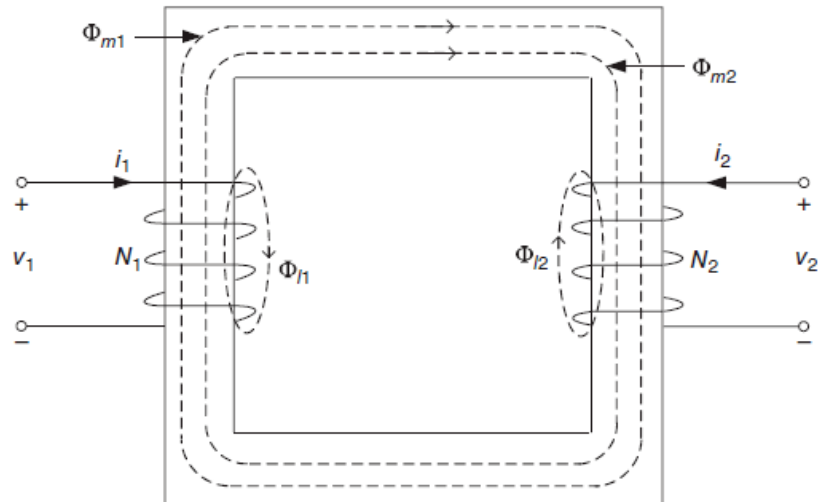
$$u = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

missä Φ on käämin läpi kulkeva magneettivuon. (Bastman 2017) Muuntaja siis muuttaa jännitteen toiseksi samantaajaiseksi jännitteeksi.

2.1 Muuntajan sijaiskytkentä

Ymmärtääkseen kolmivaihemuuntajan toimintaa tulee tarkastella ensin yksivaiheisen muuntajan toimintaa. Kolmivaiheinen muuntaja voitaisiin rakentaa kolmesta erillisestä yksivaiheisesta muuntajasta, mutta kustannus- ja tilasyistä kolmivaihemuuntajan käämitykset ovat sijoitettuna saman rautasydämen ympärille ensiö- ja toisiökäämit sisäkkäin muuntajasydämen pylvään ympärillä. (Bastman 2017)

Yksinkertaistettu yksivaihemuuntaja on esitetty kuvassa 1. Kuvassa Φ_{l1} on ensiövirran i_1 synnyttämä hajavuo ja vastaavasti Φ_{l2} toisiövirran i_2 synnyttämä hajavuo. N_1 ja N_2 ovat käämitysten kierroslukuja ja Φ_{m1} ja Φ_{m2} puolestaan virtojen synnyttämiä magneettivoita. Rautasydän, jonka ympärille johtimet on kääritty, kootaan kerrostamalla ohuita, eristettyjä rautalevyjä pyörrevirtojen aiheuttamien häviöiden minimoimiseksi (Bastman 2017).



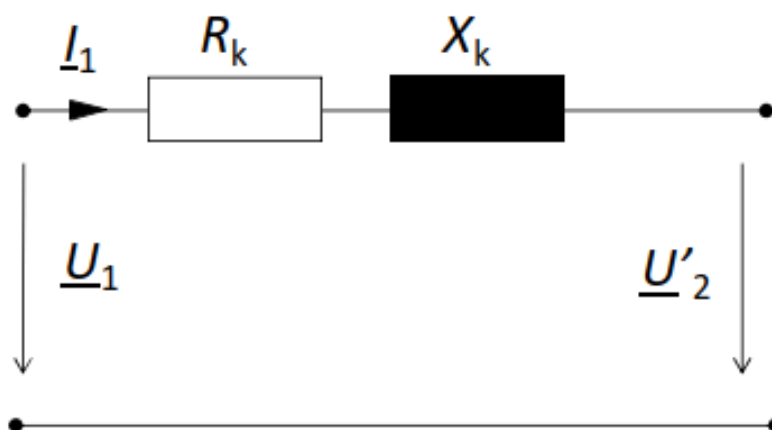
Kuva 1: Yksivaiheisen muuntajan sijaiskytkentä (Santoso & Beaty 2018).

Jos muuntajatarkastelussa oletetaan käämin resistanssi, hajareaktanssi ja magnetoimisvirta hyvin pieniksi, niin vuoajännite olisi likimain sama kuin on käämin yli oleva jännite. Sama vuo kulkee myös toisiokäämiin läpi aiheuttaen ensiö- ja toisiokäämien välille yhteyden

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (2)$$

mistä havaitaan, että muuntajan muuntosuhde on sama kuin käämien kierroslukujen suhde. (Santoso & Beaty 2018) Tämä pätee vain ideaaliselle muuntajalle. Oikeassa tilanteessa esimerkiksi käämeissä kulkeva virta aiheuttaa lämpöhäviöitä käämin resistanssin vuoksi.

Yleensä muuntajan tyhjäkäyntivirta on hyvin pieni verrattuna kuormitusvirtaan, joten rauhahäviöt voidaan olettaa erittäin pieniksi, ja muuntajan sijaiskytkentä voidaan saattaa kuvan 2 yksinkertaiseen muotoon.



Kuva 2: Muuntajan sijaiskytkentä (Bastman 2017).

Kuvassa 2 \underline{U}'_2 kuvaa toisiojännitteen arvoa redusoituna eli muutettuna ensiötasoon, $R_k = R_1 + R'_2$ ja $X_k = X_1 + X'_2$. Pilkku siis merkitsee sitä, onko suure redusoitu. Redusoiminen täytyy tehdä muuntajalaskelmia suorittaessa, jotta kaikki suureet ovat samalla jännitetasolla mihin tarkastelu keskittyy. Muuntajan sijaiskytkennän arvot saadaan laskettua muuntajan kilpiarvojen pohjalta. (Bastman 2017)

Muuntajan ollessa kuormitettu kulkee muuntajan läpi virta aiheuttaen muuntajan sisäisten resistanssien ja reaktanssien vuoksi jännitehäviöitä, joiden suuruuteen vaikuttaa kuormituksen suuruus ja vaihesiirto (Bastman 2017). Kuvan 2 mukaiselle sijaiskytkennälle saadaan Ohmin lain avulla jännitteenalenemäksi

$$\Delta U_{hv} = \underline{Z}_k I, \quad (3)$$

jossa impedanssi $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$.

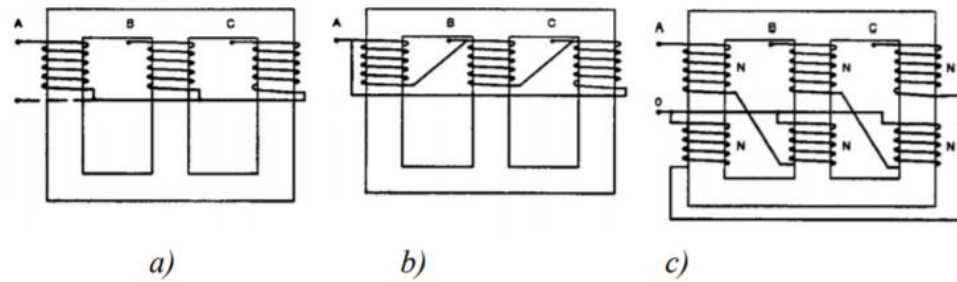
Yleensä ei kuitenkaan olla kovin kiinnostuneita jännitehäviöosoittimen kulmasta vaan vain jännitehäviön suuruudesta. Tällöin saamme likiarvokaavalla jännitteenalenemäksi

$$U_{hv} \approx RI \cos \theta + XI \sin \theta, \quad (4)$$

jossa θ on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma. Kaava 4 pätee pienillä vaihesiirtokulmilla. (Bastman 2017)

2.2 Kolmivaihemuuntajan kytkennät

Kuvassa 3 on esitetty, miten kolmivaihemuuntajan käämit voidaan kytkeä. Tapoja kytkeä ovat hakatähti-, kolmio- tai tähtikytkentään, joista hakatähtikytkentää käytetään vain alajännitekäämityksessä (Aura 1994). Hakatähtikytkentä soveltuu hyvin käytettäväksi silloin kun muuntajan kuorman jakautuminen vaiheiden kesken on epätasainen (Bastman 2017). Jakelumuuntajilla tilanne on juuri tämä, kun eri kuormia on paljon eri vaiheiden välillä kuten esimerkiksi pienitehoista valaistuskuormaa kahden vaiheen kuormana ja kolmannessa sähkömoottorisaha. Hakatähtikytkennän haittapuolena on se, että johdinkierroksia täytyy käyttää enemmän kuin muissa kytkentätyypeissä (Aura 1994).



Kuva 3: Kolmivaihemuuntajan käämikytkennät, a = tähti, b = kolmio, c = hakatähti (Bastman 2017).

Muuntajaa voidaan merkitä esimerkiksi tunnuksella Yzn11, jossa iso kirjain merkitsee yläjännitepuolen kytkentää. Tässä Y-kirjain tarkoittaa kolmiokytkentää yläjännitepuolella. Pieni kirjain kuvaa alajännitepuolen kytkentää. Tässä esimerkissä pieni z-kirjain tarkoittaa alajännitepuolella olevaa hakatähtikytkentää. D-kirjain merkitsisi kolmiokytkentää ja tunnuksen n-kirjain sitä, että nollapiste on käytettävissä. Nollapiste voi olla käytettävissä sekä ylä- että alajännitepuolella. (Aura & Tonteri 1994) Tunnuksen kellolukema, eli tässä esimerkissä 11, tarkoittaa sitä, että jos ensiojänniteosoittimen kulma osoittaa kellotaulussa numeroa 12 niin toisiojänniteosoittimen kulma osoittaa numeroa 11.

Suomessa jakelumuuntajien käytetyimmät kytkennät ovat Yzn11 sekä Dyn11. Näistä Yzn11-kytkentää käytetään pienemmille kuormituksille ja Dyn11-kytkentää suuremmille kuormituksille kuten yli 100 kVA. (Bastman 2017)

2.3 Jakelumuuntajan rakenne

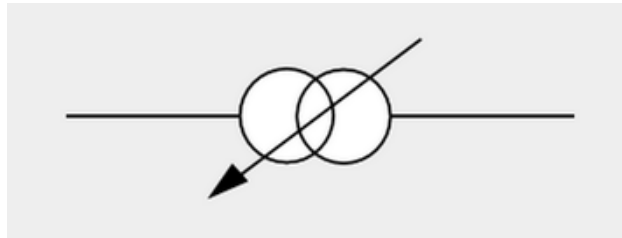
Jakelumuuntajiksi voidaan mieltää muuntajat, joiden nimellisjännite yläjännitepuolella on 20 kV tai vähemmän, alajännitepuolella nimellisjännite on 400 V ja teho S_n on pienempi kuin 3 200 kVA (Aura & Tonteri 1994). Tätä suuremmat muuntajat ovat suurtehomuuntajia sähkönsiirto- ja jakeluverkoissa, välijännitemuuntajia tai generaattorimuuntajia (Bastman 2017).

Jakelumuuntajat voidaan jakaa kahteen luokkaan: Öljyeristeiset ja valuhartsieristeiset jakelumuuntajat. Öljyeristeisillä muuntajilla on paisuntasäiliö öljylle, mikä aiheuttaa pienen öljyn imeytyneen kosteusmäärän laskeutumisen paisuntasäiliöön. Tällöin kosteus on helppo poistaa. Jos paisuntasäiliötä ei ole niin muuntaja on kaasutiiviisti suljettu, ja öljysäiliö on mitoitettu kestäämään huomattavatkin ylipaineet. Näitä paisuntasäiliöttömiä muuntajia käytetään paljon maaseutuverkossa pylväsmuuntajina. (Harlow 2012)

Valuhartsiset jakelumuuntajat ovat käytössä ainoastaan ”riskipaikoissa” kuten sairaaloissa, kaivoksissa, tavarataloissa ja muissa paikoissa, joissa öljypalon riskin tai saastumisvaaran takia ei voida perinteistä öljyeristeistä muuntajaa käyttää. Joskus valuhartsisia muuntajia käytetään tehdasolosuhteissa silloin kun halutaan muuntaja mahdollisimman lähelle kuormaa. (Aura & Tonteri 1994) Yleensä valuhartsisissa muuntajissa on väliottokytkin eikä käämikytintä, poislukien pylvällä olevat muuntajat, joissa ei ole kumpaakaan (Harlow 2012).

3. KÄÄMIKYTKIMEN TOIMINTA

Sähköjärjestelmät vaativat kulutuspaikassa jännitteen pysymisen tasaisena standardien sallimissa rajoissa. Yleisin tapa vaikuttaa jännitetasoon on varustaa muuntaja väliotto-kytkimellä tai käämikytkimellä. Muuntajan ensiö- tai toisiokäämissä on väliottoja, joihin voidaan kytkeä kytkin kiinni. Kytkin muuttaa muuntajan käämien kierroslukua kytkimen asennon muuttuessa ja kaavan 2 perusteella tämän kierroslukujen suhteen muuttuessa, muuttuu myös jännitetaso. Joskus piirrosmerkin alla lukee, onko kyseessä käämikytkin vai väliottokytkin kirjainlyhenteillä. Kuvassa 4 on esitetty käämikytkimellisen muuntajan yleinen piirrosmerkki.



