

Maakaapeliverkon maasulkuvirran kompensointi- menetelmien kehittäminen

A. Nikander, R. Quinn, P. Rasilo

ALKUSANAT

Tämä raportti esittelee Tampereen yliopiston (TAU) Sähkötekniikan yksikössä tehdyn tutkimushankkeen ”Maakaapeliverkon maasulkuvirran kompensointimenetelmien kehittäminen” keskeisiä tuloksia. Tutkimus on tehty Sähkötutkimuspoolin rahoituksella.

Esitämme kiitokset hankkeen johtoryhmälle ja kaikille kyselyihin osallistuneille sähköverkkoyhtiöille sekä keskusteluissa mukana olleille henkilöille.

Hankkeen johtoryhmään kuuluivat:

Petri Hovila, ABB Oy, puheenjohtaja

Mika Loukkalahti, Helen Sähköverkko Oy

Jarno Hakala, Elenia Oy

Matti Pesonen, PKS Sähkönsiirto Oy, R4

Tuukka Heikkilä, Energiateollisuus ry, Sähkötutkimuspooli

Ulkopuolisena hankkeen asiantuntijana toimi Atte Saarni (Tammerfast Oy)

Tutkimuksen toteutus (Tampereen yliopisto):

Pertti Järventausta, hankkeen vastuullinen johtaja, TAU

Ari Nikander, hankkeen projektipäällikkö, TAU

Paavo Rasilo, TAU

Raymond Quinn, TAU

Tampereella 2020

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS.....	1
1.1	Tavoitteet.....	3
2	UUDENTYYPPIINEN MENETELMÄ MAASULKUVIRRAN HAJAUTETTUUN KOMPENSOINTIIN	4
3	MENETELMÄN VAIKUTUKSET VIKAVIRTAAN, SUOJAUKSEEN JA VERKON KÄYTTÖÖN	6
3.1	Hajautettu kompensointi.....	6
3.2	Hajautetun kompensoinnin vaikutus vikavirran suuruuteen	8
3.2.1	Uudentyyppisen kompensointitavan vaikutus maasulkuvirtaan.....	12
3.3	Hajautetun kompensoinnin toteutuksen vaikutukset vikavirran suuruuteen, verkon suojaukseen ja käyttöön.....	14
3.3.1	Maasulkuvirran suuruus.....	15
3.3.2	Vaiikutukset verkon suojaukseen.....	15
3.3.3	Nollajännitteen ja summavirtojen jälkivärähtelyilmiöt.....	16
3.3.4	Vaiikutukset verkon käyttöön	18
4	SÄHKÖVERKKOYHTIÖIDEN KOMPENSOINTIKÄYTÄNTÖJÄ JA VAATIMUKSIA UUDELLE MENETELMÄLLE	20
4.1	Sähköverkkoyhtiöille suunnattu kysely	20
4.2	Kaapeloinnin ja kompensoinnin tavoitteet	21
4.3	Kompensoinnin luotettavuus ja mitoitus	23
4.4	Keskitetyn kompensoinnin säätö, mittaukset ja käyttötapa.....	24
4.5	Maasulkuvirran resistiivinen komponentti.....	24
4.6	Kaupunkiyhtiön käytännöt.....	25
4.7	Uudentyyppinen hajautettu kompensointimenetelmä	26
5	LAITTEEN TOTEUTETTAVUUS	29
5.1	Kompensointikuristimen koon arviointi	29
5.1.1	Toroidisydäminen kuristin	30
5.1.2	Ei sydäminen kuristin.....	30
5.1.3	Maadoitusmuuntaja	30
5.2	Johtopäätökset	31
6	YHTEENVETO.....	32
7	LÄHDELUETTELO.....	34
	APPENDIX 1: EVALUATING A SIZE OF SMALL COMPENSATION UNIT	35

1 JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS

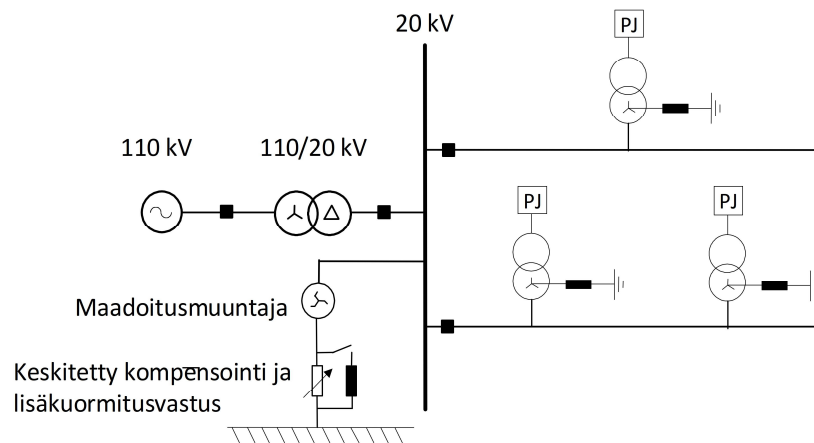
Keskeytyshaittoja koskevien selvitysten mukaan jo lyhyistäkin sähkökatkoista seuraa taloudellista haittaa eri sähkönkäyttäjryhmille. Keskeytykset heikentävät myös sähkön toimituksen laatua. Sekä pidemmät että lyhyet keskeytykset ovat mukana myös viranomaisen verkkoyhtiöiden tehokkuuden arviointiin käyttämässä valvontamallissa. Asiakkaiden lisäksi keskeytyksillä on taloudellinen merkitys myös sähköverkkoyhtiöille. Vuonna 2013 voimaan astunut Sähkömarkkinalaki velvoittaa verkkoyhtiöt parantamaan sähkön jakelun toimitusvarmuutta merkittävästi [1]. Edellä mainituista syistä sähköverkkoyhtiöt ovat alkaneet pyrkiä jakeluverkkoon, joka on suojassa sään vaikutuksilta. Tällainen verkko edellyttää monissa tapauksissa keskijänniteverkkojen laajamittaista kaapelointia. Tavoitteena ei välttämättä ole kokonaan kaapeloitu verkko.

Keskijänniteverkkojen rakenne ja ominaisuudet muuttuvat, kun maakaapeleita asennetaan yhä enemmän myös laajoihin haja-asutusalueiden verkkoihin taajamien ulkopuolella, missä sähkönjakelu on perinteisesti hoidettu ilmajohdoilla. Kaapeloinnin seurauksena verkkojen kapasitiiviset maasulkuvirrat kasvavat nopeasti. Kaapelointiasteen kasvaessa kosketusjännitevaatimusten täyttäminen edellyttää yleensä maasulkuvirran kompensointia. Myös verkkojen loistehon tuotanto kasvaa ja loistehoa joudutaan kompensoimaan reaktoreilla. Johtokohtaisilla rinnakkaiskuristimilla voidaan kompensoida sekä maasulkuvirta että kaapelin tuottama loisteho samalla yksiköllä.

Kaapeliverkossa maasulkuvikojen suhteellinen osuus kaikista vioista on suurempi avojohtoverkkoon verrattuna, missä oikosulkuviat ovat yleisempiä. Myös keskijänniteverkon vikatyypit muuttuvat kaapeloinnin myötä. Kaapeliverkoille tyypilliset katkeilevat maasulut yleistyvät.

Laajoissa haja-asutusalueiden keskijänniteverkoissa yleisimmäksi maasulkuvirran kompensointikäytännöksi on muodostunut keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin yhdistelmä. Siten voidaan välttää pelkkään hajautettuun kompensointiin liittyviä suojausongelmia sekä jakaa kompensointikapasiteettia lähdöille, jolloin korvattavuus häiriötilanteissa paranee. Hajautetussa kompensoinnissa lähtöjen varsille sijoitetaan pienempiä, kiinteitä kompensointiyksiköitä. Riippuen kaapelipoikkipinnoista, haaroista ja verkon luontaisista jakorajoista, tyypillisesti noin 5 - 10 km kaapelia kompensoidaan yhdellä yksiköllä. Keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin suhteelliset osuudet vaihtelevat hieman yhtiöittäin, mutta yleensä pääosa maasulkuvirrasta pyritään kompensoimaan hajautetusti. Usein myös tietty määrä kaapelia kaapelilähdön alkupäästä kompensoidaan keskitetysti sähköasemalle sijoitettavan säädettävän Petersenin kelan avulla. Tavoitteena voi olla myös kompensoida hajautetusti tietty prosenttiosuus koko verkon maasulkuvirrasta.

Perinteisiä sammutetun verkon maasulkusuojauksen menetelmiä käytettäessä, suojauksen toteuttamiseen tarvitaan verkon tähtipisteen ja maan välille kytkettävä lisäkuormitusvastus ja sen ohjaukseen käytettävä automatiikka. Tähtipistekomponentteja varten tarvitaan useimmiten myös maadoitusmuuntaja, koska 110/20 kV päämuuntajan 20 kV käämit on usein kytketty kolmioon vastaten kytkentäryhmää YNd11.



Kuva 1.1 Maasulkuvirran kompensoinnin periaatekuva: Keskitetty ja hajautettu kompensointi.

Laajassa maakaapeliverkossa keskitetysti kompensoitavan virran suuruus nousee helposti muutamaan sataan ampeeriin. Tämä yhdessä maadoitusmuuntajan, lisäkuormitusvastuksen ja säätöjärjestelmän kanssa nostaa kompensoinnin hintaa. Suurivirtainen keskitetty Petersenin kela on verkon turvallisen käytön näkökulmasta tärkeä komponentti. Vaikka kompensointikelojen viat ovat harvinaisia, korvaavan kompensointikapasiteetin saatavuus pitää ottaa huomioon.

Kun merkittävä osa verkon kapasitiivisesta maasulkuvirrasta kompensoidaan keskitetysti, verkon kytkentämuutokset ja vikalaukaisut saavat aikaan kompensoinnin vinovirityksen kasvamisen hetkellisesti. Keskitetyn kompensointikelan säätäjältä menee tietty aika kompensoinnin uudelleen virittämiseen asetettuun vinoviritysarvoon. Tällä saattaa olla merkitystä tilanteissa, joissa verkkoon tulee nopeasti uusi vika, jolloin kompensointi ei välttämättä ehdi säätyä välillä. Mitä suuremman osan hajautettu kompensointi kattaa kokonaiskompensoinnista, sitä paremmin kompensointi siirtyy kytkentämuutosten ja vikalaukaisujen yhteydessä verkon mukana.

Maakaapeleiden maakapasitanssit tuottavat maasulussa suuren kapasitiivisen varausvirran, joka kulkee kaapelin nollaimpedanssin läpi. Tällöin vikavirtaan syntyy verkon nollajännitteeseen nähden resistiivinen komponentti, jota ei voida kompensoida passiivisilla kompensointimenetelmillä. Tätä resistiivistä komponenttia pyritään pienentämään hajautetun kompensoinnin avulla [2].

Atte Saarni Tammerfast Oy:stä on esittänyt ajatuksen uudentyyppisestä tavasta kompensoida maakaapeliverkon maasulkuvirtaa [3]. Tarkoituksena on kompensoida maakaapelin tuottama maasulkuvirta kaapelijatkoksen yhteyteen sijoitettavan kompensointilaitteen avulla. Tällöin jokaisen kahden kaapelijatkoksen väliin jäävän kaapeliosuuden tuottama maasulkuvirta, esimerkiksi noin 1 - 3 A, kompensoidaisiin erikseen. Periaatteessa pieni kompensointiyksikkö voitaisiin tarvittaessa sijoittaa myös maan päälle, esimerkiksi jakelumuuntamon yhteyteen. Tällaisella laitesovelluksella päästäisiin vielä nykyistäkin tasaisempaan hajautettuun kompensointiin.