Kuva 4: Piirrosmerkki muuntajalle, jossa mahdollisuus jännitteensäätöön (Weedy et al. 2012).

Jos tarve muuntosuhteen vaihtamiselle on harvinaisempaa, on muuntaja yleensä varustettu väliottokytkimellä. Tämä kytkin toimii vain silloin kun muuntaja ei ole kuormitettuna. IEEE:n termi tälle kytkimelle on ”de-energized tap changer (DETC)” ja IEC:n käyttämä termi on ”off-circuit tap changer (OCTC)”. (Harlow 2012)

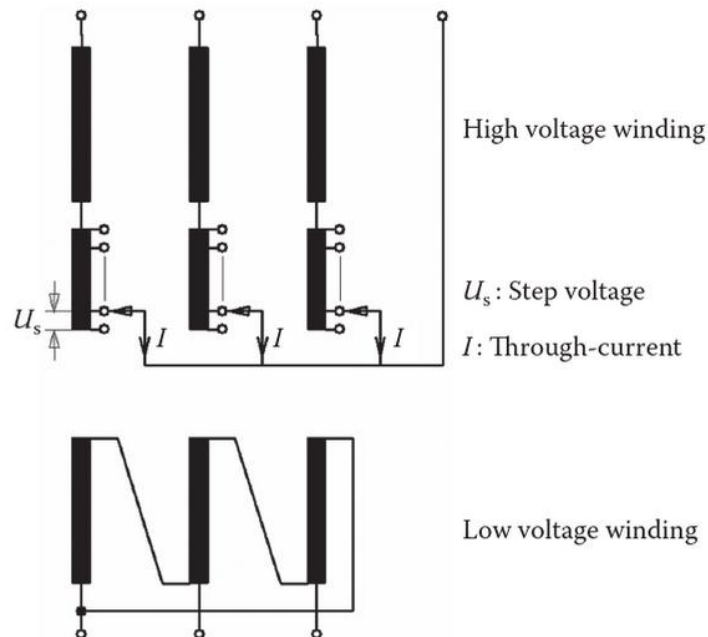
Toinen vaihtoehto on käämikytkin, jota tässä työssä tarkastellaan. Jos muuntosuhdetta joutuu muuttamaan usein päivän aikana, niin käämikytkin onnistuu tehtävässään kuorman ollessa kytkettynä muuntajaan. Kuormalle kulkeva virta ei saa lakata missään käämikytkimen asennon vaihdoksen aikana eikä aiheuttaa oikosulkua väliottojen välillä. IEEE käyttää käämikytkimestä termiä ”load tap changer (LTC)” ja IEC ”on-load tap changer (OLTC)”. (Harlow 2012; Santoso & Beaty 2018)

3.1 Käämikytkimen kytkentäperiaate

Kuvassa 5 on esitetty yksinkertainen esimerkki muuntajasta, jonka yläjännitepuolelle on kytketty käämikytkin ja käämit ovat tähtikytkennässä. Käämikytkimen olisi tarkoitus muuntaa yläjännitepuolen käämityksiä väliottojen mukaan. Kuvassa näkyvä U_s eli ”step

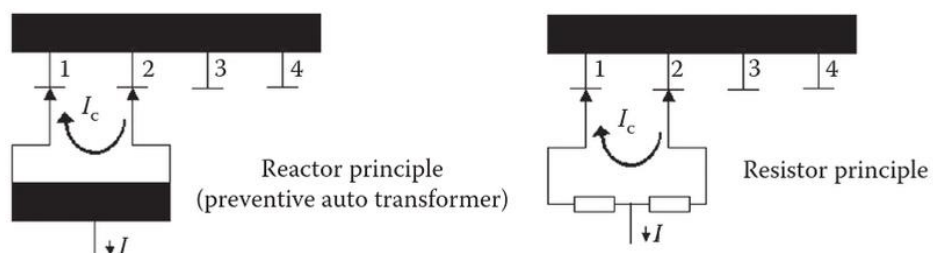
voltage” tarkoittaa jännitettä väliottopisteiden, eli kytkentäpisteiden, välillä. Tyypillisesti U_s on luokkaa 0,8%–2,5% muuntajan nimellisjännitteestä (Harlow 2012).

Jos kuvan 5 mukaan lähdetään suorittamaan suoraan käämikytkentää eli väliottojen välillä vaihtamista, niin kuorman jännite tippuu hetkeksi noltaan väliottojen välillä, koska käämin toista päätä ei ole hetken aikaa kytketty mihinkään. Tämä saattaa myös aiheuttaa valokaaren (eng. arching) ja vierekkäisten väliottopisteiden oikosulkutilanteen.



Kuva 5: Esimerkki muuntajasta, johon on yläjännitepuolelle kytketty käämikytkin (Harlow 2012).

Jotta toisiopuoleen kytketty kuorma säilyisi jännitteellisenä joka kytkinasennon vaihdon hetkellä, niin täytyy käyttää periaatetta ”tee kaksi kytköstä ennen kuin poistat yhden”, joka on esitetty kuvassa 6 resistiiviselle että induktiiviselle askelimpedanssille. Askelimpedanssi, joko resistanssi tai induktanssi, koostuu yhdestä tai useammasta vierekkäisestä yksiköstä, joiden tarkoitus on siirtää kuorma väliotosta toiseen ilman kuormitusvirran huomattavaa muutosta. Samaan aikaan askelimpedanssi rajaa kiertävää virtaa I_c sen ajan, kun molemmat väliotot ovat kiinnitettyinä. (Harlow 2012) Virta I_c aiheutuu siitä, että väliottojen välillä on jännite.



Kuva 6: Käämikytkimen asennon vaihdon periaatteet (Harlow 2012).

Käämikytkin koostuu pääasiassa liittimistä, askelimpedanssista, hammasvaihteista, energian varaajista ja vetomekanismista. Riippuen käämikytkimen toteutuksesta käytössä on myös lisäksi tehokytkimiä ja vaihtovalitsimia. (Harlow 2012)

3.2 Nykypäivän käämikytkinratkaisut

Käämikytkimien tärkein ominaisuus on toki väliotto-valikoima, mutta myös katkaisukyky sekä virransiirto-ominaisuus. Kun virta on siirretty kulkemaan eri reittiä, niin jäljelle jäävän irtoavan kontaktin on kyettävä kestäämään sen yli palaava jännite. Liittimen kytkentävirrän ja palautuvan jännitteen lisäksi tärkeää on myös liittimen kytkeytymisnopeus sekä valokaaren katkaiseva aine. (Harlow 2012)

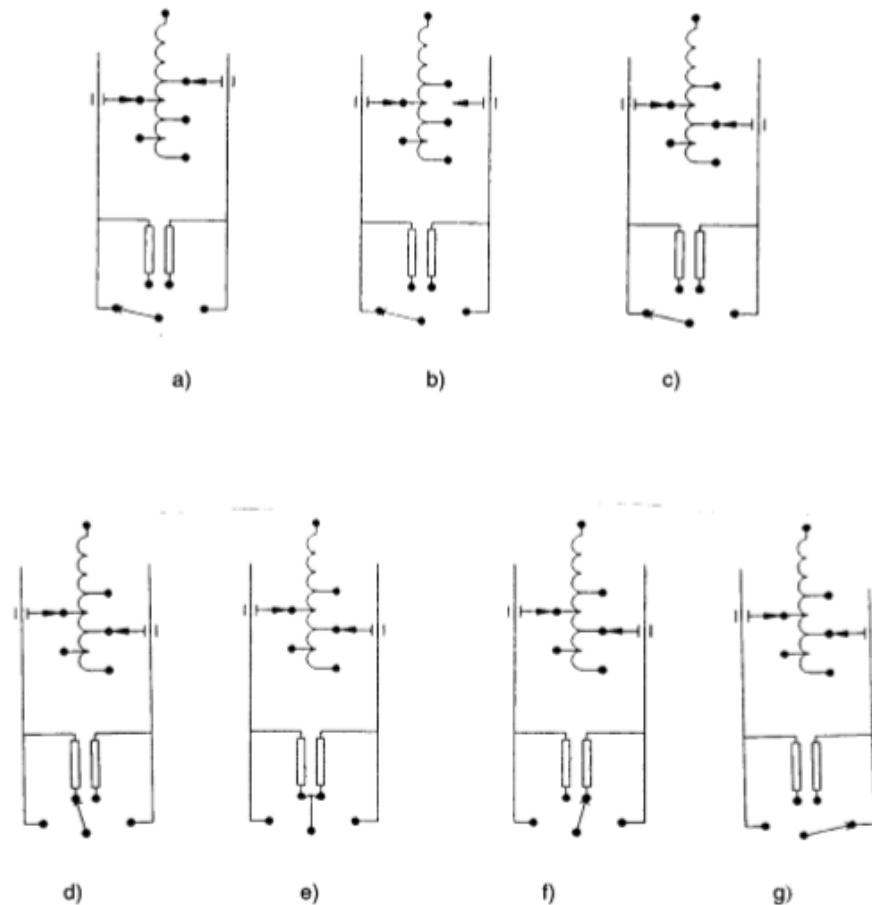
Suurin osa nykypäivän muuntajista käyttää öljyä eriste- sekä jäähdytysaineena. Käämikytkinten suunnittelu oli ennen keskittynyt pääsääntöisesti öljymuuntajiin. Tällöin käämikytkimen liittimet kytkeytyvät ja irtoavat öljyssä. Tämä perinteinen käämikytkinratkaisu on todella yleinen ja kykenee toteuttamaan suurimman osan muuntajavalmistajien vaatimuksista. (Harlow 2012)

Nykyään öljyttömiä ratkaisuja tarvitaan myös etenkin kaupunkialueilla, joissa paloturvallisuussäädökset ovat tiukkoja. Tyhjiötekniikka pystyy paremmin vastaamaan loppukäyttäjien tiukentuneisiin vaatimuksiin ja uusiin sovelluskohteisiin (Harlow 2012). Tyhjiötekniikan yksi suurista eduista on myös huoltotarpeiden väheneminen ja pidempi elinikä (ABB 2020a).

3.2.1 Resistiivinen öljytyypin käämikytkin

Suuremmilla jännitteillä ja tehoilla käämikytkimellä on kaksi osaa: tehokytkin ja valitsin väliotoille. Pienillä tehoilla useimmin nämä kaksi on yhdistetty yhdeksi komponentiksi: tehovalitsimeksi. (Harlow 2012)

Kuvassa 7 on esitetty yhdestä väliotosta toiseen siirtyminen vaiheittain. Ensin valitsin valitsee jännitteettömänä seuraavan väliottopisteen kohdissa a, b ja c. Sitten tehokytkin siirtää kuormitusvirran tähän valmiiksi valittuun uuteen väliottoon kohdissa d, e, f ja g. (IEEE C57.131)



Kuva 7: Tehokytkimen ja valitsimen toiminta (IEEE C57.131).

Tehokytkimen toiminnan aikana siirtymävaiheessa, siirtymäresistanssit ovat kytkettyinä. Nämä resistanssit ovat tehty kestämään lämpenemistä noin 20 – 30 ms. (IEEE C57.131)

Tehovalitsin siirtää välioton seuraavaan yhden askeleen aikana. Moottoriohjattu vetomekanismi varastoi jouseen energiaa ja jousen vapautuessa energia siirtyy tehovalitsimen liikkeeksi. (IEEE C57.131) Tehovalitsin on hiukan hitaampi kuin valitsin ja tehokytkin yhdessä (Harlow 2012).