1.1 Tavoitteet

Tutkimushankkeen yleisenä tavoitteena oli kerätä sähköverkkoyhtiöiden kokemuksia nykyisistä kompensointi- ja suojausmenetelmistä sekä mahdollisista haasteista ja kehittämistarpeista niihin liittyen. Tämä tavoite tuki sekä hankkeessa tutkitun uudentyypin kompensointiratkaisun vaikutusten arviointia että yleisemmin aihepiiriin liittyvän tutkimuksen kohdentamista tulevaisuudessa.

Tavoitteena oli selvittää uudentyypin maasulkuvirran kompensointimenetelmän vaikutuksia osittain tai kokonaan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöihin sekä verkon suojaukseen ja käyttöön nykyisiin käytäntöihin verrattuna. Tutkimuksessa tarkasteltiin mm. kompensoinnin tasaisuuden vaikutusta maasulkuvirran suuruuteen.

Yhteistyössä sähköverkkoyhtiöiden kanssa selvitettiin, miten kyseisen laitteen eristystaso ja maasulun kesto aika käyttäjäsuojat ylittäen tulisi määrittää. Maan alle sijoitettuna kyseessä olisi vaikeasti ja kalliisti vaihdettava laite. Siksi sen suunnittelussa ja mitoituksessa pitäisi varautua myös mahdollisiin poikkeuksellisiin käyttötilanteisiin, jolloin maasulku voi olla huomattavasti suojauksen toiminta-aikoja kauemmin päällä tai peräkkäisiä vikoja voi tulla useita ilman, että laite ehtii merkittävästi jäähtyä välillä. Kompensointilaitteelle määriteltiin yhteistyössä sähköverkkoyhtiöiden kanssa tekniset vaatimukset, jotka laitteen tulisi täyttää. Tämä hyödyttää verkkoyhtiötä sekä määrittelee vaatimukset laitteen tekniselle suunnittelulle.

Perinteisen keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin kustannusten avulla maasulkuvirran kompensoinnille voidaan määrittää hinta-arvio kompensoitavaa ampeeria kohti (€/A). Hinta-arvioissa tukeuduttiin pääasiassa Energiaviraston julkaisemiin kompensointilaitteiden yksikköhintoihin [4]. Jos vastaava verkko kompensoitaisiin uudentyypisellä menetelmällä, laitteelle saatiin määritettyä jonkinlainen kannattavuusraja verkkoyhtiön näkökulmasta (€/kpl), kun yhden yksikön kompensoima virta tunnetaan.

Tavoitteena oli myös kompensointilaitteen toteutettavuuden selvittäminen. Tämä edellytti laitteen karkeaa suunnittelua, mutta varsinainen tuotekehitys rajattiin hankkeen ulkopuolelle. Laitteen paino ja mitat vaikuttavat mm. sen mahdolliseen sijoituspaikkaan. Alustavan suunnittelun avulla arvioitiin laitteen aktiivisen osan kokoa ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Hankkeen tuloksena esitettiin yhteenveto nykyisistä kompensointikäytännöistä, verkkoyhtiöiden käyttökokemuksista sekä kehittämistarpeista. Lopputuloksena esitettiin myös johtopäätökset uudentyypin kompensointilaitteen eduista ja haasteista nykyisiin menetelmiin verrattuna.

2 UUDENTYYPPIINEN MENETELMÄ MAASULKU- VIRRRAN HAJAUTETTUUN KOMPENSOINTIIN

Maasulkuvirta kompensoidaan keskitetysti joko päämuuntajan tähtipisteeseen tai maadoitusmuuntajan (ZN) avulla muodostettuun tähtipisteeseen kytkettävällä Petersenin kelalla. Menetelmä tarvitsee myös säätöjärjestelmän toimilaitteineen. Keskitetysti sammutetussa verkossa suojauksen toteuttamiseen tarvitaan yleensä myös verkon tähtipisteen ja maan välille kytkettävä lisäkuormitusvastus ja sen ohjaukseen käytettävä automaatiikka. Tähtipistekomponentteja varten tarvitaan usein myös maadoitusmuuntaja.

Keskitetty kompensointi tarvitsee myös varakapasiteettia kelan tai sen käyttöön liittyvien komponenttien vikaantumista ajatellen. Varakapasiteetti voi olla sähköasemakohtaista tai alueellista, jolloin kytkentäjärjestelyjen avulla kompensointikapasiteettia voidaan siirtää sähköasemalta toiselle. Myös nykyinen hajautettu kompensointi pienentää olennaisesti varakapasiteetin tarvetta. Kompensointikelojen viat ovat kuitenkin suhteellisen harvinaisia.

Kompensoitavan lisäämpeerin hinta on yleensä halvempi isommissa yksiköissä. Keskitetyn kompensoinnin säätöjärjestelmän kautta saadaan verkosta myös informaatiota, jota ei ole mahdollista saada ilman keskitetysti verkon tähtipisteeseen liitettyä mittaus- ja säätöjärjestelmää. Myös nykyisin käytettävä maasulkusuojaus edellyttää verkon riittävää vikavirran resistiivistä komponenttia kompensointitavasta riippumatta.

Maasulkuvirta kompensoidaan perinteisesti keskitetysti kaupunkien kaapeliverkoissa, joissa lähtöjen pituudet jäävät suhteellisen pieniksi. Sama pätee myös haja-asutusalueiden ilmajohtoverkkoihin, joissa maasulkuvirta jää pieneksi johtuen avojohtojen pienestä maakapasitanssista. Näissä verkkotyypeissä hajautetulle kompensoinnille ei ole suoraan maasulkuilmiöihin perustuvaa tarvetta. Maaseutuverkkojen laajamittaisen kaapeloinnin seurauksena syntyy pitkiä, osittain tai kokonaan kaapeloituja lähtöjä. Tällöin maasulkuvirtaa on tarkoituksenmukaista kompensoida myös hajautetusti mahdollisimman lähellä kapasitiivisen maasulkuvirran tuotantoa. Jotta koko verkon kompensointi saadaan pidettyä riittävän lähellä resonanssiviritystä, tarvitaan myös säädettävä keskitetty kompensointi. Yleiseksi käytännöksi haja-asutusalueilla toimivissa verkkoyhtiöissä onkin muodostunut soveltaa sekä keskitettyä että hajautettua kompensointia verkoissa, joita kaapeloidaan laajamittaisesti.

Kun verkon kytkentätila muuttuu joko kytkinlaitteen ohjauksen tai suojalaitteen toiminnan seurauksena, verkon viritystila muuttuu, koska irtikytkettyvän johto-osan hajautettu kompensointi ei täysin vastaa sen kaapeleiden tuottamaa maasulkuvirtaa. Tällöin verkon kompensointi toimii hetkellisesti epäviriteisena, kunnes keskitetty kompensointi säätää verkon viritystilan halutuksi uudessa kytkentätilanteessa. Vaikka kaapeloiduissa verkoissa peräkkäisten vikojen todennäköisyys on suhteellisen pieni, verkkoihin jää usein myös ilmajohto-osuuksia.

Maasulkuvirran resistiivinen komponentti on verrannollinen johto-osuuksilla kulkevan varausvirran suuruuteen. Siksi resistiivinen komponentti on sitä pienempi, mitä vähemmän varausvirtaa lähdöllä siirtyy maasulun aikana.

Hankkeessa tarkasteltiin uudenlaista maasulkuvirran kompensointitapaa, jonka tarkoituksena on kompensoida maakaapelin tuottama maasulkuvirta kaapelijatkoksen yhteyteen sijoitettavan kompensointilaitteen avulla [3]. Kahden kaapelijatkoksen välisen kaapelin maasulussa tuottama kapasitiivinen varausvirta riippuu kaapelin tyypistä, pituudesta ja poikkipinnasta. Seuraavassa on esitetty kuvaus kyseisestä menetelmästä, joka ei ota kantaa itse laitteen rakenteeseen, kokoon tai mittoihin.

Verkkoyhtiöiden tyypillisesti käyttämällä kaapelipoikkipinnoilla 50 – 240 mm², vastaten 20 kV kolmijohdimista kaapelia AHXAMK-W, kaapelin tuottama maasulkuvirta kilometriä kohti vian aikana on noin 1,9 – 3,4 A eli noin 27 – 49 kertainen avojohtoon verrattuna.

Uudenlaisen kompensointimenetelmän tavoitteena on komponentti, jota voitaisiin käyttää myös maakaapeleiden yhdistämiseen keskijännitteisissä maakaapelijärjestelmissä. Vesitiiviin rakenteen sisälle on tarkoitus sijoittaa maadoitusmuuntaja (ZN) ja sen avulla muodostettuun tähtipisteeseen kytkettävä maadoituskuristin. Kompensointimenetelmä on siis sama kuin nykyisessä keskitetyssä kompensoinnissa. Uutta on lähinnä pienempi koko ja kompensoinnin hajauttaminen verkkoon nykyistä hajautettua kompensointiakin tasaisemmin.

Ehdotetun uuden kompensointitavan kustannukset ja mahdolliset hyödyt koko järjestelmän kannalta riippuvat verkon lähtötilanteesta, kun siihen aletaan suunnitella kompensointia. Verkon lähtötilanteena voi olla esimerkiksi:

- Maasta erotettu ilmajohto- tai sekaverkko
- Keskitetysti kompensoitu ilmajohto- tai sekaverkko
- Keskitetysti ja hajautetusti kompensoitu seka- tai kaapeliverkko

Pelkästään hajautetusti kompensoituja verkkoja on pyritty välttämään niissä esiintyvien suojausongelmien, erityisesti sympatialaukaisujen takia.

Myös voimassaoleva Sähkömarkkinalaki muodostaa rajoittavan aikaikkunan nykyisten verkkojen laajamittaiselle kaapeloinnille ja kompensoinnille. Vuonna 2013 voimaan astunut Sähkömarkkinalaki velvoittaa verkkoyhtiöt parantamaan sähkön jakelun toimitusvarmuutta merkittävästi. Laki edellyttää, että haja-asutusalueilla vapaa-ajan asunnot pois lukien ei saa siirtymäajan jälkeen esiintyä yli 36 tunnin ja taajamissa yli 6 tunnin sähkökatkoksia. Sähkömarkkinalaki velvoittaa, että jakeluverkonhaltijan on täytettävä 51 §:n 1 momentin 2 ja 3 kohdassa säädetyt vaatimukset vastuualueellaan viimeistään 31 päivänä joulukuuta 2028. Joillakin verkkoyhtiöillä on jatkoaika, joka ulottuu vuoteen 2036 [1].

Koska uusi laite on tarkoitus asentaa maan alle, sitä ei olisi taloudellista asentaa jo rakennettuun kaapeliverkkoon, johon on usein jo asennettu myös hajautettu kompensointi. Mikäli laite sijaitsi maan päällä, sitä voitaisiin käyttää monipuolisemmin myös aikaisemmin kaapeloiduissa verkoissa. Haja-asutusalueilla toimivat verkkoyhtiöt soveltavat usein sekä keskitettyä että hajautettua kompensointia. Siten uusi menetelmä muodostaisi lähinnä vaihtoehdon nykyiselle hajautetulle kompensoinnille.

3 MENETELMÄN VAIKUTUKSET VIKAVIRTAAN, SUOJAUKSEEN JA VERKON KÄYTTÖÖN

Kun laaja avojohtoverkko kaapeloidaan joko kokonaan tai osittain, syntyy yleensä pitkiä kaapeloituja lähtöjä tai sekalähtöjä, jotka poikkeavat sähköisiltä ominaisuuksiltaan avojohtolähdöstä tai taajaman lyhyemmästä kaapelilähdöstä. Lähdön ja koko verkon maasulussa tuottama varausvirta kasvaa voimakkaasti. Varausvirta on kapasitiivista suhteessa verkon nollajännitteeseen. Varausvirran siirtyminen maasulkutilanteessa pitkän maakaapelin nollaimpedanssin läpi aiheuttaa myös vikavirtakomponentin, joka on saman vaiheinen nollajännitteen kanssa. Jäännösvikavirran resistiivinen virtakomponentti on merkityksellinen, koska sitä ei voida kompensoida passiivikomponenteilla, kuten Petersenin kelalla. Siksi sen vaikutus maadoitusjännitteeseen tulisi pystyä huomioimaan. Suurin merkitys jäännösvikavirran suuruudella on verkon ilmajohto-osien erillismaadoituksissa, joissa reduktiovaikutusta ei ole. Perinteinen sammutetun verkon maasulkusuojaus perustuu maasulkuvirran resistiivisen komponentin ja sen suunnan määrittämiseen.

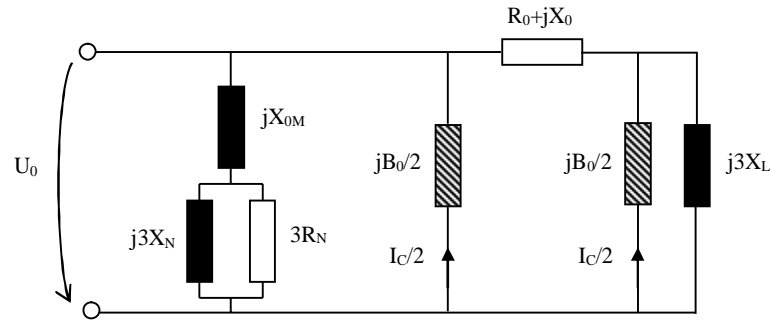
Verkon kapasitiivinen 50 Hz maasulkuvirta voidaan kompensoida tehokkaasti sammutuskuristimilla. Jäljelle jäävään vikakohdan jäännösvikavirtaan vaikuttavat

- kuristimien 50 Hz vinovirityksestä riippuva reaktiivinen jäännösvirta,
- 50 Hz resistiivinen virtakomponentti ja
- yli 50 Hz taajuiset yliaaltovirrat.

Seuraavassa tarkastelussa keskitytään lähinnä hajautetun kompensoinnin ja sen toteutuksen vaikutuksiin maasulkuvirran resistiivisen komponentin kannalta. Uuden menetelmän vaikutus reaktiiviseen jäännösvirtaan riippuu paljolti kompensoinnin tarkkuudesta ja siitä käytetäänkö sitä yksistään vai säädettävän keskitetyn kompensoinnin kanssa. Rautasydämisten kelojen mahdollinen kyllästyminen maasulkutilanteessa voi myös synnyttää harmonisia virtoja jäännösmaasulkuvirtaan. Tätä ei kuitenkaan voida arvioida, koska uuden laitteen kyllästysominaisuuksia ei tunneta.

3.1 Hajautettu kompensointi

Maakaapelin sarjanollaimpedanssi vaikuttaa maasulkuilmiöihin järjestelmissä, joissa on pitkiä kaapelilähtöjä tai sekalähtöjä, jotka sisältävät runsaasti maakaapelia. Tällöin lähdön ekvivalentti-impedanssilla on sekä resistiivinen että reaktiivinen osa. Tämä resistanssi vaimentaa resonanssia perinteisesti sammutetuissa järjestelmissä ja kasvattaa siten maasulkuvirtaa sekä pienentää nollajännitettä suuri-impedanssisissa maasuluissa. Koska maasulkuvirran kasvu vaikuttaa maadoitus- ja kosketusjännitteisiin, lähdön sarjaimpedanssin vaikutusta maasulkuilmiöihin on syytä pienentää järjestelmissä, jotka sisältävät pitkiä kaapelilähtöjä. Kuvassa 3.1 on esitetty kaapeliverkon nollapiirin yksinkertaistettu sijaiskytkentä. X_{OM} on päämuuntajan nollareaktanssi, R_N on lisäkuormitusvastuksen resistanssi, X_N on keskitetyn ja X_L hajautetun kompensointikuristimen reaktanssi. Kaapelin maasuskeptanssi on B_0 . Kaapelin nollaresistanssi ja $-$ reaktanssi ovat R_0 ja X_0 vastaavasti.



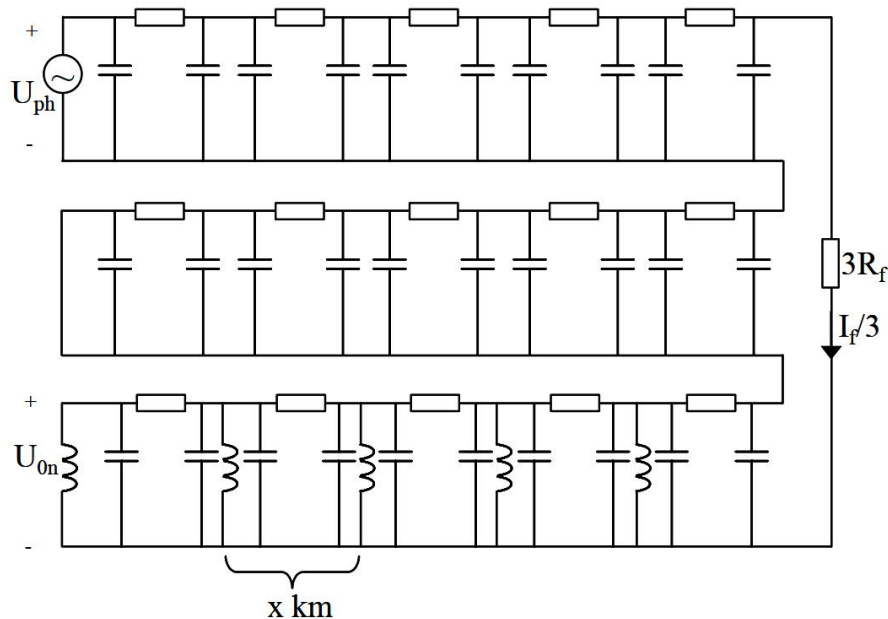
Kuva 3.1 Nollaverkon yksinkertaistettu sijaiskytkentä kaapeliverkossa [2].

Kaapelin sarjanollaimpedanssin vaikutus ekvivalentti-impedanssissa pienenee, mikäli rinnakkaisimpedanssia ($1/jB_0$) kasvatetaan. Maakapasitansseista muodostuvaa rinnakkaisimpedanssia voidaan kasvattaa käyttämällä paikallisesti asennettuja Petersenin keloja, jotka kompensoivat kapasitiivista maasulkuvirtaa mahdollisimman lähellä sen tuotantoa. Menetelmää kutsutaan hajautetuksi kompensoinniksi. Kompensointiyksikkö voi muodostua esimerkiksi YNyn0+d kytkentäisestä jakelumuuntajan ja Petersenin kelan yhdistelmästä tai YN kytketystä rinnakkaiskuristimesta, joka soveltuu myös loistehon kompensointiin.

Hajautetut kompensointiyksiköt asennetaan lähdon varrelle siten, että kaapeleiden sarjaimpedanssin vaikutus on mahdollisimman pieni. Tämä toteutuu silloin, kun rinnakkaisimpedanssi (X_s) on mahdollisimman suuri. Rinnakkaisimpedanssin maksimiarvo saavutetaan silloin, kun kaikki hajautetut kompensointiyksiköt on mitoitettu kompensoimaan jokaisen kaapeliosuuden ekvivalenttikapasitanssi. Periaatteessa tämä toteutuu sitä tarkemmin, mitä tasaisemmin kaapeli on kompensoitu eli mitä taajemmassa kompensointiyksiköt sijaitsevat. Ideaalisessa tilanteessa alla olevan lausekkeen nimittäjä menisi nolllaksi.

$$jX_s = \frac{j3\omega L_L * \frac{1}{j\omega C_0}}{j3\omega L_L + \frac{1}{j\omega C_0}} \Rightarrow 3L_L = \frac{1}{\omega^2 C_0} \Rightarrow X_s \rightarrow \infty$$

Kuvassa 3.2 on esitetty komponenttiverkkojen kytkeytyminen pitkiä kaapelilähtöjä sisältävän verkon maasulussa. Kaapelit on mallinnettu π sijaiskytkennän avulla, jolloin kapasitanssit ovat keskittyneitä. Mikäli nollaverkossa näkyvät Petersenin kelat olisi viritetty ideaalisesti resonanssiin kapasitanssien kanssa, ekvivalenttinen rinnakkaisimpedanssi olisi ääretön.



Kuva 3.2 Maasulku lähdön lopussa hajautetusti kompensoidussa verkossa, joka muodostuu yhdestä pitkästä lähdöstä. Hajautettujen kompensointiyksiköiden välinen etäisyys on x km [5].

Todellisuudessa kaapelin kapasitanssi jakautuu tasaisesti koko johtopituudelle ja siksi myös ekvivalenttinen rinnakkaisimpedanssi on äärellinen. Lisäksi kompensointiyksikön ja sen kompensoiman kaapeliosuuden reaktiivisia virtoja on vaikea saada eksaktisti samoiksi, koska hajautetun kelan induktanssia ei voida säätää portaattomasti. Periaatteessa ekvivalenttinen rinnakkaisreaktanssi pienenee hieman, kun kompensointiyksiköiden välinen etäisyys kasvaa. Teoriassa myös sarjanollaimpedanssin vaikutus, lähdön ekvivalentti-impedanssin resistanssi ja siten maasulkuvirran resistiivinen komponentti kasvavat, kun kompensointiyksiköiden välinen etäisyys kasvaa. Hankkeessa selvitettiin laskennallisesti kompensoinnin tasaisuuden vaikutusta kaapelin maasulussa tuottamaan vikavirtaan ja sen resistiiviseen komponenttiin.

Maasulkutilanteessa vikavirran resistiiviseen komponenttiin vaikuttavat myös kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt. Kompensointiyksikön edustaman impedanssin resistanssi vaikuttaa ekvivalenttiseen nollaimpedanssiin ja sen resistanssiin sekä sitä kautta maasulkuvirtaan. Tyypillisesti kompensointiyksikön tuottama resistiivinen virta on verrannollinen sen kokoon ja sen maasulussa tuottamaan induktiiviseen virtaan. Yksikön tuottamien virtakomponenttien suhde määräytyy kilpiarvona ilmoitettavasta R/X suhteesta.

3.2 Hajautetun kompensoinnin vaikutus vikavirran suuruuteen

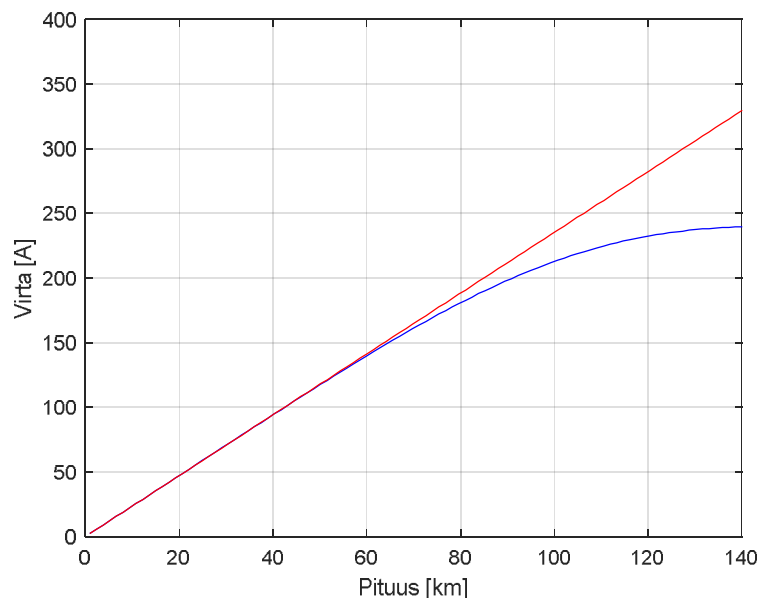
Seuraavien esimerkkilaskelmien tarkoituksena on havainnollistaa kompensoinnin tasaisuuden vaikutusta resistiiviseen maasulkuvirtaan. Jos hajautetut kompensointiyksiköt on mitoitettu resonanssiin kompensoimansa kaapeliosuuden kanssa, voidaan ajatella, että niiden lukumäärä ja/tai koko on verrannollinen kaapelin pituuteen. Siten myös kompensointiyksiköiden resistiivisten häviöiden voidaan ajatella olevan verrannollisia kaapelipituuteen nähden.