3.2.2 Reaktiivinen öljytyypin käämikytkin

Reaktiivisten öljytyypin käämikytkimien kanssa käytetään myös joko tehovalitsinta tai tehokytkimen ja valitsimen yhdistelmää. Erilaista resistiiviseen kytkimeen on se, että tässä tarvitaan puolet vähemmän väliottoja (IEEE C57.131). Tulevaisuudessa öljyteknologia tulee vähenemään ja tehomuuntajissa tullaan käyttämään enemmän ja enemmän reaktiivisia tyhjiökäämikytkimiä. (Harlow 2012)

Reaktiiviset öljytyypin käämikytkimet ovat harvinaisempia. Tämä johtuu siitä, että muuntajavalmistaja joutuu suunnittelemaan käämikytkimen tarvitsemat reaktorit eli käämit muuntajan muuntajasäiliöön. (Harlow 2012)

3.2.3 Tyhjiötyyppinen käämikytkin

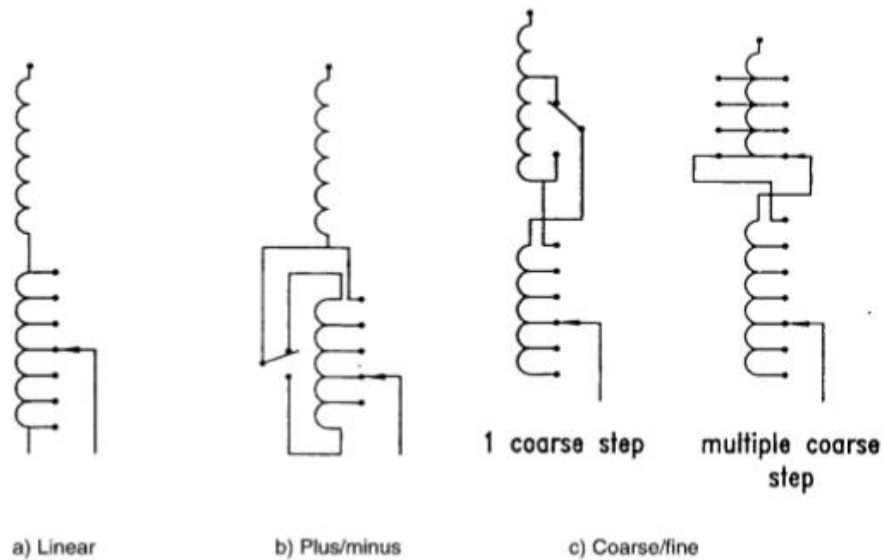
Nykyään tyhjiökytkintekniikat ovat olleet suuressa kasvussa ja korvanneet perinteisiä öljy- ja SF6-teknikoita. Tyhjiötekniikat ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan parempia kuin öljytyypin ratkaisut:

- Hermeettisesti tiivis eli kytkintoimintoihin ei vaikuta väliaine
- Valokaarijännite on pienempi kuin SF6:ssa ja öljyssä, mikä vähentää energiankulutusta ja liittimien kulumista
- Sivuaineiden tuotto vähentyy
- Valokaaren sammutusaine ei vanhene
- Ei oksidaatiota kytkennän aikana
- Nopea dielektrinen palautuminen. (Harlow 2012)

Nämä ominaisuudet tekevät tyhjiötekniikasta huoltovapaamman sekä vähemmän energiaa kuluttavamman kuin öljytyypin ratkaisut.

3.3 Tavallisimmat väliottojärjestelyt

Muuntosuhteen muuttaminen tapahtuu vähentämällä tai lisäämällä käämityskerroksia. Yleisimmät tavat tähän on esitelty kuvassa 8. Erilaisia kytkentöjä käytetään eri tarkoituksiin ja vaatimuksiin.

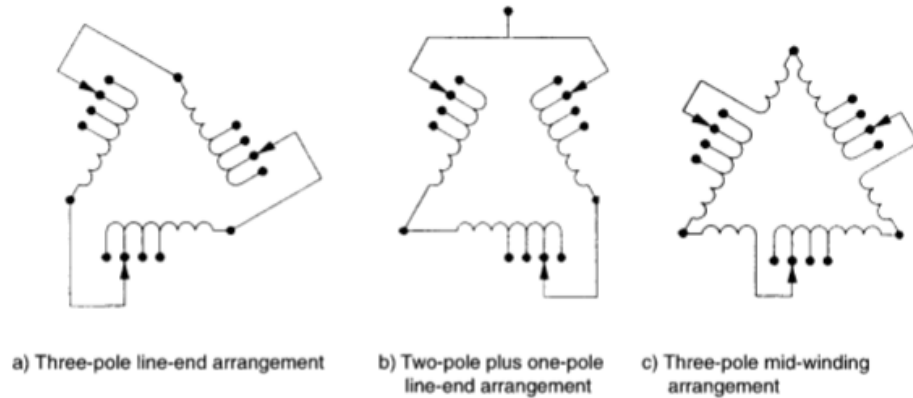


Kuva 8: Yleisimmät väliottokytkenöt (IEEE C57.131).

Kuvan 8a) lineaarinen kytkentä on käytössä, kun halutaan pieni alue, jossa jännitettä säädetään (Harlow 2012). 8b):n tapauksessa pääkäämiin voidaan lisätä tai vähentää säätökäämistä kierroksia valitsimen avulla. Tällöin säätöväliä voidaan kasvattaa tai väliottojen määrää vähentää. Haittapuolena tässä kytkentätavassa on se, että kun halutaan pienin kierrosluku käämitykselle, on kytkettynä koko mahdollinen käämitys eli syntyy maksimaaliset kuormitushäviöt. 8c):n kytkentätapa mahdollistaa sen, että minimikäämityksellä kuormitushäviöt ovat pienemmät. Tämä rakenne on kovin monimutkainen toteutettava, ja sitä käytetäänkin pääasiassa teollisuuden uunimuuntajissa (eng. furnace transformer), joissa vaaditaan suuri säätöväli. (IEEE C57.131)

Yleinen tapa tähtikytkentäpuolelle kytkettävästä käämikytkimistä on asettaa väliotot käämien tähtipisteen eli neutraalin pisteen puolelle. Tämä johtuu siitä, että tällöin saadaan mahdollisimman kompakti ratkaisu. (Harlow 2012)

Kolmiokytkennässä on monta erilaista tapaa siihen, mihin kohtaan käämitystä käämikytkin kytketään. Yleisimmät tavat näkyvät kuvassa 9.

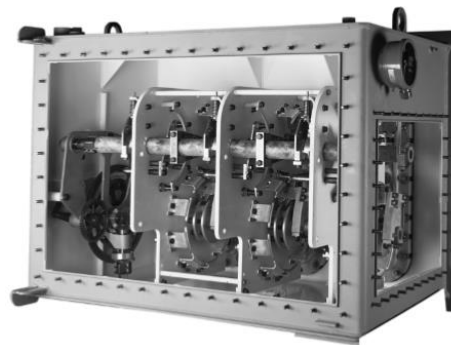


Kuva 9: Kolmiokytkentään toteutetun käämikytkimen kytkennät (IEEE C57.131).

Kuvan 10a) kytkentä vaatii käämikytkimen vaiheiden välille kaksi kertaa vahvemman eristyksen kuin c-kohdan toteutus. Saman kuvan b-kohdan kytkennän etu on se, kun toiset kytkennät käyttävät kolmea yksinapaista käämikytkintä, niin b-kohdan kytkentä käyttää yhtä yksinapaista ja yhtä kaksinapaista käämikytkintä kolmen sijaan. (IEEE C57.131)

3.4 Esimerkki reaktiivisen käämikytkimen kytkentäsekvensistä

Tarkastelussa käytetty Reinhausenin reaktiivinen tyhjiötyypin käämikytkin, joka on kuvassa 10, on varustettu väliottojen valitsimella, karkealla vaihtovalitsimella, tyhjiökatkaisimella ja ohituskytkimellä. Kytkennän katkaiseminen tapahtuu tyhjiössä eikä perinteiseen tyyliin öljyssä.

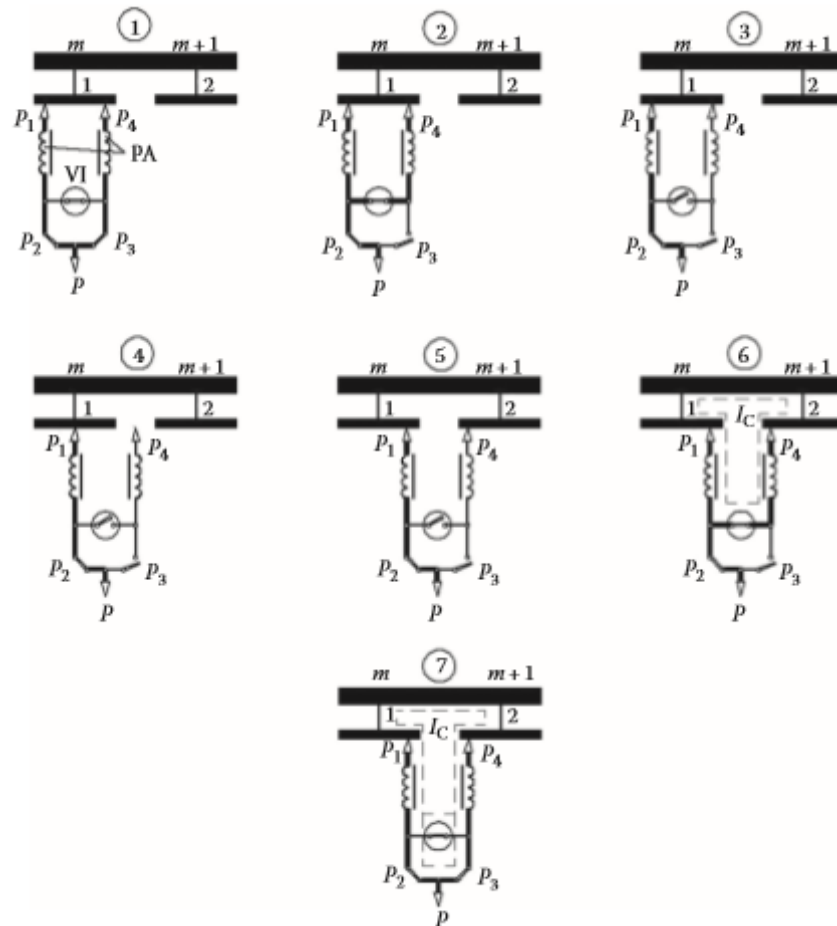


Kuva 10: Reinhausen RMV-A 600 A / 1320 A käämikytkin (Reinhausen 2020a).

Välioton vaihtamiseen käytetään kolmea erilaista toimintoa:

- Valokaaren katkaisu tyhjiökatkaisimella yhdessä ohituskytkimien kanssa.
- Uuden välioton valinta valitsimen avulla ohituskytkinten sekä tyhjiökatkaisimen kanssa.
- Plus–miinus- tai karkeavalintatoiminto. (Reinhausen 2020a)

Kaikki reaktiiviset käämikytkimet toimivat joko "bridging"- tai "nonbridging"-asenoissa alati. Bridging- eli silloitusasennossa (kuva 11, kohta 7) käämikytkimen valitsimet ovat vierekkäisissä väliotoissa kiinni ja nonbridging- eli siltaamattomassa asennossa (kuva 11, kohta 1) molemmat valitsimen liittimet ovat kiinni samassa väliottopisteessä. (Harlow 2012)



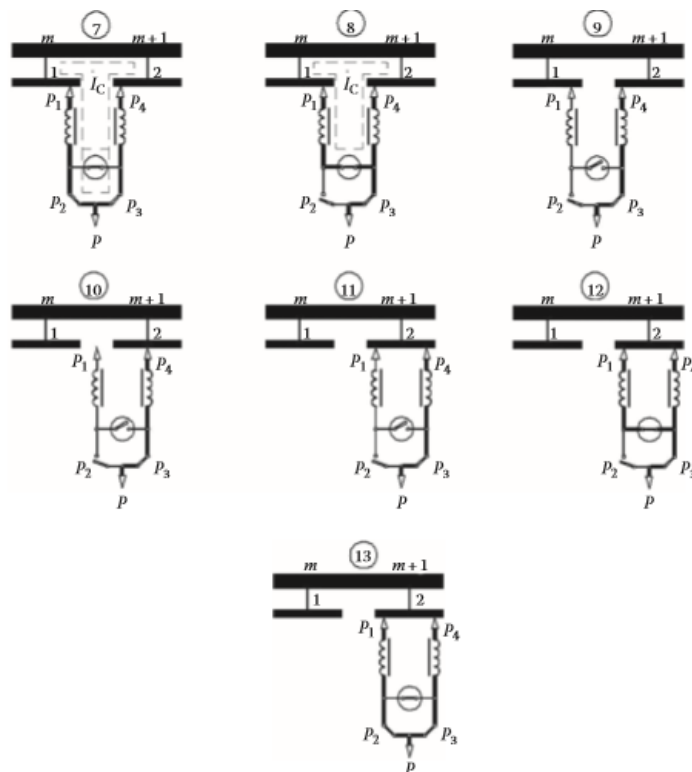
Kuva 11: Käämikytkimen asetus siltaamattomasta- silloitusasentoon (Harlow 2012).

Kun käämikytkin on siltaamattomassa asennossa kuva 11, kohta 1) (niin silloin molemmat valitsinliittimet ovat kiinni ja kummankin läpi kulkee puolet kuormitusvirrasta. Tästä asennosta alkaa käämikytkimen asennonvaihtotoiminto. Ensin kohdassa 2 ohituskytkimen liitin P3 aukeaa, jolloin puolet kuormitusvirrasta kulkee tyhjiökatkaisimen läpi. Myöhemmin kohdassa 3 tyhjiökatkaisin aukeaa, jolloin koko kuormitusvirta kulkee nyt P1–P2-reittiä pitkin. Liitin P4 voi nyt kulkea seuraavaan väliottoon, koska tämän liittimen läpi ei virtaa tällä hetkellä kulje. Kun ollaan uudessa asennossa (kuva 12, kohta 5) tyhjiökatkaisin sulkeutuu ja sen jälkeen myös ohituskytkimen liitin P3. Nyt ollaan saavutettu silloitusasento. Kuvan 11 kiertovirta I_c johtuu väliottojen välisestä jännite-erosta. Tämä silloitusasento on syöttöasento (eng. service position) reaktiivisissa käämikytkimissä toisin

kuin resistiivisissä käämikytkimissä, joten puolet vähemmän väliottoja on tarpeen. (Harlow 2012)

Toisin sanoen, kun vierekkäiset väliotot ovat valittuna kohdassa 7, liittimissä P1 ja P4 kiinni olevat käämit korkean reaktanssin avulla rajaavat kiertävän virran I_c turvalliseen arvoon, jotta kytkennän osat kuten liittimet eivät ala kuumenemaan liikaa. Tässä tilanteessa nämä käämit toimivat myös jännitteenjakajana näiden kahden välioton jännitteiden välillä ja siten väliottoja tarvitaan puolet vähemmän. Toisaalta tämä tuo ongelmia mukanaan myös. Käämeihin varastoituu induktiivista energiaa jo lyhyinäkin aikoina, kun käämikytkin on silloitusasennossa. Kun käämikytkin lähtee tästä tilasta askeltamaan, syntyy helposti valokaari (eng. arc). Erityistä huomiota suunnittelussa tulee kohdistaa liittimien materiaaleihin, jotta liittimet eivät vaurioidu tai hitsaudu kiinni valokaarien vuoksi sekä myös väliaineeseen kuten öljyyn, johon saattaa muodostua öljyä ikäännyttäviä yhdisteitä. (U.S. Patent No. 4,130,789, 1978)

Kuvassa 12 on esitetty asennon vaihto takaisin siltaamattomaan asentoon, seuraavaan väliottoon. Ensin liitin P2 aukeaa, jonka jälkeen tyhjiökatkaisin aukeaa, jolloin kuormaton liitin P1 siirtyy seuraavaan väliottoon.



Kuva 12: Reaktiivisen käämikytkimen asetus silloitusasennosta siltaamattomaan (Harlow 2012).

Kun liitin P1 on kiinni tavoitellussa väliotossa, niin tyhjiökatkaisin sulkeutuu, jonka jälkeen myös ohituskytkimen liitin P2. (Harlow 2012) Nyt molemmat virtareitit kuormitusvirralle ovat samassa väliotossa. Prosessi toimii kuten aikaisemmin mutta käänteisessä järjestyksessä. Kuvassa saavutaan seuraavaan väliottoon. Näin ollaan liikuttu siis yhdestä väliotosta silloitusasentoon, missä liittimet ovat molemmissa väliotoissa, ja siitä vielä eteenpäin seuraavaan väliottopisteeseen.

Jotta saataisiin kaksinkertaistettua valittavien asentojen määrä tai pienennettyä väliottojen määrää, tarvitaan kuva 8b:n suunnanvaihto- ("reversing selector") tai kuva 8c:n karkeasäätövalitsin ("coarse change-over selector"). Tälle operaatiolle vaaditaan se, että molemmat liikkuvat liittimet P1 ja P4 ovat samassa kontaktissa kiinni esimerkiksi kuvan 13 väliotossa m tai m+1. (Harlow 2012)

3.5 Käämikytkimen nimellisarvot

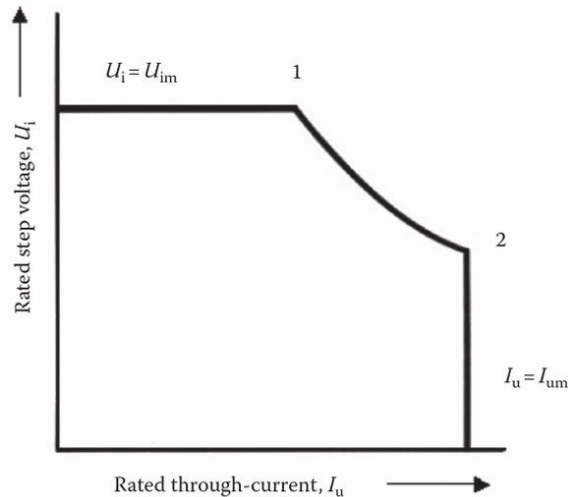
IEEE:n standardin mukaan käämikytkimen valmistajan tulee ilmoittaa seuraavat nimellisarvot nimikilvessä:

- Nimellisvirta (eng. rated through-current)
- Suurin sallittu nimellisvirta
- Nimellinen askeljännite
- Suurin sallittu askeljännite
- Nimellinen taajuus
- Nimelliseristystaso. (IEEE C57.131)

Kuvassa 13 on esitetty askelkapasiteetti eli askeljännitteen arvo nimellisvirran funktiona. Askelkapasiteetti on

$$P_{st} = I_u * U_i , \tag{5}$$

jossa I_u on nimellisvirta sekä U_i on nimellinen askeljännite eli välioton yli oleva jännite.



Kuva 13: Käämikytkimen askelkapasiteetti (eng. rated step-capacity) (Harlow 2012).

Kuvan rajapisteet 1 ja 2 vaihtelevat eri käämikytkinratkaisujen mukaan. Lisäksi kuva havainnollistaa tehokytkimen (eng. diverter switch) rajoituksia sekä virta- että jännitepuolelta. (Harlow 2012) Askelkapasiteetin funktio pääosin koostuu liittimien ominaisuuksista kuten materiaalista ja nopeudesta sekä väliaineen valokaaren katkaisuominaisuuksista (Reinhausen 2020b).

3.6 Käämikytkimen testaus

IEC ja IEEE määrittävät eri standardeissa vaatimuksia käämikytkimille. Käämikytkimille suoritetaan erilaisia testejä kuten liittimien lämpötila-, kytkentä-, oikosulku-, askelimpedanssi-, mekaanisia- ja dielektrisiä testejä. EU:ssa on myös lisäksi direktiivejä, joissa määritetään rajat maksimikuormassa tehohäviöille sekä tyhjäkäyntitehohäviöille. Salamasyöksyjännite- sekä oikosulkutestit suorittaa lisensoitu ja riippumaton testauslaboratorio, ja kaikki muut testit suorittaa valmistaja itse. (Mokkapaty *et al.* 2017)

Liittimien toiminnan turvaamiseksi tehdään 50 000 käämikytkimen asennonvaihto-opearaatiota suurimmalla sallitulla nimellisvirralla sekä tätä virtaa vastaavalla askeljännitteellä (IEEE C57.131). Tämä antaa asiakkaalle turvan siitä, että liittimiä ei tarvitse vaihtaa liian usein (Harlow 2012). Jos päivän aikana käämikytkin askeltaa 20 kertaa, niin 50 000 opearaatiota saavutetaan yli kuudessa vuodessa, joten huolto- tai tarkistuskäyntejä ei tarvitse tehdä turhan usein.

Käämikytkimille tehdään myös testi 1,2-kertaisella maksimaalisella nimellisvirralla ja mitataan liittimien ympärillä olevaa eristyneestettä sekä liittimien lämpötilaa mahdollisimman lähellä liitoskohtaa. Liittimien lämpötila ei saa nousta enemmän kuin 20 Celsius-astetta ympäröivän eristysnesteen lämpötilaa korkeammaksi. Reaktiivisilla käämikytkimillä käyt-

tetään testausasentona silloitusasentoa, sillä liittimien kuumeneminen on tässä tilanteessa korkeimmillaan. (IEEE C57.131) Tämän testin tarkoituksena on varmistaa se, että liittimien lämpötila ei nouse liikaa, jotta vältetään liittimien mahdollista kiinni hitsautumista tai vaurioitumista.

Mekaanisia testejä tehdään 500 000:lla välioton vaihdolla, kun käämikytkin ei ole kuormitettu (IEEE C57.131). Tämä määrä testejä riittää hyvin sillä esimerkiksi sähköaseman muuntajan jännitteelliset väliotonvaihdot ovat luokkaa 10 000 vuodessa pahimmillaan (Harlow 2012).

Oikosulkutesteissä käytetään vain yhtä vaihetta kolmen vaiheen sijaan. Käämikytkimen läpi kulkee vähintään kaksi sekuntia 2,5-kertainen maksiminimellisvirran RMS-arvo, kun kuormana on impedanssi, jonka X/R -suhde on 12 tai yli (IEEE C57.131).

Dielektriset vaatimukset riippuvat siitä, miten käämikytkin on sijoitettu muuntajan käämiin kiinni. Käämikytkimen ostajan tulee tietää millaisen eristystason käämikytkin vaatii, sekä valita oikeanlaiset liitännät käämikytkimen ja muuntajan väliin. Jokaisen eristekerroksen yli -kuten esimerkiksi vaihe ja maa sekä vaihe ja toinen vaihe- suoritetaan tavanomaiset LI-testit $1,2 * 50 \mu s$ – impulssilla standardin taulukoiden avulla negatiivisella ja positiivisella polariteetilla. (Harlow 2012; IEEE C57.131)

3.7 Valintakriteerit

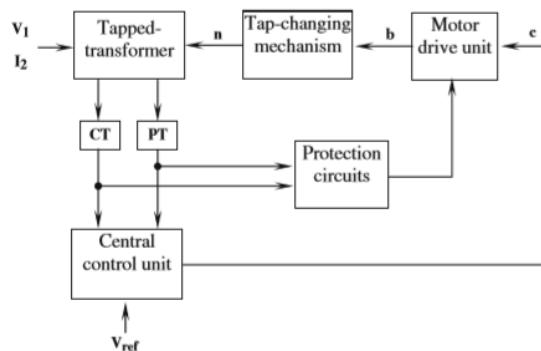
Käämikytkimen valintaa varten tulisi tietää liitettävästä muuntajasta:

- MVA-arvo
- Liitettävän käämityksen tyyppi (delta vai tähti ja mihin kohtaan käämitystä liitetään käämikytkin)
- Nimellisjännite sekä jännitteensäätöalue
- Käämikytkimen asentojen lukumäärä
- Eristystaso maahan
- Salamasyöksyjännitteen suojaustaso.

Käämikytkimestä tulisi tietää nimellisvirta ja askeljännite. Lisäksi hyödyllisiä tietoja ovat liitännäkaavio, ylikuormituskapasiteetti, oikosulkuvirta ja liittimien käyttöikä. (Harlow 2012)

3.8 Käämikytkimen automaattinen ohjaus

Kuvassa 14 on esitetty käämikytkimen ohjausdiagrammi. Kiskon jännitettä mitataan jännitemuuntajalla (eng. potential transformer PT), jonka antaman jännitteen mitta-arvo muuntaja muuntaa viestiksi jännitteensäätäjälle (eng. central control unit). Virtamuuntaja (eng. current transformer CT) voidaan myös asentaa joissain tapauksissa muuntajan toispuolelle, jos ohjausta halutaan säätää eri menetelmällä. Ohjaus voidaan toteuttaa myös pelkän jännitemuuntajan avulla.



Kuva 14: Käämikytkimen ohjausdiagrammi (Faiz & Ziaholah 2011).

Jännitteensäätäjä määrää käämikytkintä askeltamaan ja lähettää tästä viestin kaukokäyttöön. Kaukokäytöltä tulee jännitteensäätäjään viestejä ja mahdollisia lukitussignaaleja, joilla pyritään suojaamaan laitteistoa. (Perttu 2014)

Yksinkertaisimmillaan muuntajan käämikytkimen säätö toimii negatiivisella takaisinkytkennällä. Ulostulojännitettä mitataan jokaiselle vaiheelle erikseen ja verrataan asetettuun referenssijännitteeseen ja tämän perusteella laitetaan kytkin askeltamaan tai ei. Jokainen käämikytkin on varustettu niin sanotulla ”kuolleella alueella” (eng. deadband), jotta käämikytkin ei askeltaisi jokaisella pienellä mittauksen muutoksella. Tällä pyritään vähentämään osien kulumista, kompromissina on vähemmän tarkka jännitteenseuranta. (Zecchino *et al.* 2016)

Käämikytkimen säätimessä on myös viivelohko. Viivelohko valitaan jännitemuuntajan mittauksen viiveen, itse käämikytkimen toiminnan viiveen ja kuolleen alueen suuruuksien perusteella. Jos viivettä ei ole valittu oikein tai tarpeeksi tarkasti, niin säätösilmukka alkaa joko värähtelemään tai systeemistä tulee liian hidas. (Faiz & Ziaholah 2011)

Automatiikan tulee ottaa myös lukuun verkon vikatilanteet. Jos verkossa on paljon kuluusta, niin käämikytkin puuttuu tilanteeseen askeltaen eli nostaen muuntamon kiskoja jännitettä. Nyt jos verkko joutuu vian seurauksena jännitteettömään tilaan, niin kun jännite

taas palaa, niin käämikytkin on ääriasennossaan ja nostaa jännitettä. Tästä aiheutuu hetkellinen ylijännite verkkoon, mikä saattaa rikkoa kuluttajien herkkiä sähkölaitteita. Käämikytkinautomatiikan tehtävänä on tunnistaa vian aikainen jännitteettömyys ja askeltaa keskiasentoonsa eli asentoon, jossa käämikytkin ei nosta eikä laske kiskoja jännitettä. (Elovaara & Haarla 2010)