Todellisten lähtöjen kaapelipituudet ovat tyypillisesti alle 50 kilometriä, mutta lähtöjä on vastaavasti useampia. Seuraavassa on esitetty myös suuremmilla kaapelipituuksilla, kuinka

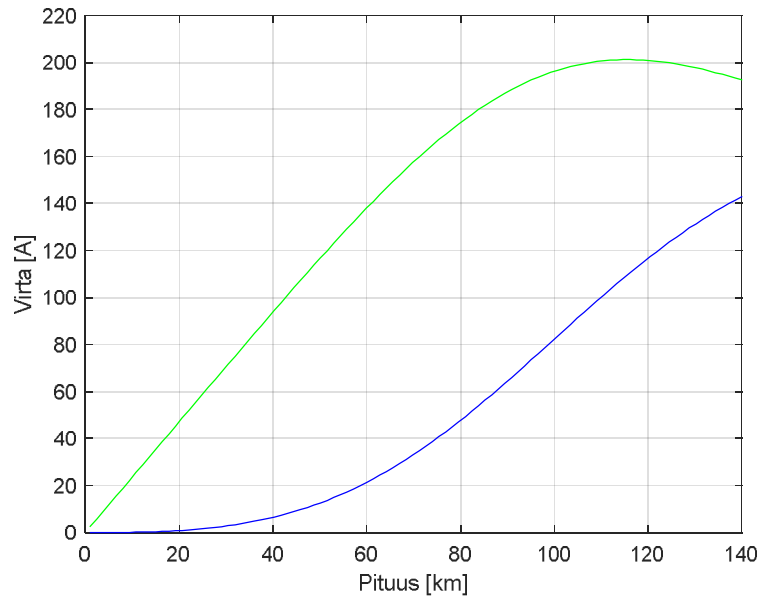
maakaapelin tuottama maasulkuvirta kehittyy teoreettisesti johtopituuden funktiona, kun kaapeli on hajautetusti kompensoitu ja kompensointiyksiköiden välinen etäisyys vaihtelee. Jos kompensointiyksiköiden välinen etäisyys on x km, jokaisen x :n pituisen kaapeliosuuden loppuun on sijoitettu kompensointiyksikkö. Jotta erilaisia kompensointiyksiköiden etäisyyksiä voitaisiin verrata keskenään, kompensointikelat on mitoitettu ideaalisesti resonanssiin kompensoimansa kaapeliosuuden kanssa. Tällöin tuloksissa ei näy kompensoinnin epäviisyyden vaikutusta. Mitoitus perustuu maakaapelin taulukkoarvona ilmoitettavaan maakapasitanssiin. Esimerkkitarkastelussa käytettiin AHXAMK-WP 3x95 maakaapelia, jonka nolaimpedanssi kilometriä kohti määritettiin olettaen, että kaapeli on maadoitettu molemmista päistä 5Ω maadoitusresistanssin kautta. Käytännössä maadoitusolosuhteet voivat vaihdella paljonkin. Laskentajännitteenä käytettiin 20,6 kV.

Maasulkuvirran suuruuteen em. tilanteessa vaikuttavat myös kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt. Tarkastelussa kompensointiyksikön maasulussa tuottaman resistiivisen virran oletettiin olevan 0 %, 1 % tai 2,5 % kelan induktiivisesta virrasta. Todellisella lähdöllä on yleensä myös haaroja. Haaroja sisältävän lähdön resistiivinen maasulkuvirta on tyypillisesti hieman pienempi kuin vastaavan pituisen runkojohdon. Haarojen vaikutusta ei tarkasteltu tässä yhteydessä erikseen, vaan kaapeli oletettiin pelkäksi runkojohdoksi.

Vertailun lähtökohtana on esitetty tilanne, jossa hajautettua kompensointia ei ole lainkaan. Kuvassa 3.3 on esitetty kaapelin maasulussa tuottaman vikavirran itseisarvo ilman kompensointia. Sininen kuvaaja esittää maasulkuvirran itseisarvoa ilman kompensointia. Punainen kuvaaja esittää vastaavaa maasulkuvirtaa, kun kaapeli kuvataan pelkkänä kapasitanssina. Kun maasulkuvirrasta erotetaan resistiivinen ja reaktiivinen virtakomponentti, saadaan kuvan 3.4 mukaiset kuvaajat johtopituuden funktiona.



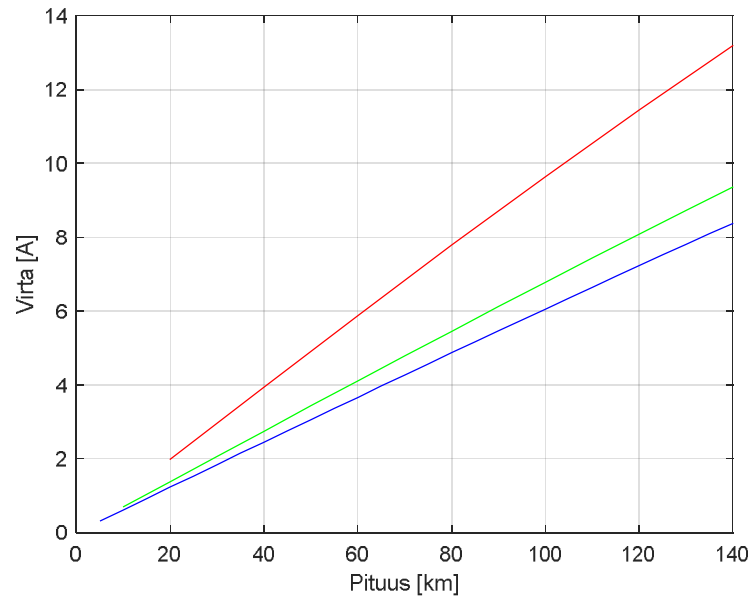
Kuva 3.3 Kaapelin maasulussa tuottama vikavirta ilman kompensointia.



Kuva 3.4 Kaapelin maasulussa tuottama resistiivinen (sin.) ja reaktiivinen (vihr.) vikavirta ilman kompensointia.

Seuraavassa on tarkasteltu hajautetusti kompensoitua pitkää kaapelia. Tarkoituksena oli havainnollistaa, miten kompensointiyksiköiden välinen etäisyys vaikuttaa kaapelin maasulussa tuottamaan vikavirtaan. Etäisyys kompensointiyksiköiden välillä oli 5 km, 10 km ja 20 km. Oletuksena oli kaapelin 100 % kompensointi suhteessa taulukkoarvona ilmoitettuun maakapasitanssiin. Pitkillä kaapelipituuksilla ja harvalla kompensoinnilla kaapelissa kulkee hieman myös reaktiivista virtaa, vaikka kompensointi on viritetty resonanssiin kaapelin maakapasitanssien perusteella. Tällöin kaapelin ekvivalenttinen impedanssi poikkeaa hieman maakapasitanssien edustamasta impedanssista.

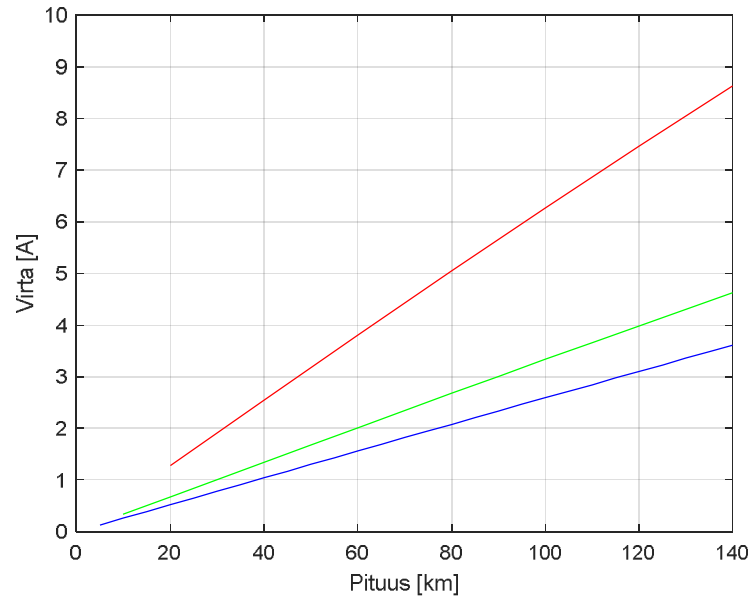
Vaikka käytetty kaapelin maksimipituus kuvaajissa ei ole kovin relevantti käytännön johtopituuksien näkökulmasta, kuvaajista nähdään, miten kaapelin tuottama maasulkuvirta teoriassa riippuu kompensoinnin tasaisuudesta. Kohdassa 3.2.1 on tarkasteltu kompensointiyksiköiden välisiä etäisyyksiä 1 – 10 km, vastaten paremmin nykyisiä käytäntöjä sekä mahdollista uutta kompensointimenetelmää. Kapasitanssiarvojen jakautuneisuudesta ja nolaimpedanssin vaikutuksesta kaapelissa kulkee maasulun aikana summavirtaa sitä enemmän, mitä pidempi kompensointiyksiköiden välinen etäisyys on ja mitä suurempia kompensointiyksiköt siten ovat. Kuvassa 3.5 on esitetty hajautetusti kompensoidun kaapelin tuottama maasulkuvirta johtopituuden funktiona, kun kompensointiyksiköiden välinen etäisyys on 5 km, 10 km ja 20 km. Kuvassa 3.5 on oletettu, että kompensointiyksikön maasulussa tuottama resistiivinen virta on 2,5 % sen tuottamasta induktiivisesta virrasta.



Kuva 3.5. Hajautetusti kompensoidun kaapelin maasulkuvirta, kun kompensointiyksiköiden väliset etäisyydet ovat 5 km (sin.), 10 km (vihr.) ja 20 km (pun.) sekä kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt 2,5 %.

Kun kompensointiyksiköiden välinen etäisyys on 5 – 10 km tai sitä lyhyempi, täysin kompensoidun kaapelin virta muodostuu pääasiassa kompensointiyksiköiden häviöistä ollen luonteeltaan resistiivistä virtaa. Kompensointiyksiköiden välisen etäisyyden pienentäminen alle 5 km:iin ei enää merkittävästi vähennä kaapelin maasulussa tuottamaa vikavirtaa. Merkittävää eroa kokonaisvikavirran ja resistiivisen vikavirran välillä ilmenee vasta hyvin pitkällä kompensointiyksiköiden välisellä etäisyydellä. Mikäli kompensointiyksiköiden välinen etäisyys on esimerkiksi 20 km, kaapelin resistiivinen virta kasvaa. Mikäli kompensointiyksiköiden välinen etäisyys on hyvin lyhyt, nollavirta on hyvin pieni samoin kuin jännitehäviö nollaimpedanssin yli.