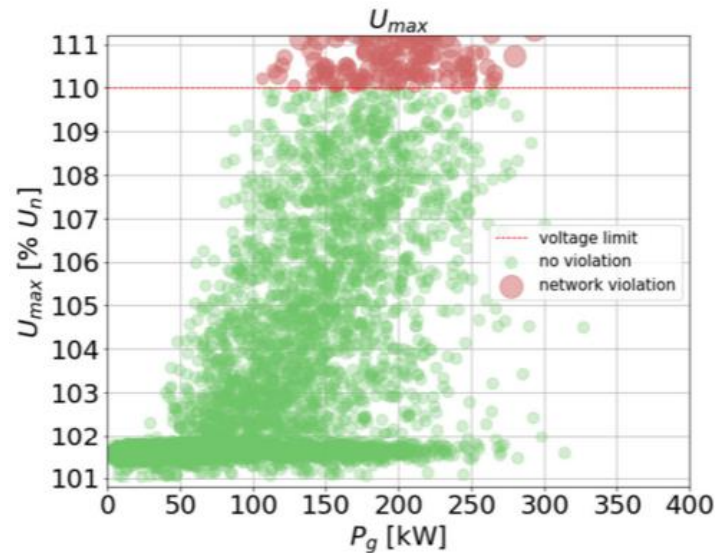
4. JÄNNITTEENSÄÄTÖ JAKELUVERKOSSA

Sähkövoimajärjestelmän toiminnalle on tärkeää, että taajuus ja jännite pysyvät lähellä haluttuja arvoja. Jännitettä säädetään loistehon avulla ja taajuutta säädetään laitteiden pätötehon säädöllä. (Elovaara & Haarla 2010)

Suunniteltaessa jakeluverkkoa, yksi suurimmista huolenaiheista on yleensä jännitteen lasku. Jotta asiakkaan liittymispisteessä jännite pysyisi standardien rajoissa, tulee johtolähdön olla tarpeeksi lyhyt. Jos jakelumuuntajan keskijännitepuolella jännite on suurimmalla sallitulla rajalla, niin asiakkaan liittymispisteessä pienjänniteverkon puolella, on todella pieni todennäköisyys sille, että esiintyisi liian suuri jännite. (Bollen & Hassan 2011) Tämä tosin pätee perinteisessä tilanteessa eli kun jakeluverkossa on vain kulutusta. Suomessa jännitteen laatuun liittyvät rajat määritellään standardissa EN-50160. Standardin mukaan 95 % 10 minuutin RMS-arvojen keskiarvoista tulisi olla ± 10 % nimellisestä arvosta ja joissain tapauksissa sallitaan suuremmatkin jännitteen vaihtelut.

Tilanne on vuosien saatossa muuttunut. Öljyn hinta on noussut ja ilmasto lämmennyt, mikä on kasvattanut uusiutuvien energialähteiden kysyntää. Usein tuulipuistot kytketään 20 kV:n tai sitä suurempaan jännitetasoon. Aurinkovoimaloiden kohdalla sen sijaan voimaloiden omistajat ovat pääasiassa yksityishenkilöitä ja voimaloiden koot kaukana tuulivoimaloiden megawattiluokasta. Nykyisin trendinä on kytkeä pieniä aurinkovoimaloita kotien katoille, jakeluverkkoon. Katolle asennettavat aurinkovoimalat ovat asennetuina hajautetun energiantuotannon muoto Belgian jakeluverkossa (Weckx *et al* 2013). Tämä saattaa aiheuttaa heikkoon verkkoon jännitteenlaadun ongelmia.

Kuvassa 15 on simuloitu jakeluverkkoon asennetun aurinkovoimalatuotannon vaikutusta liittymispisteiden jännitteisiin todellisen jakeluverkon, kattodatan, etäluettavien sähkömittareiden sekä sääolosuhteiden avulla. Algoritmi valitsi satunnaisesti kattoja yksi kerrallaan ja suoritti tehonjakolaskennan. Kuvasta voidaan havaita, että jännite ylitti suurimman sallitun arvon, kun verkkoon kytketty kapasiteetti kasvoi yli 100 kW:iin. Tutkimuksessa oletettiin, että kaikille katoille asennetaan samatehoinen aurinkovoimala, joten todellinen suurin tuotantokapasiteetti saattaa hiukan poiketa simuloinneista tämän takia. (Grabner *et al.* 2019)



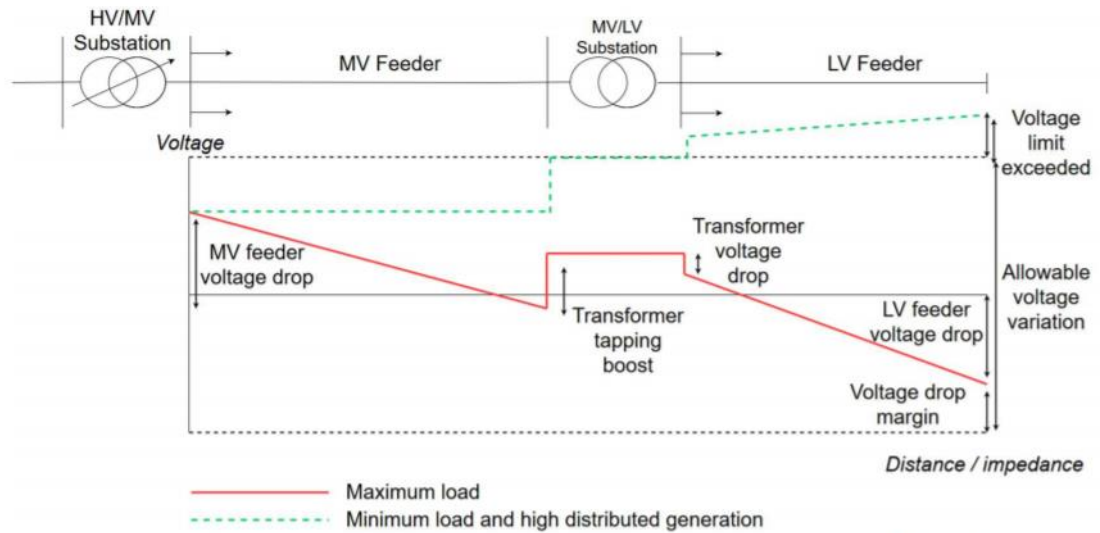
Kuva 15: Jakeluverkkoon asennetun tuotannon määrän vaikutus jännitteeseen (Grabner et al. 2019).

Hajautettu sähköntuotanto ”rikkoo” perinteisen jakeluverkon yksisuuntaisen tehonvirtauksen kaksisuuntaiseksi. Vanhoihin jakeluverkkoihin ei pystytä lisäämään kuin tietyn verran hajautettua tuotantoa, ettei asiakkaiden liitäntäpisteiden jännitteet nouse EN-50160-standardissa sallittujen rajojen yli. (Fila et al. 2008) Tämä saattaa aiheuttaa sen, että kun asiakas haluaa liittää verkkoon omaa tuotantoaan niin verkkoyhtiön on Sähkömarkkinalain 588/2013 mukaisesti kasvatettava verkon kapasiteettia yhtenä keinona tehdä muuntamosta käämikytkimellinen. Verkkoyhtiö ei voi myöskään periä maksua tästä verkon vahvistamisesta. Asiakkaan liittämisen tuotantolaitoksen on kuitenkin noudatettava tiettyjä ehtoja kuten esimerkiksi verkosta irtoamisen aiheuttama jännitekuoppa ei saa olla liian suuri. (Savolainen 2019)

4.1 Jännitteen nousu ja lasku

Jakeluverkon jännitteenalenema voidaan kuvata kaavan 3 avulla, jossa Z_k :n paikalla on käytettävän syöttävän johdon impedanssi. Jännite siis laskee, jos johdon päässä on vain kulutusta. Jos johdon päässä on tuotantoa, niin on virran suunta eri ja jännite kasvaa muuntajalta kulutukseen. Jännitteen alenema on suurimmillaan, kun kulutus on suurimmillaan ja mahdollisimman kaukana jakelumuuntajasta ja pienimmillään pienellä kulutuksella lähellä muuntajaa (Bollen & Hassan 2011). Kuvassa 16 on esitetty jännitteen käyttäytyminen tilanteessa, jossa hajautettua tuotantoa ei ole ja on vain kulutusta sekä tilanteesta, jossa on mahdollisimman vähän kulutusta ja paljon hajautettua tuotantoa. Perinteisessä tapauksessa eli yhtenäisen viivan tapauksessa verkko on suunniteltu siten, että sallitusta jännitteenalenemasta osa on keskijänniteverkossa ja osa pienjänniteverkossa ja jännite pysyy jänniterajojen sisällä. Jos verkossa on vähän kulutusta ja suuri määrä

tuotantoa eli katkoviivan tapaus, niin kuormitusvirta keskijännitepuolella on pientä ja toiseen suuntaan kuin perinteisessä tapauksessa. Kuvasta voidaan havaita, että tällöin keskijänniteverkon jännite pysyy likimain vakiona, mutta pienjänniteverkon jännite nousee. Pahin tilanne on verkon loppupäässä, jolloin kuvan mukaan jännite nousee eniten jänniterajoista.



Kuva 16: Jänniteprofiili jakeluverkossa eri tilanteissa (Martinmäki 2019).

Jos verkossa on hajautettua tuotantoa, on mielekästä ilmaista verkon jännitettä liittymispisteessä lähdön jännitteen ja resistanssin sekä tuotannon tehon avulla. Jännite jossain johtolähdön pisteessä

$$U_2 = U_1 + \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_1}, \quad (5)$$

jossa U_1 on nimellijännite muuntamon kiskossa, U_2 on nimellijännite tarkastelupisteessä, R ja X ovat johtolähdön resistanssi ja reaktanssi tarkastelupisteeseen asti sekä P ja Q ovat pätö- sekä loistehojen virtaukset. (Fila *et al.* 2008) Kaavasta 5 voidaan havaita se, että mitä enemmän hajautettua tuotantoa, niin sitä enemmän jännitteen nousua. Jännitteen nousulle on standardien mukaiset rajat ja tämä asettaa joissain tilanteissa rajan myös sille miten paljon hajautettua tuotantoa verkkoon voi liittää ilman verkon vahvistuksia.

4.2 Jännitteen vaihtelun lievennyskeinot

Jakeluverkon jänniteprofiilin parantamiseen on monia eri mahdollisuuksia. Perinteinen ja myös yleisin tapa on vahvistaa verkkoa. Toinen tapa on lisätä verkkoon aktiivisia jännitteensäätäjiä kuten käämikytkimiä ja pääjännitteen säätäjiä (eng. line voltage regulator,

abbreviation: LVR) sekä mahdollisesti myös energiavarastoja kuten akustoja. (Martinmäki 2019)

Jännitteensäätöä voidaan parantaa eri menetelmillä:

- Vaikuttamalla syöttöjohdon impedanssiin johtimen poikkipinta-alaa, materiaalia tai pituutta muuttamalla
- Vaikuttamalla tehokertoimeen (Short 2003)
- Vaihtamalla väliottokytkimen asentoa jakelumuuntajalla
- Siirtää suuria kuormia uusiin lähtöihin (Chen 2005)
- Vaihtamalla käämikytkimen asentoa jakelumuuntajalla tai kauempana olevalla sähköaseman 110/20 kV päämuuntajalla
- Vaikuttamalla hajautetun tuotannon tuottamiin pätö- ja loistehoihin
- Lisäämällä energiavaraston, kuten akuston, jakeluverkkoon
- Asentamalla lähdölle loistehoa kompensoivia laitteita
- Vaikuttamalla jakeluverkon kuormiin esimerkiksi erilaisilla tariffiratkaisuilla. (Martinmäki 2019)

Näitä menetelmiä voidaan käyttää yksinään tai yhdessä muiden menetelmien kanssa. Joitain menetelmiä on melko vaikea saada toimimaan vain yksinään.

Menetelmistä perinteisin ja myös yleisin on muuttaa johtimen poikkipinta-alaa (Martinmäki 2019). Jos johtimen poikkipinta-alan kasvattaa kaksinkertaiseksi niin hajautettua tuotantoa voidaan liittää verkkoon myös kaksinkertainen määrä. Jos johdin on todella lyhyt niin jännitteen noususta tuskin tulee ongelmaa vaan pikemminkin johtimen lämpenemisestä. (Bollen & Hassan 2011) Jos jännitteen nousun hillitsemiseksi vahvistetaan verkkoa kasvattamalla johtimen pinta-alaa, niin ongelmia saattaa tulla siinä vaiheessa, kun verkkoon joskus liitetäänkin enemmän hajautettua tuotantoa kuin on ennen ajateltu ja verkkoa joudutaan vahvistamaan uudestaan.

Jännitteen suuruuteen voidaan vaikuttaa myös muuntamoilla käämikytkimen tai väliottokytkimen avulla. Tämä menetelmä on aktiivinen. Jännitettä seurataan ja muutetaan ti-

lanteen vaatimalla tavalla. Yleensä vain sähköasemilla on käämikytkimet ja jakelumuuntamoissa väliottokytkimet tai ei välttämättä edes sitäkään (Bastman 2017). Jos jännitettä muutetaan väliottokytkimellä, joutuu asiakas kokemaan keskeytyksen. Väliottokytkimissä on myös se ongelma, että joudutaan miettimään paras mahdollinen kytkimen asento kaikkiin mahdollisiin kuormitus- ja tuotantotilanteisiin (Martinmäki 2019), mikä ei aina ole paras tapa toteuttaa jakeluverkon jännitteensäätö, mikäli kuormitustilanteiden välillä on suurta vaihtelua päivittäin.

Yksi menetelmä on asentaa johtolähtöön jännitteensäädin (eng. line voltage regulator LVR). Tämä jännitteensäädin pystyy säätämään jännitettä johtolähdöllä jännitteellisenä ja on helppo asentaa standardikokoiseen (IP44, DIN size 2), tyhjään, jakokaappiin (ABB 2020b). Tämä jakokaappi ei vaadi paljoa tilaa, joten se sopii myös tiheästi asuttuihin taajamiin. Tämä menetelmä sopii hyvin, jos johtolähdöistä vain yhdellä on jännitteenousua liikaa. Jos kuitenkin monella johtolähdöllä on jännitteenousua niin käämikytkin saattaa jo olla halvempi ratkaisu jännitteensäätimien sijaan.

Asiakkaan liitäntäpisteen jännitettä pystytään hillitsemään vaikuttamalla verkossa siirtyviin päto- ja loistehoihin. Tähän päästään vähentämällä hajautettua tuotantoa tai kasvatamalla kulutusta. Yksi toteutus voisi olla sellainen, että hajautettua tuotantoa ladataan akustoon, kun on tuotanto suuri ja kulutus vähäinen verkossa ja taas akusto tyhjennettäisiin, kun on vähän tuotantoa ja paljon kulutusta. Loistehon hallintaan voi käyttää eri menetelmiä, joista tunnetuimmat ovat hajautetulle tuotannolle määrättävä vakio tehokeroin tai loistehon säätö liittymispisteen jännitetason mukaan. (Martinmäki 2019)

Perinteinen tapa vaikuttaa muuttuneeseen tilanteeseen on vahvistaa verkkoa muuttamalla kaapelin paksuutta (Martinmäki 2019). Nopeampi tapa kuin maakaapeleiden vaihtaminen tai lisääminen on vaihtaa muuntaja käämikytkimelliseen muuntajaan. Perinteisessä tavassa saattaa tulla myös ongelmia tulevaisuudessa, jos tilanne muuttuu entisestään esimerkiksi aurinkovoimaloiden määrä verkossa lisääntykin ajateltua voimakkaammin, ja uudet, mitoitettut, kaapelit täytyy uusiksi taas.

4.3 Käämikytkimelliset strategiat jännitteensäätöön

Käämikytkin vaikuttaa muuntajan käämien kierrosten suhteeseen. Käämikytkintä voidaan ohjata manuaalisesti paikan päällä. Tämä on kuitenkin epäkäytännöllistä, että ammattihenkilö käy esimerkiksi kaksi kertaa päivässä vaihtamassa käämikytkimen asentoa jossain pienen taajaman muuntajalla. Lisäksi aurinkovoimaloiden syöttämä teho saattaa vaihdella todella useasti päivän aikana pilvien takia.

Useimmiten käämikytkin on varustettu jännitteen mittalaitteistolla ja käämikytkin säätää itse itseään jännitteen muuttuessa. Käämikytkimelle asetetaan jotkin raja-arvot, joiden sisällä jännitteen tulee pysyä (Martinmäki 2019). Jakeluverkossa tämä jänniteraja voi olla esimerkiksi $\pm 3\%$:a riippuen tilanteesta miten tarkkaa jännitteensäätöä halutaan. Normaalisti käytetään suunnittelussa jonkinlaisia varmuusmarginaaleja, käämikytkimen tapauksessa varmuusmarginaalin määrittää muun muassa mittauksen virhe sekä käämikytkimen viive ja toimintaan kuluva aika. Käämikytkintä valittaessa tulee olla selvää, että askeljännite (eng. step voltage) eli käämikytkimen asentopykälän vaihdos seuraavaan on pienempi kuin tämä jännitteen sallittu vaihteluväli (Martinmäki 2019). Jos askeljännite on liian suuri, niin jännitteen ylärajalla, kun käämikytkin haluaa laskea jännitettä, päädytään alaraja-arvon alapuolelle ja jännite ei ole halutuissa rajoissa.

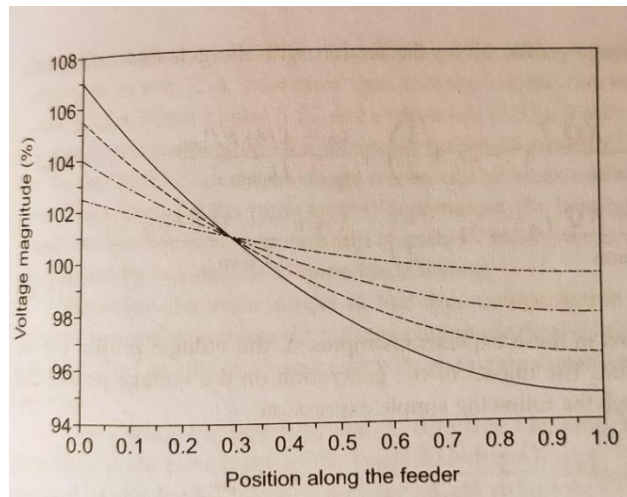
Käämikytkimellä voidaan vaikuttaa suuresti jakeluverkkoon asennettavaan suurimpaan mahdolliseen tuotantokapasiteettiin. Jänniterikkomukset tapahtuvat pääasiassa kesäpäivinä arkisin, kun tuotantoa on eniten ja kulutusta todella vähän, joten laskelmat kannattaa suorittaa tässä ”pahimmassa tilanteessa”. Jos jakelumuuntajana olisi tavallinen muuntaja, niin vaihtaessa muuntajan käämikytkimelliseen, samatehoiseen muuntajaan, niin tuotannon kapasiteetti voisi kasvaa noin 110 %. (Kolenc *et al.* 2015)

4.3.1 Johtohäviön kompensointi

Yleisin funktio ohjata käämikytkintä on käyttää johtohäviön kompensoinnin menetelmää (eng. line drop compensation, LDC) ja pyrkiä pitämään jännite halutussa tasossa tietyssä kohdassa johtolähdöllä sen sijaan että vain säätäisi jännitettä muuntajan toisiopuolen kiskossa (Sarimuthu *et al.* 2016). Standardien mukaan jännitteen tulee olla tietyissä rajoissa asiakkaan liittymispisteessä, ei kiskolla.

Johtohäviön kompensointi toteutetaan asettamalla virtamittaus jakelumuuntajan toisiopuolelle. Tämän mittauksen ja johdon impedanssin avulla pystytään laskea jännitteena- lenema tietyssä halutussa tarkastelupisteessä. (Sarimuthu *et al.* 2016)

Tämä menetelmä aiheuttaa suuren kuormituksen aikaan suuren jännitteen muuntajan lähelle ja matalan jännitteen kun kuormitus on pienimmillään kuten kuvasta 17 huomataan (Bollen & Hassan 2011). Kuvan yhtenäinen viiva edustaa suurinta kulutustilannetta ja muut viivat asteittain pienempiä kulutustilanteita. Kuvasta voidaan huomata, että haluttu jännitteensäätöpiste on x-akselilla kohdassa 0,3.



Kuva 17: Jänniteprofiili johtolähdöllä eri kuormitusilanteissa johtohäviön kompensointitekniikalla (Bollen & Hassan 2016).

Johtohäviön kompensointi on vaikeampi toteuttaa, kun muuntajalta lähtee monta johtolähtöä, joilla kulutukset ovat erilaisia. Jos esimerkiksi muuntajalta lähtee kaksi johtolähtöä, joissa toisessa on kulutus paljon suurempaa, niin jännite saattaa tulla tällä suuren kulutuksen lähdöllä liian alhaiseksi. Ennen johtohäviön kompensoinnin käyttöönottoa tulisi tietää suurimmat kuormat ja se, miten kuormitusilanteet lähtöjen välillä eroaa. Simuloinneilla voidaan etsiä johtohäviön kompensoinnin asetukset siten, että jännitteenvaihtelut kaikilla lähdöillä pysyy sallituissa rajoissa kaikissa mahdollisissa tuotanto- että kuormitusilanteissa. (Viawan *et al.* 2007)

4.3.2 Käämikytkimet sarjassa

Käämikytkimiä on verkossa monilla jännitetasoilla. Jos käämikytkin alemmalla jännitetasolla toimii ennen ylemmän jännitetason käämikytkintä, niin tilanne voi koitua pahaksi ja käämikytkimet saattavat alkaa toimimaan ”toisiaan vastaan” ja tilanne saattaa jatkua kauan aikaa, kun käämikytkimet muuttavat asentoon toistuvasti (eng. hunting). (Sari-muthu *et al.* 2016) Tämä voi tapahtua silloin kun alemman jännitetason käämikytkin toimii ennen suuremman jännitetason kytkintä. Tästä voi aiheutua myös se, että jakelumuuntajan käämikytkin joutuukin askeltamaan takaisin tilannetta edeltävään asentoon ja on näin askeltanut turhaan, mikä vähentää käämikytkimen ikää sekä suurentaa jännitteenkorjaukseen kuluvaa aikaa. (Smith & Potts 2004)

Aikaporrastusmenetelmä (eng. grading time, GT) poistaa tämän ongelman siten että aikaviive verkossa alemman jännitetason käämikytkimellä on suurempi kuin aikaviive suuremmalla jännitetasolla olevalla kytkimellä. Tämä asettaa ylemmän portaan käämikytkimen ”ensisijaiseksi” eli tämä toimii ensin. Aikaporrastuksen jälkeen alempi käämikytkin

askeltaa myös tai jos ylemmän käämikytkimen askellus on saanut jännitteen halutulle tasolle niin alemman kytkimen toiminta peruutetaan. Tästä aiheutuu viivettä jakeluverkon jännitteekorjaukseen, sillä ylemmän portaan käämikytkimen askellus pitää olla loppuun asti suoritettu, kunnes alempi käämikytkin voi vasta alkaa toimimaan. (Sarimuthu *et al.* 2016)

Aikaviiveellistä strategiaa ei tarvita, jos käämikytkimellisten muuntajien välillä on kommunikaatioväylä. Ylemmällä jännitetasolla oleva käämikytkin voi viestittää alempana oleville käämikytkimille, että on vaihtamassa asentoa, joten alemmat käämikytkimet eivät tänä aikana saa askeltaa. Kun käämikytkin on askeltanut niin se poistaa tämän estosignaalin ja toiminta voi taas jatkua normaalisti jakelumuuntajan käämikytkimellä. Tämä pienentää jännitteensäädön viivettä. Tämänlainen kommunikaatiopohjainen käämikytkimien yhteisohjaus on kuitenkin melko kallista implementoida. (Sarimuthu *et al.* 2016) Lisäongelmia tuo myös se, että kyseiset käämikytkimet ovat kaukana toisistaan ja saattavat olla eri kaupallisten toimijoiden hallinnassa (Smith & Potts 2004).

Aikaporrastuksen viivettä voidaan optimoida. Jos tunnetaan johtolähdön virta ja syöttöjohtojen impedanssit sekä jakeluverkossa että syöttävän keskijänniteverkon puolella, niin voidaan laskea jännitteensäätöpisteen jännite. Jos tämä jännite ei ole jakelumuuntajan käämikytkimen avulla korjattavissa, niin odotetaan ylemmän muuntajan jännitteekorjaustoimintaa. Mutta jos tämä jännite on taas korjattavissa, niin jakelumuuntajan käämikytkin askeltaa olettaen, että ylemmän jännitetaso muuntaja on jo askeltanut. Tämä pienentää viivettä sekä tekee rinnalla olevista kommunikaatiopohjaisista ratkaisuksista vähemmän soveltuvia. (Sarimuthu *et al.* 2016)

Transienttiaika-asetus (eng. transient time, TT) on otettu käyttöön, jotta käämikytkin ei reagoisi nopeasti ohimeneviin ylijännitteisiin. Transienttiaika on se aika, joka kuluu ennen kuin jännitteekorjaus voi alkaa. Jos halutaan optimoida käämikytkimen toiminta-aikaa, niin voidaan antaa käämikytkimelle väliotonvaihtoon käsky transienttiajan jälkeen, minkä jälkeen aika asetetaan taas aikaporrastusajaksi. Tämä nopeuttaa jännitteensäätöä antamalla jakelumuuntajan käämikytkimen korjata asentoaan yhden pykälän, jonka jälkeen jos jännite ei ole vielä kukaan palautunut sallitulle tasolle niin vasta sen jälkeen arvioida yhteistyössä ylemmän jännitetaso käämikytkimen kanssa toimista. (Smith & Potts 2004)

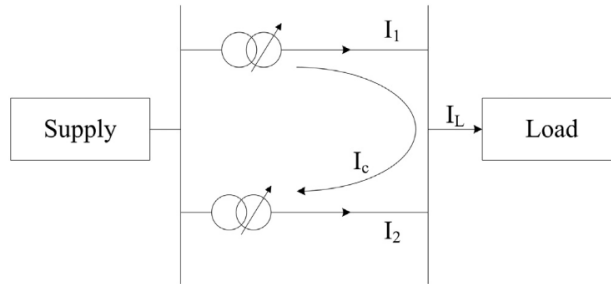
4.3.3 Käämikytkimet rinnan

Jakelumuuntajia saatetaan joutua kytkemään rinnan muuntajan vikaantuessa, huollon takia tai silloin kun halutaan muuntoaseman hallitsevan isompia kuormia (Holappa 2011; Harlow 2012). Rinnakkaistoiminta on paljon yleisempää korkeammilla jännitetasoilla verkossa, kun luotettavuus ja turvallisuus ovat suuressa asemassa, mutta voi tulla jakeluverkkoon ajankohtaiseksi silloin kun verkkoon liittyy uusia asiakkaita tai asiakkaiden kulutus kasvaa jostain syystä ja muuntajan teho on liian pieni. Tämä voi tulla eteen esimerkiksi tilanteessa, jossa talouksiin on hankittu suuria määriä sähköautoja, joita ladataan samaan aikaan päivästä. Tulevaisuudessa toki sähköautot saatetaan määrätä lataamaan esimerkiksi niinä aikoina, kun verkossa ei ole paljoa kulutusta ja tuotantoa on paljon. Muuntajan voisi tietenkin vaihtaa tässä tilanteessa hiukan isompaan, mutta taloudellisesti kannattavampaa saattaa olla kytkeä vanhan muuntajan rinnalle uusi samanlainen pienitehoinen muuntaja.