Seuraavassa on havainnollistettu kompensointiyksiköiden resistiivisten häviöiden vaikutusta. Kuvassa 3.6 on esitetty kaapelin tuottama maasulkuvirta, kun kompensointiyksiköiden resistiivinen häviövirta on 1 % induktiivisesta virrasta. Kun kuvaa 3.6 verrataan kuvaan 3.5, nähdään, että varsinkin lyhyemmällä kompensointiyksiköiden etäisyyksillä 5 km ja 10 km kokonaisvikavirta pienenee, koska se lähes kokonaan peräisin kompensointiyksiköiden resistiivisistä häviöistä. Jos kompensointiyksiköt oletetaan häviöttömiksi, resistiivinen vikavirta 5 – 10 km etäisyyksillä menee hyvin pieneksi.

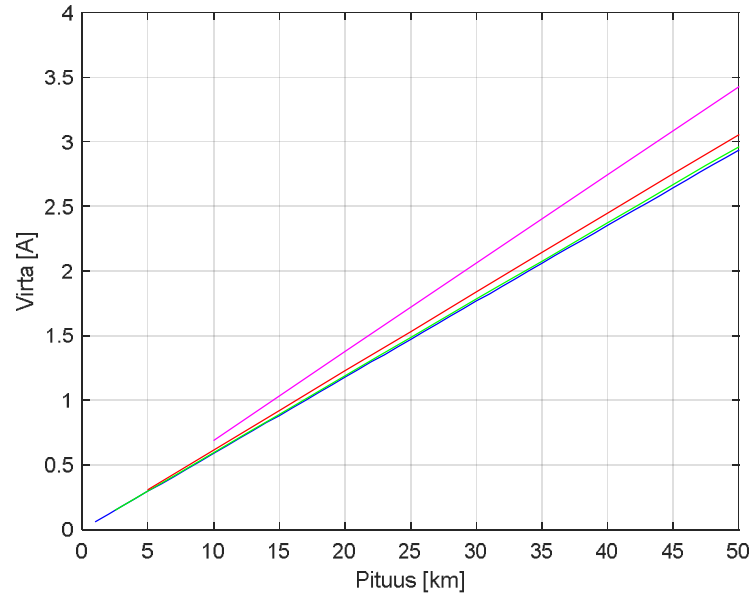


Kuva 3.6. Hajautetusti kompensoidun kaapelin maasulkuvirta, kun kompensointiyksiköiden väliset etäisyydet ovat 5 km (sin.), 10 km (vihr.) ja 20 km (pun.) sekä kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt 1 %.

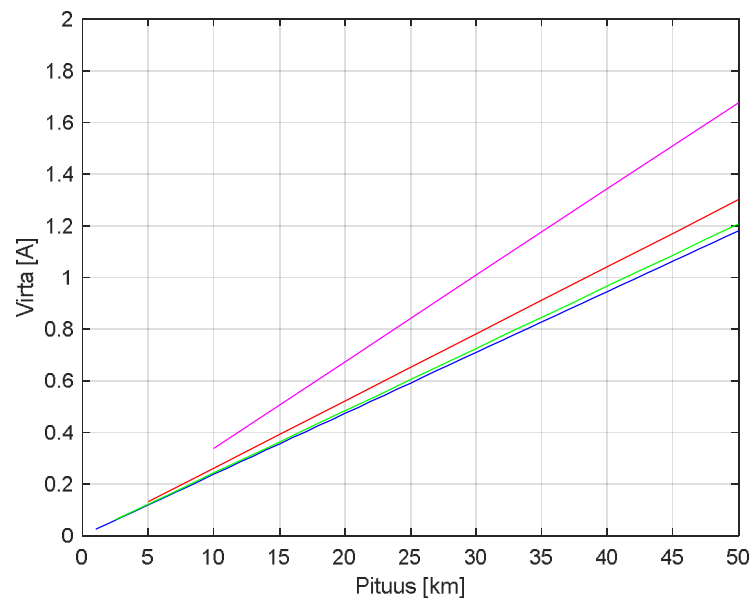
Maasulkuvirran ja sen resistiivisen komponentin muodostumiseen vaikuttavat myös kaapelipoikkipinta, kaapelityyppi, kaapelin nolaimpedanssi sekä kompensointiyksiköiden häviöt. Myös kaapelilähdön topologia vaikuttaa resistiivisen komponentin muodostumiseen. Normaaleilla lähtöpituuksilla kompensointiyksiköiden välisen etäisyyden pienentäminen nykykäytännöstä (5 - 10 km) ei tuo merkittävää etua maasulkuvirran resistiivisen komponentin syntymisen kannalta tässä esimerkkitapauksessa. Reaktiivinen vikavirta tulee varsin hyvin kompensoitua suhteellisen harvallakin kompensoinnilla, mikäli se on mitoitettu tarkasti.

3.2.1 Uudentyyppisen kompensointitavan vaikutus maasulkuvirtaan

Jos käytetään 15 A hajautetun kompensoinnin yksiköitä, niiden väliseksi etäisyydeksi tulee tyypillisesti 5 - 10 km riippuen kaapelipoikkipinnasta ja kaapelityypistä. Myös haarojen sijainti ja verkon luonnolliset jakorajat vaikuttavat jonkin verran yksiköiden sijaintiin. Kompensointiyksiköt sijoitetaan tyypillisesti runkojohdoille ja haarojen vaikutus otetaan huomioon sijoittelussa. Mikäli kompensointiyksikön virta olisi esimerkiksi 3 A, yksiköitä tulisi noin 0,9 - 1,7 km välein riippuen kaapelipoikkipinnasta, jos pyrittäisiin lähes 100 % kompensointiasteeseen. Jos yksikön kompensoima virta olisi 1,5 A, yksiköitä tulisi noin 0,5 - 0,8 km välein riippuen kaapelipoikkipinnasta. Seuraavassa on tarkasteltu, miten nykyistä tasaisempi hajautettu kompensointi vaikuttaa kaapelin maasulkuvirtaan, jos lähtökohtana on 100 % kompensointi. Esimerkissä tarkasteltiin enintään 50 km pitkää kaapelia (AHXAMK-WP 3x95). Tarkastellut kompensointiyksiköiden väliset etäisyydet olivat 1 km, 2,5 km, 5 km ja 10 km. Kuvassa 3.7 on esitetty enintään 50 km pitkän hajautetusti kompensoidun kaapelin tuottama kokonismaasulkuvirta, kun kompensointiyksiköiden välinen etäisyys vaihtelee. Reaktiivinen jäännösvirta on käytännössä merkityksettömän pieni kaapelin pituudesta ja 100 % kompensoinnista johtuen. Maasulkuvirran resistiivinen komponentti tulee tässä tapauksessa pääosin kompensointiyksiköiden häviöistä.

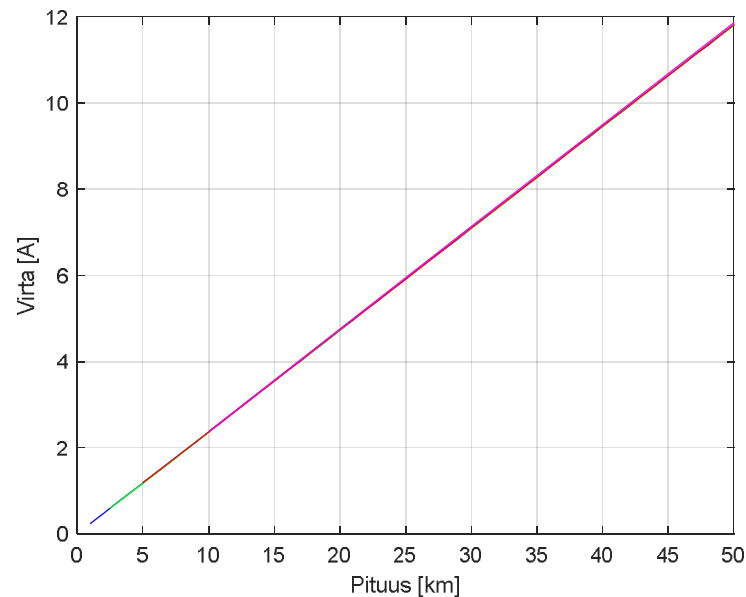


Kuva 3.7. Hajautetusti kompensoidun kaapelin maasulkuvirta, kun kompensointiyksiköiden väliset etäisyydet ovat 1 km (sin.), 2,5 km (vihr.), 5 km (pun.) ja 10 km (viol.) sekä kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt 2,5 %.



Kuva 3.8. Hajautetusti kompensoidun kaapelin maasulkuvirta, kun kompensointiyksiköiden väliset etäisyydet ovat 1 km (sin.), 2,5 km (vihr.), 5 km (pun.) ja 10 km (viol.) sekä kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt 1 %.

Vertailun vuoksi laskettiin myös tilanne, jossa hajautettu kompensointi kompensoi 90 % kaapelin kapasitiivisesta maasulkuvirrasta ja kompensointiyksiköiden etäisyydet ovat samat kuin edellä. Tällöin reaktiivisen vikavirran osuus on hallitseva, eikä kompensointiyksiköiden välisen etäisyyden vaikutusta ole enää nähtävissä kaapelin kokonaisvikavirrassa.



Kuva 3.9. Hajautetusti kompensoidun kaapelin maasulkuvirta, kun kompensointiaste on 90 % ja kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt 1 %.

Kuvista 3.7 ja 3.8 voidaan nähdä, että hajautetusti täysin kompensoidun kaapelin tuottama maasulkuvirta ei riipu merkittävästi kompensointiyksiköiden välisestä etäisyydestä alle 5 km etäisyyksillä. Resisttiivisen maasulkuvirran tuotannossa tapahtuu pientä kasvua vasta, kun yksiköiden välinen etäisyys on yli 10 km. Nykyisen käytännön mukaan kompensointiyksiköt sijaitsevat tyypillisesti 5 – 10 km välein. Sitä tasaisemmalla kompensoinnilla resistiivistä maasulkuvirtaa ei saada merkittävästi pienennettyä, jos kompensointiaste on molemmissa käytännöissä sama. Kompensoidun kaapelin tuottaman maasulkuvirran kannalta keskeisimpiä tekijöitä ovat kompensointiaste, kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt, kaapelityyppi ja kaapelipoikkipinta [2].

3.3 Hajautetun kompensoinnin toteutuksen vaikutukset vikavirran suuruuteen, verkon suojaukseen ja käyttöön

Haja-asutusalueilla toimivissa sähköverkkoyhtiöissä maasulkuvirran kompensointikäytännöksi on vakiintunut keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin yhdistelmä. Keskeisimpiä syitä tähän käytäntöön ovat mm:

- Kompensointikapasiteetin jakaminen lähdoille, mikä parantaa käyttövarmuutta
- Kompensointitarpeen ennakointi on helpompaa, kun kompensointi etenee samassa tahdissa kaapeloinnin kanssa.
- Hajautetun maasulkuvirran kompensointia puoltaa myös hajautettu loistehon kompensointi, mikä voidaan toteuttaa samalla yksiköllä.
- Tarve saada verkko viritettyä pelkkää hajautettua kompensointia tarkemmin mm. kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi
- Lähdoilla maasulun aikana kulkevien varausvirtojen ja siten maasulkuvirran resistiivisen komponentin pienentäminen
- Suojauksen toteuttaminen ja pelkälle hajautetulle kompensoinnille tyypillisten sympatialaukaisujen välttäminen tarkemman keskitetyn kompensoinnin avulla

3.3.1 Maasulkuvirran suuruus

Vikavirran resistiivinen komponentti lisää jonkin verran vikakohdan jäännösvirtaa, koska sitä ei voida kompensoida passiivisilla komponenteilla. Sen kompensointi edellyttäisi aktiivista jäännösvirran kompensointia, joka on tyypillisesti toteutettu verkon tähtipisteeseen kytketyn invertterin avulla. Kyseisten laitteistojen avulla maasulun jäännösvirta voidaan kompensoida käytännössä kokonaan, jolloin myös kaapelimaasulun katkeilu saadaan loppumaan.