Jakeluverkon tapauksessa rinnankytkentä saattaa olla epätodennäköisempi vaihtoehto. Jos halutaan lisätä muuntajia jakeluverkkoon, niin järkevä tapa on lisätä muuntaja eri paikkaan, minkä seurauksena muuntajat eivät enää toimi rinnan. Tällöin saadaan rakennettua varayhteys (eng. back-up connection) siltä varalta, että asiakkaiden sähkönsaanti ei keskeydy tilanteessa, jossa esimerkiksi toista muuntajaa syöttävässä 20 kV:n verkossa tapahtuu vika tai korjaustöitä.

Kun jakelumuuntajia alkaa rinnankytkemään tulee ottaa huomioon tiettyjä ehtoja. Muuntajien nimellisjännitteiden tulee olla suunnilleen yhtä suuret, toisiojännitteet tulee olla samansuuntaiset eli muuntajat samaa kytkentäryhmää, oikosulkuimpedanssit tulee olla likimain samat, jos halutaan kuormittaa molempia muuntajia tasaisesti ja muuntajan nimellistehot tulisi olla samaa suuruusluokkaa (Holappa 2011).

Kun kaksi muuntajaa, joilla on eri muuntosuhteet esimerkiksi toisen muuntajien käämikytkimien asentojen kautta, asetetaan rinnan, niin muuntajien välillä alkaa kulkea kiertävä virta, jonka vaihekulma on jäljessä (Neuenswander 1971). Kuvassa 18 on esitetty havainnollistus tilanteesta. Ylempänä kuvassa olevan muuntajan käämikytkin on asettanut muuntajan toisiojännitteen alemmaa muuntajaa isommaksi. Käämikytkimiä tulisi säätää siten, että kiertävää virtaa ei olisi pitämällä käämikytkimet samassa asennossa tai minimoimalla kiertävä virta, kun käämikytkimet ovat eri asennoissa (Sarimuthu *et al.* 2016).

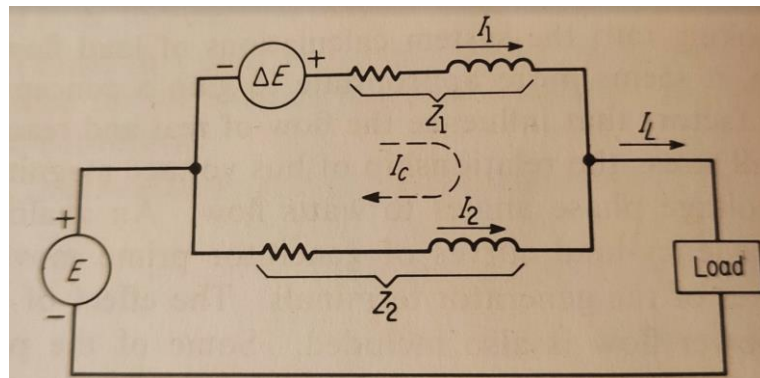


Kuva 18: Kahden käämikytkimellisen muuntajan rinnankytkentä (Sarimuthu et al. 2016).

Kuvassa 19 on esitetty yksivaiheinen sijaiskytkentä edellisestä tilanteesta, jossa käämikytkimet ovat eri asennoissa. Ylemmän muuntajan käämikytkin antaa muuntajalle ”lisäjännitteen” ΔE . Kiertävä virta

$$I_c = \frac{\Delta E}{Z_1 + Z_2}, \quad (6)$$

jossa Z_1 ja Z_2 ovat muuntajien impedansseja, jotka ovat perimmiltään reaktiivisia eli niiden X/R -suhde on suuri, joten I_c on jäljessä E :tä. Virrat I_c , I_1 ja I_2 ovat liki samassa kulmassa keskenään ja niiden kulmiin vaikuttaa kaikista eniten kuorman tehokerroin. (Neuenswander 1971)



Kuva 19: Rinnankytketyt muuntajat (Neuenswander 1971).

Käämikytkimiä voidaan operoida isäntä–seuraaja-periaatteella (eng. master–follower method) on yleisin käytetty metodi (Harlow 2012). Tässä periaatteessa ”isäntämuuntajassa” käämikytkin asetetaan seuraavaan asentoon ja ”seuraajamuuntaja” seuraa ja asettaa oman käämikytkimen samaan asentoon (Sarimuthu et al. 2016). Virta I_c ei kulje muuten kuin hetkellisesti kun käämikytkimen asentoa vaihdetaan. Toiminnan loppuksi seuraaja antaa isännälle tiedon, että on toiminut ja on valmiina ottamaan vastaan seuraavan komennon. (Harlow 2012)

Isäntä–seuraajaperiaate toimii hyvin johtohäviön kompensoinnin kanssa, vaikka tilanteessa olisi vaihteleva tehokerroin, hajautettua tuotantoa tai vastakkainen tehon virtaus. Tämän periaatteen käänttöpuoli on, että muuntajilla tulee olla sama määrä väliottoja, väliottojen askelkoot samat, samat impedanssit ja sama ensiöjännite. Tämän vuoksi tätä periaatetta suositellaan käytettäväksi tilanteessa, jossa muuntajat ovat identtiset. (Harlow 2012; Sarimuthu *et al.* 2016)

Kiertävän virran periaatteessa käytetään apupiiriä erottamaan molempien muuntajien kuormitusvirtaan summautuva kiertävä virta pois. Käämikytkimien ohjauksiin syötetään nyt vain tämä kuormitusvirta ja käämikytkin askeltaa niin, että virtojen ero yksiköiden välillä minimoituu. (Short 2003) Tässä menetelmässä tulee tietää missä tilassa jakeluverkon katkaisijat ovat. Esimerkiksi jos katkaisija on auki toisen muuntajan pienjännitepuolella ennen kiskoa, niin johtohäviön kompensointi toisella muuntajalla näkisi kaksinkertaisen virran ja asettaisi kiskojäännitteen aivan liian suureksi. (Harlow 2012)

Negatiivisen reaktanssin metodi (eng. negative-reactance compounding, NRC) asettaa johtohäviön kompensoinnin reaktanssin asetuksen negatiiviseksi. Eli korkealla reaktiivisella virralla käämikytkimen ohjaus käskee käämikytkintä alentamaan asentoaan samalle tasolle toisen muuntajan kanssa. (Short 2003) Tällä menetelmä ei saada pidettyä jännitettä tarkasti halutussa arvossa ja saattaa johtaa alhaisiin kiskojäännitteisiin (Short 2003; Harlow 2016). Lisäksi menetelmä ei toimi tarpeeksi hyvin, jos tehokerroin muuttuu paljon ja hajautetun tuotannon lisäys vaikuttaa tämän metodin toimivuuteen. Jos johtohäviön kompensointi halutaan toimivan hyvin, joudutaan lisäämään käämikytkimelle asetettua resistanssin arvoa. (Sarimuthu *et al.* 2016)

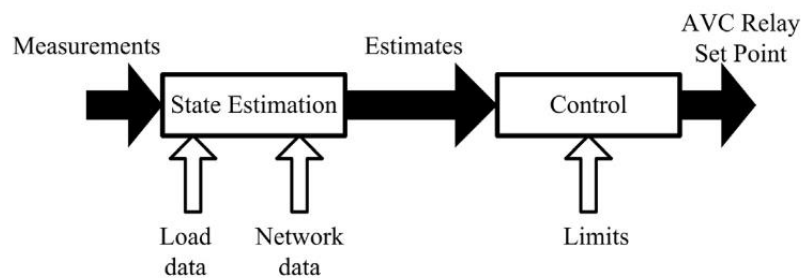
4.3.4 Moderni käämikytkinsäätö

Nykyään yleistyvät hajautetut tuotantolähteet pienjänniteverkoissa vaikuttaen tehon virtauksen suuntaan, jänniteprofiiliin muuttumiseen ja liittymispisteen jännitteen nousuun, jos pisteessä on hajautettua tuotantoa. Jännitteenousu saa aikaan sen, että käämikytkimen jännitteensäätöön annettu referenssijännite ei ole enää kelvollinen kytkimen tehokkaaseen toimintaan. Tulevaisuudessa käämikytkimen ohjauksen täytyy olla älykkäämpi ja joustavampi. Sumeaa logiikkaa (eng. fuzzy logic), neuroverkkoa (eng. artificial neural network) ja tilaestimointia voidaan tulevaisuudessa käyttää käämikytkimen ohjaukseen. (Sarimuthu *et al.* 2016)

Neuroverkkoa voidaan opettaa lataamalla tehonjakodataa eri kuormitusilanteissa. Neuroverkkoon perustuva ohjain lähettää käämikytkimelle käskyn vaihtaa asentoa, kun laskettu jännite on sallittujen rajojen ulkona. Lasketut tulokset tallennetaan tiedostoon, jotta tiedetään eri tilanteiden käyttäytymiset. Tämä neuroverkkoa hyödyntävä tapa vaatii kuitenkin paljon dataa ja testausta ennen hyväksyttävää toimintaa. (Sarimuthu *et al.* 2016)

Sumea logiikka on parempi kuin muut tekoälymenetelmät, sillä se voidaan toteuttaa yksinkertaisilla jos–sitten-yhteyksillä (eng. If–Then relations). Muita hyötyjä ovat muun muassa pienemmät laitteistokustannukset. (Sarimuthu *et al.* 2016)

Jotta voitaisiin pitää jänniteitä asiakkaan liittymispisteessä standardien sallimissa rajoissa, jännitteensäätäjä tarvitsee tarpeeksi tarkkoja tietoja jännitteistä verkon solmupisteissä. Kuvassa 20 on esitetty jännitteensäätäjän tilaestimoinnillinen toimintakaavio. Kuvassa mustat nuolet esittävät reaaliaikaista dataa ja valkoiset nuolet offline-dataa. Tilaestimoinnin vahvuus on se, että se ei vaadi mittauslaitteistoa verkon joka solmupisteeseen. (Sarimuthu *et al.* 2016)



Kuva 20: Jännitteensäätäjän toimintakaavio (Sarimuthu *et al.* 2016).

Tilaestimaattori vaatii verkkotopologiatiedot, impedanssidatan käytetyistä eri kaapeleista sekä muutamia reaaliaikaisia mittauksia. Toisaalta haittaa tuottaa se, että kaikki edellä mainitut tarvitaan, jotta säädin toimisi halutulla tavalla ja saatavilla olevan datan tarkkuus vaikuttaa jännitteensäädön laatuun. (Sarimuthu *et al.* 2016)

Älykkäät säätömenetelmät toimivat suunnilleen yhtä tarkasti kuin perinteiset menetelmät ellei jopa nopeammin tarkemmin. Hyötynä ovat vähentyneet laitteistokustannukset ja käämikytkimen toimivuuden varmistaminen esimerkiksi tilanteessa, kun jännitteensäätöön käytetyt mittalaitteistot menevät rikki. Haittoina on vuodenaikojen väliset vaihtelut tuotantoon ja kulutukseen, mikä aiheuttaa lisäongelmia, kun älykästä jännitteensäätölaitteistoa tulee opettaa uudestaan, esimerkiksi kuukausittain.