Kompensointiyksiköiden välisen etäisyyden pienentäminen nykykäytännöstä ei vähennä merkittävästi kaapelin tuottaman maasulkuvirran resistiivistä komponenttia, jos uuden kompensointiyksikön maasulun aikana tuottaman resistiivisen ja induktiivisen virran suhde ja kaapelin kokonaiskompensointiaste ovat molemmilla kompensointitavoilla samat.

Resistiivinen maasulkuvirta pienenee tai kasvaa riippuen uusien ja nykyisten yksiköiden R/X suhteesta. Toinen resistiivisen maasulkuvirran kannalta keskeinen asia on kaapelin kokonaiskompensointiaste. Lähdön kokonaiskompensointiasteen kasvattaminen pienentäisi kaapeleissa maasulun aikana kulkevia varausvirtoja ja sitä kautta vikavirran resistiivistä komponenttia. Myös nykyisillä hajautetun kompensoinnin käytännöillä voidaan päästä varsin korkeaan lähdön kompensointiasteeseen.

3.3.2 Vaikutukset verkon suojaukseen

Uudenlaisen kompensointimenetelmän kannalta keskeinen kysymys on, sovelletaanko sitä yksinään vai yhdistettynä keskitettyyn kompensointiin. Mikäli menetelmää sovellettaisiin yhdistettynä keskitettyyn kompensointiin vastaavasti, kuin useimmat verkkoyhtiöt tälläkin hetkellä tekevät, suurta muutosta suojauksen kannalta ei ole nähtävissä. Tämä edellyttää, että kompensointiyksiköiden ominaisuudet eivät merkittävästi muutu nykyisiin suurempiin yksiköihin verrattuna muuta kuin kompensoitavan virran suuruuden osalta. Mikäli hajautetun kompensoinnin osuus kokonaiskompensoinnista kasvaisi, koko verkon kompensointiaste muuttuisi nykyistä vähemmän esimerkiksi kytkentämuutosten tai vikalaukaisujen yhteydessä. Vaikka keskitetyn kompensoinnin säätö virittää kompensoinnin suhteellisen nopeasti vastaamaan uutta kytkentätilaa, verkko ehtii olla jonkin aikaa (esim. luokkaa minuutin) epävirteenä. Tällä asialla saattaa olla merkitystä nopeiden peräkkäisten vikojen yhteydessä. Tällaiset vikatilanteet eivät tosin ole kovin tyypillisiä kaapeliverkoille. Maasulkulaukaisun jälkeisessä tilanteessa nollajännitteen ja summavirtojen jälkivärähtelyn taajuus riippuu verkon kompensointiasteesta. Nykyistä tarkemmin viritetty hajautettu kompensointi pitäisi verkon kokonaiskompensointiasteen maasulkulaukaisun jälkeen korkeampana. Siten myös nollajännitteen jälkivärähtelyn taajuus olisi hieman lähempänä 50 Hz:ä.

Toinen suojaukseen vaikuttava seikka on uudenlaisen kompensointiyksikön R/X suhde eli paljonko yksikkö tuottaa resistiivistä vikavirtaa maasulkutilanteessa. Keskitetyn kompensoinnin yhteydessä vikavirran resistiivistä komponenttia kasvatetaan lisäkuormitusvastuksen avulla suojauksen toimintaedellytysten parantamiseksi. Tällöin hajautetun kompensoinnin resistiivisillä häviöillä ei ole suoraan merkitystä suojauksen toimintaedellytysten kannalta. Mikäli hajautetun kompensoinnin maasulussa tuottama resistiivinen virta voitaisiin todentaa ja verifioida, sillä voisi olla vaikutusta lisäkuormitusvastuksen mitoitukseen.

Mikäli uudentyypistä kompensointitapaa sovellettaisiin sellaisenaan ilman säädettävää keskitettyä kompensointia, vaikutukset suojaukseen olisivat suuremmat. Hajautettua kompensointia on käytetty keskijänniteverkoissa hyvin pitkällä avojohtolähdöillä, lähinnä Pohjois-Suomessa jo 1980 luvulta alkaen [6]. Kun maakaapelointi alkoi laajassa mittakaavassa vuonna 2013 voimaan tulleen Sähkömarkkinalain myötä myös haja-asutusalueilla sijaitsevilla verkoissa, pelkkää hajautettua kompensointia kokeiltiin joissakin verkkoyhtiöissä. Sen jälkeen verkkoyhtiöissä on pääsääntöisesti siirrytty yhdistetyn keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin käyttöön. Tämä johtunee paljolti pelkän hajautetun kompensoinnin yhteydessä esiintyneistä suojausongelmista, lähinnä sympatialaukaisuista. Käytettäessä pelkästään hajautettua kompensointia, verkon kokonaiskompensointiaste jää usein suhteellisen paljon alikompensoinnin puolelle, jolloin maasulun poistumista seuraavien jälkivärähtelyiden taajuus on alle 50 Hz. Jos maasulkuvirran resistiivistä komponenttia ei voida kontrolloida eikä verifioida, perinteinen suunnattu maasulkusuojaus pitää perustua reaktiiviseen vikavirtaan. Edellä mainitut seikat saattavat johtaa terveiden lähtöjen sympatialaukaisuihin maasulun jälkivärähtelyiden seurauksena, koska suunnattu suojaus näkee ylikompensoituvan lähdön viallisena.

Mikäli verkko kompensoitaisiin tarkasti pelkästään hajautetun kompensoinnin avulla, verkon kompensointiaste pysyisi suhteellisen vakaana kytkentämuutoksista ja vikalaukaisuista riippumatta. Kompensointi siirtyisi kytkentätoimenpiteiden seurauksena verkon mukana. Mikäli keskitettyä kompensointia ei ole, vikavirran resistiivisen komponentin suuruutta ei voida kontrolloida tai varmistaa lisäkuormitusvastuksen avulla. Mikäli suunnattu maasulkusuojaus perustuisi tässä tilanteessa vikavirran resistiiviseen komponenttiin, sen riittävyys pitäisi pystyä varmistamaan ja verifioimaan kaikissa vika- ja kytkentätilanteissa. Tällöin keskeisiä tekijöitä ovat maasulkuvikaan nähden taustaverkossa sijaitsevien hajautettujen kompensointiyksiköiden lukumäärä ja niiden maasulussa tuottama resistiivinen vikavirta.

Toinen vaihtoehto olisi käyttää keskitettyä lisäkuormitusvastusta nykyiseen tapaan. Nykyisellä tavalla toteutettuna itse vastuksen lisäksi tarvittaisiin pääsääntöisesti myös maadoitusmuuntaja sekä lisäkuormitusvastuksen ohjausautomaattikka. Tällöin menetettäisiin osa keskitetyn kompensoinnin puuttumisesta saatavasta kustannushyödyistä. Sähköverkkoyhtiöissä nykyinen kompensointikäytäntö nähdään kuitenkin hyvänä eikä keskitetystä kompensoinnista haluta yleensä luopua.

3.3.3 Nollajännitteen ja summavirtojen jälkivärähtelyilmiöt

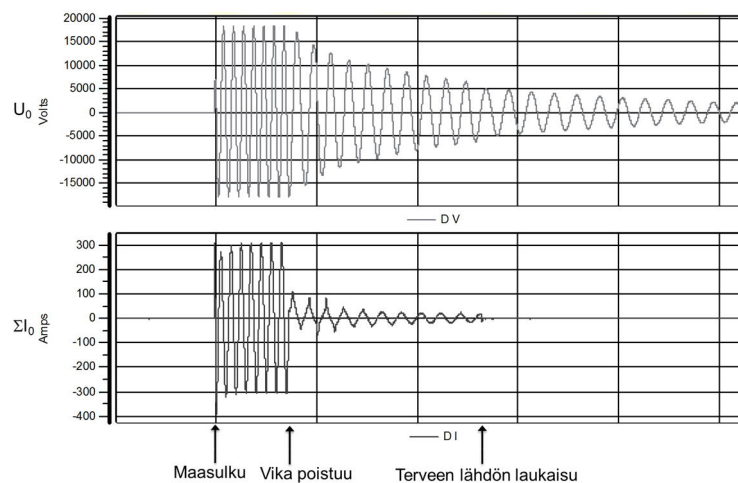
Sammutetussa verkossa verkon nollajännite ja lähtöjen summavirrat jäävät värähtelemään vaimenevasti maasulkuvian poistuttua, kun maakapasitanssien varaus purkautuu. Maasulkutilanteessa myös terveellä lähdöllä saattaa esiintyä vikavirtoja, joiden taajuus poikkeaa perustaajuudesta. Ilmiö johtuu siitä, että verkon kompensointi on maasulkuvian poistuessa epäviereinen. Ongelma on merkittävästi vähentynyt, kun verkkoyhtiöt ovat alkaneet käyttää säädetyä keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin yhdistelmää sekä perinteistä sammutetun verkon suojauksen toimintakarakteristikaa. Jos keskijännitelähtö laukeaa maasulun seurauksena, verkko jää hieman epäviereeseen ennen kuin keskitetyn kompensoinnin säätäjä ehtii virittää kompensoinnin uudestaan. Hajautettu kompensointi pienentää huomattavasti tätä epäviereisyyttä. Tältä osin lähtöjen korkea kompensointiaste

parantaa tilannetta. Nämä perustaaajuudesta poikkeavat maasulkuilmiöt voivat aiheuttaa virheellisiä laukaisuja, mikäli niitä ei ole otettu huomioon suojauksen suunnittelussa.

Maasulkuvika voi poistua sammutetussa verkossa lähinnä kahdella eri tavalla. Vika voi sammua itsestään tai lähdön maasulkusuojaus laukaisee viallisen lähdön verkosta. Kun maasulkuvirta katkeaa virran nollakohdassa, vikakohtan jännite palautuu. Tästä seuraa vikaväliin jännitetransientti, jolla on merkitystä valokaaren sammumisen kannalta.

Sammutuksen ansiosta maasulkuvalokaari voi sammua itsestään, koska vikakohtaan palaavan jännitteen nousunopeus ja jäännösvikavirta ovat pieniä maasta erotettuun verkkoon verrattuna. Tämä pätee kuitenkin pääasiassa ilmajohto-osuuksilla tapahtuviin vikoihin. Viitteen [7] mukaan 20 kV sammutetussa verkossa valokaaren itsestään sammumisen virtaraja on 60 A. Maakaapeliverkossa maasulku syntyy usein vaihejohtimesta kaapelin maadoitettuun osaan. Tällöin tilanne johtaa helposti katkeilevaan vikaan, koska valokaari palaa lyhyessä elektrodivälissä ja vian uudelleensyntyminen on todennäköistä vikakohtaan palaavan jännitteen vaikutuksesta.

Seuraavassa kuvassa 3.11 on esitetty esimerkki mitatuista nolajännitteestä ja lähdön summavirrasta maasulun aikana ja vian poistuttua. Maasulun poistuttua nolajännite ja terveen lähdön summavirta jäävät värähtelemään kuvan 3.11 mukaisesti. Verko on alikompensoitu, minkä vuoksi nolajännitteen taajuus vian poistuttua on alle 50 Hz vastaten verkon resonanssitaajuutta. Nolajännitteen ja lähdön summavirran jälkivärähtely johtaa terveen lähdön laukeamiseen, vaikka vika on poistunut jo aiemmin.



Kuva 3.11 Sammutetun verkon nolajännitteen ja lähdön summavirran jälkivärähtely, joka johtaa sympatialaukaisuun [2].

Nolajännitteen ja lähtöjen summavirtojen värähtelyyn vaikuttavat lähinnä verkon kokonaiskompensointiaste ja verkon vaimennus vian poistuttua. Kompensoinnin toteutustavalla voidaan katsoa olevan vain vähäinen vaikutus.