5. YHTEENVETO

Hajautetun tuotannon lisääminen jakeluverkkoon etenkin aurinkovoimaloiden muodossa tulee yleistymään tulevaisuudessa merkittävästi. Tämä johtuu päätöksenteosta kuten tukijärjestelyistä, aurinkopaneeleiden hinnan laskusta sekä eri kennoratkaisujen hyötysuhteiden kasvuista, mikä pienentää aurinkovoimalan takaisinmaksuaikaa. Kuluttajien ympäristöystävällisempään suuntaan hakeutuvalla käyttäytymisellä on myös vaikutusta aurinkovoimaloiden kysyntään. Hajautettu tuotanto aiheuttaa jakeluverkkoyhtiöille investointikustannuksia, joita saattaa myös kasvattaa tulevaisuudessa mahdollinen raju sähköautojen määrän kasvu.

Tässä kandidaatintyössä oli tarkoitus tutkia jakelumuuntajan käämikytkimen toimintaa ja sen vaikutuksiin jakeluverkossa. Työn alussa tarkasteltiin muuntajan toimintaa. Muuntajan ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta synnyttää rautasydämeen muuttuvan magneettivuon, joka indusoi toisiokäämin napojen välille käämikierrosten suhteen mukaisen jännitteen. Kolmivaihemuuntajissa käytetään erilaisia käämitystapoja riippuen eri käyttötilanteista. Näistä yleisimmät kytkennät jakelumuuntajissa toisiopuolella ovat hakatähtikytkentä ja tähtikytkentä, joista jälkimmäistä käytetään suurempitehoisemmissa jakelumuuntajissa. Suomen muuntajissa käytetään pääasiassa väliaineina eristykseen ja jäähdytykseen öljyä sekä ilmaa. Verkkolaskennassa muuntajaa voidaan kuvata yksinkertaisilla sijaiskytkennöillä redusoituna jännitetasoon, jossa laskelmat suoritetaan.

Tämän jälkeen tutustuttiin käämikytkimen toimintaan. Käämikytkin muuntaa muuntajan käämityssuhdetta muuntajan ollessa jännitteellinen. Käämikytkimessä on yleensä asento, jossa muuntajan käämikierrosten suhde säilyy, sekä jokin määrä asentoja, joissa muuntajan toisiopuolen jännitettä voidaan nostaa tai laskea liittymällä käämin väliottoihin. Väliottojärjestelyvaihtoehdot vaihtelevat muuntajan käämikytkentöjen mukaan ja eri järjestelyt vaikuttavat muun muassa kuormitushäviöihin ja eristysten suunnitteluun. Kun muuntajan käämityksen kierroslukua muuttaa, tulee jännitteen säilyä myös vaihtoheikellä. Tämä onnistuu sillä periaatteella, että tehdään kytkös seuraavaan väliottoon ennen entisen kytkennän purkamista. Käämikytkimiä on erilaisia. Öljytyypin käämikytkimiä on korvannut uudet tyhjiötekniikkaan perustuvat käämikytkinratkaisut, jotka ovat parempia energiankulutuksen ja huoltojen näkökulmasta. Käämikytkintä valittaessa tarvitaan muuntajan kilpiarvotiedot sekä käämikytkimen askeljännitteen ja nimellisvirran tiedot

sekä mahdollisesti myös tieto liittimien käyttöiästä ja huoltotarpeesta. Käämikytöntä voidaan ohjata fyysisesti paikan päällä tai negatiivisen takaisinkytkennän avulla perustuen eri mittauksiin tai estimointeihin.

Jakeluverkot ovat ennen suunniteltu sillä oletuksella, että kuluttajat toimivat vain kuluttajina eli hajautetun tuotannon verkkoon liittämässä saattaa koitua ongelmia jännitteenlaadulle esimerkiksi jännitteenousuna, joka voi aiheuttaa kuluttajien laitteiden rikkoutumista. Jänniteongelmiin yksi ratkaisusta on vaihtaa muuntamo käämikytkimelliseksi. Käämikytöntä voidaan ohjata seuraamalla jännitettä jossain pisteessä ja askeltamalla käämikytöntä haluttuun asentoon tämän mittauksen mukaan. Jännite, jota seurataan, voi olla muuntajan kiskojännite tai jokin jännite johtolähdön varrella. Jälkimmäisessä tapauksessa tarvitaan jännitemittauksen lisäksi virtamittaus muuntamolle.

Käämikytкимиä voi olla verkossa myös enemmän. Jotta eri jännitetasojen käämikytkimet eivät ala toimimaan toisiaan vastaan, täytyy käyttää aikaporrastusmenetelmiä tai käämikytkimien tulee kommunikoida keskenään. Jos käämikytkimelliset muuntajat toimivat rinnan, tulee ottaa huomioon tilanteet, joissa muuntajien välille syntyy kiertävä virta. Kiertävä virta tulisi minimoida ja samalla säätää jännitettä.

Jännitteensäätöä voidaan parantaa moderneilla menetelmillä kuten tilaestimoinnilla. Jännitettä ei tarvitse mitata vaan voidaan estimoida jännitteitä verkon solmupisteissä käyttämällä reaaliaikaisia mittauksia muuntamolta sekä offline-dataa. Modernit menetelmät vaativat vähemmän mittauksia, mutta ongelmia jännitteensäätöön tuovat esimerkiksi estimoitujen arvojen tarkkuudet sekä käämikytkimen reagointinopeus.

Elektroniset käämikytkimet tällä hetkellä ovat vielä kehityksen alkuvaiheessa. Jotta edistystä tapahtuisi, tulisi elektroniset osat kestää paremmin verkon vikojen aikaisia ylijännitteitä eli tutkia eri suojausmahdollisuuksia, kytkimien hinnat laskea ja luotettavuus olla korkealla tasolla. Elektronisilla käämikytkimillä on kuitenkin monia etuja. Huoltoja olisi vähemmän kuin mekaanisilla käämikytkimillä, sillä liikkuvia osia ei ole. Nopeus vaihtaa asentoa on mikrosekuntien luokkaa ja voidaan "hypätä" monen asennon yli, toisinkuin mekaanisissa käämikytkimissä. Lisäksi jännitekuoppia ja flicker-ilmiötä voisi lieventää elektronisen käämikytkimen avulla. (Faiz & Ziaholah 2011) Modernit jännitteensäätömenetelmät, jotka esimerkiksi hyödyntävät säädädataa hajautetun tuotannon tehojen laskeamisessa, tulisivat myös sovelluskelpoisemmiksi parantuneen asennonvaihtonopeuden seurauksena.

LÄHTEET

- ABB (2020a). Vacuum tap-changers – a logical progression for transformers. Saatavissa (viitattu 24.4.2020): <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/25c7292e2d5e19d7c1257b2700515948.aspx>.
- ABB (2020b). Line voltage regulator for low voltage grids. Saatavissa (luettu 29.4.2020): <https://new.abb.com/products/transformers/dry-type/line-voltage-regulators>.
- Aura, L. & Tonteri, A. (1994). Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, s. 280–288.
- Bastman, J. (2017). Opintomoniste: Kolmivaihejärjestelmät, Tampereen teknillinen yliopisto, s. 79–92.
- Bollen, M. & Hassan, F. (2011). Integration of Distributed Generation in the Power System. Hoboken, N.J: Wiley, 2011. Print. pp. 141–178.
- Chen, W. (2005). The Electrical Engineering Handbook. Burlington: Academic Press. pp. 755.
- Elovaara, J. & Haarla, L. (2011). Sähköverkot 1: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto. s. 347, 377.
- Faiz, J. & Siahkolah, B. (2011). Electronic Tap-changer for Distribution Transformers (Vol. 2). Saatavissa (luettu 18.3.2020): <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007%2F978-3-642-19911-0>. pp. 80–83, 171–172.
- Fila, M., Taylor, G., Hiscock, J., Irving, M. & Lang, P. (2008). Flexible voltage control to support Distributed Generation in distribution networks. 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference, 1–5.
- Grabner, M., Souvent, A., Suljanović, N., Košir, A., & Blažič, B. (2019). Probabilistic methodology for calculating PV hosting capacity in LV networks using actual building roof data. *Energies*, 12(21) Saatavissa (viitattu 24.4.2020): <http://dx.doi.org.libproxy.tuni.fi/10.3390/en12214086>. s. 11–13.
- Holappa, T. (2011). Terässlaturon sähkönjakelu ja kunnossapito, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, s. 32–33. Saatavissa (viitattu 22.3.2020): https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/29843/Holappa_Tommi.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- IEEE Std C57.131-1995: IEEE Standard Requirements for Load Tap Changers. (1995). IEEE. Saatavissa (viitattu 4.3.2020): <https://ieeexplore.ieee.org/document/477878>. pp. 4–14, 34–40.
- Kolenc, M., Papič, I., & Blažič, B. (2015). Assessment of maximum distributed generation penetration levels in low voltage networks using a probabilistic approach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64, Saatavissa (viitattu 24.4.2020): <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.063>. s. 512–514.

Martinmäki, S. (2019). A robust coordinated voltage control in low voltage networks validated through an experimental study: Collaboration of an on-load tap changer and a battery energy storage Tampere University. Saatavissa (viitattu 25.2.2020): <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-20191115875>. pp. 4–17.

Mokkapaty, S. Weiss, J. Schalow, F. and Declercq, J. (2017). "New generation voltage regulation distribution transformer with an on load tap changer for power quality improvement in the electrical distribution systems," in CIREN - Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 784-787, 10 2017. Saatavissa (viitattu 17.4.2020): <https://ieeexplore.ieee.org/document/8316102>.

Neuenschwander, J. (1971). Modern power systems. Scranton, PA: International Textbook. pp. 230–231, 246–247.

Perttu, J. (2014). Käämikytkinsäätäjien ja kondensaattorisäätäjien asettelut kantaverkossa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa (viitattu 14.3.2020): <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201501151328>. s. 27–28.

Reinhausen (2020a). On-load tap-changer RMV-A 600 A / 1320 A, Operating instructions. Saatavissa (viitattu 22.2.2020): <https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahU-KEwiGksLnI8DoAhUHYcAKHZR6DBUQFjAAegQIA-xAB&url=https%3A%2F%2Fwww.sj-stiftung.de%2FXparodownload.ashx%3DFraid%3D12815&usg=AOvVaw20CxpzbzGGa1aSBAtJ4XvU>. pp.15–19.

Reinhausen (2020b). On-load Tap-changers for Power Transformers A Technical Digest. Saatavissa (luettu 26.4.2020): https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=22&ved=2ahU-KEwjbudbUh4vpAhUG2gQKHSqeB484FBAWMAF6BAq-DEAE&url=http%3A%2F%2Fwww.nioec.com%2FTraining%2F%25D8%25B7%25D8%25B1%25D8%25A7%25D8%25AD%25D9%258A%2520%25D9%25BE%25D8%25B3%25D8%25AA%2520%25D9%2587%25D8%25A7%25D9%258A%2520HV%2FSubstations%2FTraining%2Fen_OLTC.pdf&usg=AOvVaw3KHGWPoFcKuT-ub6LclSDe. pp. 9.

Santoso, S. & Beaty, W. (2018). Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. McGraw-Hill Professional. Saatavissa (viitattu 22.2.2020): <https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9781259642586>.

Sarimuthu, C., Ramachandaramurthy, V., Agileswari, K., & Mokhlis, H. (2016). A review on voltage control methods using on-load tap changer transformers for networks with renewable energy sources. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62(C), 1154–1161. Saatavissa (viitattu 15.3.2020): <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.016>.

Savolainen, M. (2019). Aurinkovoimaloiden vaikutukset pienjänniteverkkoon – case Järvi-Suomen Energia. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Saatavissa (luettu 28.4.2020): <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/159638>. s. 30, 35.

Short, T. (2003). Electric power distribution handbook. Boca Raton (FL): CRC Press. pp. 233–262.

Smith, C., Potts, S., & Redfern, M. (2004). Optimised and pre-emptive strategies for on-load tap changing transformer control relays. Eighth IEE International Conference

on Developments in Power System Protection, 500, 526–529. Saatavissa (viitattu 22.3.2020): <https://doi.org/10.1049/cp:20040177>. pp. 526–529.

Neumann, M. (1978). Tap changing voltage regulator which eliminates preventive auto-transformer. U.S. Patent No. 4,130,789. Saatavissa (luettu 27.4.2020): <https://patents.google.com/patent/US4130789A/en>.

Viawan, F. A., Sannino, A., & Daalder, J. (2007). Voltage control with on-load tap changers in medium voltage feeders in presence of distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 77(10), 1314–1322. Saatavissa (viitattu 24.4.2020): <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.09.021>. s. 1316

Weckx, S., González de Miguel, C., De Rybel, T., & Driesen, J. (2013). LS-SVM-based On-Load Tap Changer Control for Distribution Networks with Rooftop PV's. Saatavissa (viitattu 23.3.2020): <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/244367>.

Weedy, B., Ekanayake, J., Cory, B., Jenkins, N. & Strbac, G. (2012). Electric power systems. Saatavissa (luettu 13.3.2020): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=978379>. pp. 129.

Zecchino, A., Hu, J., Coppo, M. & Marinelli, M. (2016). Experimental testing and model validation of a decoupled-phase on-load tap-changer transformer in an active network. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 10(15), 3834–3843. Saatavissa (viitattu 22.3.2020): <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0352>.