Jos uudentyyppistä kompensointimenetelmää sovellettaisiin ilman keskitettyä kompensointia, verkon kompensoinnin vinoviritys riippuisi siitä, kuinka tarkasti lähdöt saadaan kompensoitua. Jos lähtöjen kompensointiasteet olisivat korkeita, verkon kokonaiskompensointiaste ei heilahtaisi kovin paljoa esimerkiksi lähdön maasulkulaukaisun seurauksena. Tosin tällöin verkon suojauksen toteuttaminen ilman keskitettyä lisäkuormitusvastusta voisi olla hankalaa.

Verkon kokonaiskompensointiasteen vinoviritys olisi normaalitilassa todennäköisesti hieman suurempi keskitetysti säädettyyn kompensointiin verrattuna. Tällöin reaktiivinen vikavirta vian synnyttyä olisi hieman suurempi.

Jos kyseistä kompensointimenetelmää käytettäisiin yhdessä säädetyn keskitetyn kompensoinnin kanssa, reaktiivinen jäännösvikavirta maasulun aikana olisi käytännössä sama kuin nykyiselläkin käytännöllä. Jos lähtöjen kompensointiaste kasvaisi nykyiseen hajautettuun kompensointiin verrattuna, verkon virityksasteen heiluminen vikalaukaisujen yhteydessä olisi vähäisempää ja siten jälkivärähtelyt olisivat taajuudeltaan hieman lähempänä perustaajuutta.

Toinen maasulun jälkivärähtelyihin vaikuttava seikka on verkon kokonaisvaimennusaste. Verkon vaimennusasteeseen vaikuttavat lähinnä:

- Kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt
- Hajautetun kompensoinnin yksiköiden sijoitteluväli
- Maakaapeleiden nollaimpedanssit
- Keskitetyn kompensoinnin lisäkuormitusvastuksen mitoitus ja käyttötapa

Uudella kompensointikäytännöllä olisi vaikutusta lähinnä kahteen ensimmäiseen tekijään. Mikäli uusien yksiköiden R/X suhde olisi suurempi nykyisiin hajautetun kompensoinnin yksiköihin verrattuna, verkon vaimennus kasvaisi ja siten jälkivärähtelyt vaimenisivat nopeammin. R/X suhteen ollessa pienempi kävisi päinvastoin. Luvussa 2 tarkasteltiin kompensoinnin tasaisuuden vaikutusta maasulkuvirtaan. Teoriassa tasaisempi kompensointi pienentäisi hieman vikavirran resistiivistä komponenttia ja siten verkon vaimennusta, jolloin jälkivärähtelyiden kesto pitenisi. Käytännössä ero hajautetun kompensoinnin nykykäytäntöihin verrattuna olisi kuitenkin pieni. Käytännössä merkittävin seikka lienee kuitenkin kompensointiyksiköiden resistiiviset häviöt. Ajatellaan, että π sijaiskytkentänä mallinnettujen kaapeleiden ekvivalenttinen nollaimpedanssi on sarjaimpedanssi $Z = R + jX$. Tämä sarjaimpedanssi voidaan esittää myös ekvivalenttisenä rinnakkaisimpedanssina $Z_p = R_p + jX_p$, jonka yli vaikuttaa maasulkutilanteessa nollajännite. Kompensointiyksiköillä on vaikutusta myös tämän rinnakkaisimpedanssin resistanssiin ja sitä kautta verkon vaimennukseen.

$$R_p = \frac{R^2 + X^2}{R} \quad ja \quad X_p = \frac{R^2 + X^2}{X} \quad (1)$$

3.3.4 Vaikutukset verkon käyttöön

Mikäli maasulkuvirran hajautettu kompensointi toteutettaisiin vielä nykyistä tasaisemmin, se siirtyisi paremmin verkon mukana kytkentämuutostilanteissa. Jakorajamuutosten yhteydessä ei tarvitsisi huomioida kompensoinnin mahdollista siirtymistä viereisen sähköaseman puolelle. Tällaiset muutokset pyritään ottamaan kompensointiyksiköiden sijoittelussa huomioon.

Keskitetyn kompensoinnin primäärikomponenttien kuten Petersenin kelan tai maadoitusmuuntajan vikaantuminen on suhteellisen epätodennäköistä. Käytännössä tällaisessa vikatilanteessa hyödynnetään sähköasemien varasyöttöyhteyksiä ja viereisillä sähköasemilla mahdollisesti olevaa kompensoinnin ylikapasiteettia. Hajautetun kompensoinnin nykyistä suurempi osuus kompensointikapasiteetista pienentäisi keskitetyn kompensoinnin korvaustarvetta vikatilanteessa.

Mikäli kompensointiyksiköitä tulisi verkkoon paljon lisää, todennäköisyys laitteen vikaantumiselle kasvaa. Vaikka yhden pienen yksikön vikaantuminen ei ole kriittistä verkon kompensoinnin kannalta, vikaantuneen laitteen paikantaminen voi aiheuttaa lisää työtä varsinkin, jos laite on sijoitettu maan alle. Tältä kannalta on olennaista mahdollinen vikaantumismekanismi. Jos laitteen vikaantuminen ei aiheuta sähköverkkoon vikaa, sen laitteen löytäminen nopeasti ei ole kovin kriittistä. Mikäli maan alle sijoitetun laitteen vikaantuminen aiheuttaa vian myös sähköverkkoon, sen paikantaminen ja vaihtaminen on huomattavasti kriittisempää. Tältä kannalta yksiköiden eristystaso käyttäjäsuojien ylijännitteiden osalta on keskeinen.

Hajautetun kompensoinnin muuttaminen nykyistä tasaisemmaksi helpottaisi jossain määrin verkon käyttöä, koska kompensointi siirtyisi nykyistä paremmin verkon mukana kytkentämuutosten yhteydessä. Laitekannan kasvun seurauksena tuleva vikaantumisriski tulee kuitenkin huomioida. Kokonaisuutena uuden kompensointitavan vaikutus verkon käyttöön voidaan kuitenkin arvioida olevan suhteellisen vähäinen.

Sähköverkkoyhtiöissä on erilaisia käytäntöjä kaapeliverkon loistehon hajautettuun kompensointiin. Joissakin yhtiöissä käytetään yhdistettyjä kompensointiyksiköitä maasulkuvirran ja loistehon kompensointiin. Tällöin kompensoinnin huomiointi esimerkiksi kytkentämuutosten yhteydessä on helpompaa. Mikäli maasulkuvirran ja loistehon kompensointi on toteutettu eri yksiköillä ja ne sijaitsevat eri paikoissa, kompensoinnin siirtymisen huomiointi esimerkiksi jakorajamuutosten yhteydessä on hankalampaa. Loistehon kompensointia voi olla tarvetta myös irrottaa verkosta jossain kytkentätilanteissa, jos jännite laskee liikaa. Siksi rinnakkaiskuristimet on usein varustettu kauko-ohjattavilla erottimilla.

4 SÄHKÖVERKKOYHTIÖIDEN KOMPENSOINTI-KÄYTÄNTÖJÄ JA VAATIMUKSIA UUELLE MENETELMÄLLE

Kompensointilaitteen tekniset vaatimukset ja luotettavuus määräytyvät paljolti keskijänniteverkon käyttötavan, suojauksen ja suunnitellun käyttöiän perusteella. Lisäksi mitoituksessa tulee ottaa huomioon verkon mahdolliset poikkeukselliset käyttötilanteet. Laitteen tulee kestää virtalämpöhäviöt maasulun pisin ajateltavissa oleva vaikutusaika huomioiden. Myös peräkkäisten maasulkujen yhteisvaikutus tulee huomioida.

Tutkimuksen yleisenä tavoitteena oli kerätä sähköverkkoyhtiöistä tietoa ja kokemuksia nykyisten maasulkuvirran kompensointi- ja suojauskäytäntöjen toiminnasta ja luotettavuudesta sekä mahdollisista kehitystarpeista. Tämä tavoite tuki sekä uudentyyppisen kompensointiratkaisun arviointia että yleisemmin maakaapelointiin, maasulkuvirran ja loistehon kompensointiin sekä suojaukseen liittyviä tulevaisuuden tutkimustarpeita.

Maasulkusuojauksen osalta tavoitteena oli selvittää, mitä etuja ja mahdollisia haittoja uudentyyppinen maasulkuvirran kompensointi tarjoaisi. Yhteistyössä sähköverkkoyhtiöiden kanssa tavoitteena oli määrittellä, miten ao. laitteen eristystaso, erityisesti käyttötaajuisten ylijännitteiden osalta tulisi määrittellä ja kauanko laitteen pitäisi kestää maasulun aiheuttamaa käyttötaajuista ylijännitettä. Molempiin vaikuttavat verkon suojauksen toteutus, käytettävät laukaisuhidastukset sekä varasuojauksen toiminta-aika. Jos kompensointilaitte sijoitetaan maan alle, se on vaikeasti ja kalliisti vaihdettava laite. Siksi sen suunnittelussa ja mitoituksessa pitäisi varautua myös mahdollisiin poikkeuksellisiin käyttötilanteisiin, jolloin maasulku voi olla huomattavasti suojauksen toiminta-aikoja kauemmin päällä tai peräkkäisiä vikoja voi tulla useita ilman, että laite ehtii merkittävästi jäähtyä välillä. Tällaisten tilanteiden määrittelyssä paras asiantuntemus löytyy sähköverkkoyhtiöistä. Laitteen vikaantuminen voi johtaa myös kaksoismaasulkuun, mikä tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Laitteen tulee kestää myös esiintyvät kaksoismaasulkuvirrat.

Koska uuden kompensointilaitteen hinta-arviota ei ollut käytettävissä, kustannuksia lähestyttiin toisesta suunnasta. Perinteisen keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin kustannusten avulla maasulkuvirran kompensoinnille voidaan määrittää hinta-arvio kompensoitavaa ampeeria kohti laskettuna (€/A). Jos vastaava verkko kompensoitaisiin nykyistä selvästi pienemmillä yksiköillä, laitteelle saataisiin määritettyä jonkinlainen kannattavuusraja verkkoyhtiön näkökulmasta (€/kpl), kun yhden yksikön kompensoima virta tunnetaan. Asennuskustannuksia ei tässä tutkimuksessa arvioitu erikseen, koska siihen soveltuvaa tietoa ei ollut saatavilla.

4.1 Sähköverkkoyhtiöille suunnattu kysely

Sähköverkkoyhtiöille suunnattu kysely toteutettiin siten, että ensimmäisessä vaiheessa valituille verkkoyhtiöille lähetettiin kysymyslista tutustumista varten. Toisessa vaiheessa yhtiön kanssa pidettiin haastattelukokous, jossa käytiin läpi yhtiöiden vastaukset ennakkoon lähetettyihin kysymyksiin. Lisäksi keskusteltiin yhtiöiden maakaapelointiin, maasulkuvirran kompensointiin ja suojaukseen liittyvistä kokemuksista, haasteista ja kehittämistarpeista.

Kyselyyn pyrittiin valitsemaan eri kokoisia verkkoyhtiöitä, joissa kaapelointi on hieman eri vaiheessa. Kyselyyn osallistui viisi sähköverkkoyhtiötä, joista yksi oli kaupunkiyhtiö ja neljä muuta pääasiassa haja-asutusalueilla ja pienemmissä taajamissa toimivia yhtiöitä. Kyselyyn osallistuneet verkkoyhtiöt ovat Sähkötutkimuspoolin osapuolia. Neljän haja-asutusalueella toimivan yhtiön keskijänniteverkon verkkopituudet vaihtelivat noin 10000 km:stä yli 30000 km:iin. Keskijänniteverkon maakaapelointiasteet vaihtelivat noin 8 %:sta yli 50 %:iin. Kaupunkiyhtiön verkko on lähes kokonaan maakaapeloitu. Yhtiöt on jaettu kokonsa ja verkon kaapelointiasteen mukaan kolmeen ryhmään.

- Verkkoyhtiöt A: Laaja verkkoalue ja korkea kaapelointiaste
- Verkkoyhtiöt B: Keskikokoinen verkkoalue ja alhaisempi kaapelointiaste
- Verkkoyhtiö C: Kaupunkiverkko

Seuraavassa on esitetty yleisiä suuntaviivoja kompensoinnin toteutuksesta, käyttökokemuksista ja kehittämistarpeista. Verkkoyhtiöissä A ja B käytännöt ovat paljolti samankaltaisia. Tulokset eivät edusta jonkun yhden yhtiön käytäntöjä vaan tuloksista on pyritty löytämään yleisiä yhteisiä suuntaviivoja käytännöistä ja kokemuksista sekä myös eroavaisuuksia. Kaupunkiyhtiössä käytännöt ja haasteet ovat monelta osin erilaisia haja-asutusalueella toimiviin yhtiöihin verrattuna. Urbanilla alueella toimivat kaupunkiyhtiöt eivät käytä hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Joillain isoissa kaupungeissa toimivilla verkkoyhtiöillä saattaa olla kuitenkin myös haja-asutusalueen kaltaisia jakelualueita, joissa myös hajautetulle kompensoinnille saattaa olla tarvetta. Joillakin kaupunkiyhtiöillä keskijänniteverkko on edelleen maasta erotettu. Seuraavassa tarkastelussa pääpaino on yhtiöissä A ja B, koska hajautettu kompensointi on niissä käytössä ja laajenee kaapeloinnin edetessä.

4.2 Kaapeloinnin ja kompensoinnin tavoitteet

Kaikissa yhtiöissä A ja B käytetään keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin yhdistelmää. Joillain suppeammilla sähköasemilla saattaa olla pelkkä keskitetty kompensointi. Hajautettua kompensointia ei käytetä yksistään. Kaapeloinnin alkuvaiheessa hajautettua kompensointia on kokeiltu myös yksistään joissain yhtiöissä. Lähinnä suojausongelmien, kuten terveiden lähtöjen sympatialaukaisujen takia, käytännöstä on luovuttu.

Sähköverkkoyhtiöissä käytetään yleensä johdonmukaisesti joko jakelumuuntajan ja maasulkuvirran kompensoinnin sisältäviä ns. kombimuuntajia tai maasulkuvirran ja loistehon kompensoinnin sisältäviä rinnakkaiskuristimia. Yhdessä yhtiössä on siirrytty kombimuuntajista rinnakkaiskuristimiin. Tyypillisesti maasulkuvirran kompensointiyksiköt on mitoitettu 15 A virralle. Joissain yhtiöissä keskitetty automaattisesti säädetty maasulkuvirran kompensointi on ollut jo ilmajohtoverkoissa. Tällöin uutena asiana kaapeloinnin myötä on tullut lähinnä hajautettu kompensointi ja keskitettyjen kelojen koon kasvattaminen. Verkkoyhtiöiden tavoitteena ei ole täysin kaapeloitu verkko vaan tulevaisuudessakin verkkoihin jää ilmajohto-osuuksia. Siksi valokaaren sammumisominaisuuksiakaan ei voida kokonaan unohtaa. Vaikka kaapelointiaste tavoiteverkossa jäisi suhteellisen alhaiseksikin, oikealla suunnittelulla suurin osa verkon käyttöpaikoista ja verkon läpi siirretystä vuosienenergiasta saadaan silti syötettyä kaapeliverkon läpi.

Ennen kaapeloinnin aloittamista kompensoinnin motiiveja olivat mm. maasulkuvalokaaren sammuminen ja pikajälleenkytkentöjen vähentäminen, kosketusjännitteiden pienentäminen sekä säästöt maadoituskustannuksissa. Maakaapeloinnin myötä päätavoitteena on lähinnä maasulkuvirran pienentäminen, kosketusjännitevaatimusten täyttäminen ja toimitusvarmuus. Pikajälleenkytkennät otetaan yleensä pois käytöstä vasta kun lähes 100 % lähdön johtopituudesta on kaapelia. Käyttämällä keskitettyä kompensointia hajautetun kompensoinnin lisäksi pyritään myös suojauksen toimintaedellytysten parantamiseen.

Keskeinen syy hajautetun kompensoinnin käyttöön on keskitetyn kompensoinnin kapasiteettitarpeen pienentäminen. Tällöin keskitetyn kompensoinnin korvaustilanteet on helpompi järjestää. Myös laitevian riski hajautuu, kun yksiköitä on enemmän ja yksikkö koko on pienempi. Tällöin yksittäisen komponentin vikaantumisen ei ole yhtä kriittistä. Kompensointi voidaan toteuttaa paikallisesti siellä, missä reaktiivista maasulkuvirtaa ja loistehoa syntyy, jolloin kaapeleissa siirtyvät varausvirrat pienenevät. Tämä pienentää myös verkon tuottamaa maasulkuvirran resistiivistä komponenttia. Maasulkuvirran ja loistehon kompensoinnin skaalaus on helpompaa, kun kompensointia tulee vähitellen kaapeloinnin edetessä. Keskitetyn kompensoinnin liittyminen päämuuntajan tähtipisteeseen vaikuttaa myös luotettavuuteen. Jos muuntaja on korvaustilanteessa pois käytöstä, myös kompensointi on poissa. Nykyään keskitetyt kelat kytketään pääsääntöisesti maadoitusmuuntajien avulla ja hajautettu kompensointi pienentää kapasiteettitarvetta. Myös varasyöttötilanteissa kompensointi siirtyy verkon mukana. Varasyöttöön soveltuvia johto-osia on helpompi käyttää, jos ne kompensoivat pääosin itsensä.

Kytkenämuutosten yhteydessä, kun siirretään isoja johto-osuuksia sähköasemalta toiselle tai päämuuntajalta toiselle, on hyvä, jos kompensointi siirtyy ainakin osittain mukana. Siten verkon kokonaiskompensointiaste ei heilahda kovin paljon. Myös keskijännitelähtöjen vikalaukaisujen yhteydessä verkon viritystasot pysyvät lähempänä oikeata, kun kompensointia laukeaa myös pois. Tällöin keskitetty kompensointikela virittyy nopeammin uudessa tilanteessa. Keskitetyn kelan virittyminen saattaa kestää jonkin aikaa (esim. minuutin luokkaa), jolloin laajemmassa häiriötilanteessa uusi vika saattaa tulla jollekin toiselle lähdölle ennen kuin keskitetty kompensointikela on ehtinyt virittyä edellisen vikalaukaisun jälkeen. Mahdolliset peräkkäiset viat ovat harvinaisia kaapeliverkoissa. Mahdollisuus tällaisiin tilanteisiin liittyy ennemminkin ilmajohtoverkon vikatilanteisiin.

Samat edut kytkenämuutoksiin ja vikalaukaisuihin liittyen pätevät myös hajautettuun loistehon kompensointiin niissä yhtiöissä, joissa käytetään rinnakkaiskuristimia sekä maasulkuvirran että loistehon kompensointiin.

Verkkoyhtiöiden näkemyksen mukaan hajautettu kompensointi helpottaa myös suojausta, kun lähdön ”sähköinen” pituus lyhenee. Tällöin mm. mittausvirheiden vaikutus pienenee. Sympatialaukaisut ovat vähentyneet merkittävästi, kun pelkän hajautetun kompensoinnin käytöstä on luovuttu. Joitakin sympatialaukaisuja on kuitenkin esiintynyt myös keskitettyä kompensointia käytettäessä, jolloin suojaus perustuu vikavirran resistiiviseen komponenttiin. Tämä liittyy ns. resistiiviseen jälkivärähtelyyn, jolloin nollajännitteen jälkivärähtelyt generoivat virtaa, jonka lähdön suojaus näkee resistiivisenä suhteessa nollajännitteeseen. Vaikka sympatialaukaisuja vielä esiintyy jonkin verran, niitä ei nähdä enää merkittävänä ongelmana.

Periaatteet kompensointikapasiteetin jakamiseksi keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin kesken vaihtelevat hieman yhtiöittäin. Jossain yhtiössä tavoitteena on kompensoida 90 %

maasulkuvirrasta hajautetusti ja loput keskitetysti. Yleisohjeena voi myös olla, että tietty osa lähdön alkupäästä kompensoidaan keskitetysti. Hajautettua kompensointia aletaan esimerkiksi suunnitella lähdölle vasta, kun lähtö on tuottanut 15 A lähdön alusta lukien. Tällöin 15 A lähtöjen alusta jätetään keskitetysti kompensoitavaksi. Hajautetulla kompensoinnilla ei välttämättä kompensoida kokonaan loppua verkkoa keskitetyn kompensoinnin jälkeen, vaan hajautetun kompensoinnin kompensointiaste on tyypillisesti 70 - 80 %. Lopullinen viritys tehdään sähköaseman säätäjällä. Keskitetyn kompensoinnin osuudeksi jää tällöin noin 20 % hajautetusti kompensoidun verkon osuudesta. Hajautetusti kompensoitava johtoväli on tyypillisesti kaapelin poikkipinnan mukaan 5 – 10 km, ottaen huomioon myös verkon topologian, kuten luontaiset jakorajat ja haarat.

Myös keskitetyn kompensoinnin vähintään 20 % osuutta on pidetty lähtökohtana. Jos tavoitteena ei ole täysin kaapeloitu verkko, lähdöt voidaan kompensoida alusta asti ainoastaan tiettyyn etäisyyteen asti, jonka jälkeen lähdöt jatkuvat ilmajohtona. Tällöin kaapelin ja ilmajohdon väliin tulee maastokatkaisija. Erotuskohtaa kutsutaan vyöhykerajaksi.

Kompensointiyksiköt pyritään sijoittamaan runkojohdolle, jotta ne pysyisivät mahdollisimman hyvin kytkentämuutoksissa mukana. Jos käytetään jakelumuuntajan ja kompensoinnin yhdistelmälaitetta, runkojohdolla oleva muuntajakoko saattaa olla liian suuri kompensoinnille ja siksi yksiköitä joudutaan sijoittamaan myös haaroille. Kompensoinnin sijoittelu lasketaan verkostolaskennan avulla. Lasketaan paljonko verkko tuottaa kapasitiivista maasulkuvirtaa ja kuinka suuri osa siitä halutaan kompensoida. Siten voidaan määrittää tarvittavien kompensointiyksiköiden lukumäärä.

4.3 Kompensoinnin luotettavuus ja mitoitus

Kompensointiyksiköiden primäärikomponenteissa, kuten Petersenin keloissa, muuntajissa tai lisäkuormitusvastuksissa ei ole juurikaan ollut vikoja. Ne koetaan hyvin luotettaviksi. Sen sijaan keskitetyn kompensoinnin säätäjissä ja säätölaitteissa on esiintynyt joitakin vikoja. Säätäjien käyttöikäksi on määritelty tyypillisesti 25 vuotta. Vaikka keskitetyn kompensoinnin maadoitusmuuntajan ja kompensointikelan vauriot ovat harvinaisia, korvaustilanteet pitää ottaa suunnittelussa huomioon. Hajautettu kompensointi pienentää tätä korvaustarvetta.

Kun kaapelointi alkoi yleistyä, eikä tähtipisteen virtainjektioon perustuvia kompensoinnin säätölaitteita vielä ollut, verkon resonanssisäätäjät eivät enää välttämättä pystyneet piirtämään resonanssikäyrää eikä resonanssipistettä löytynyt. Tämä johtui verkon symmetrisyydestä ja alhaisesta normaalitilan nollajännitteestä.

Hajautetun kompensoinnin laitteissa ei ole juurikaan ollut vikoja joitakin yksittäistapauksia lukuun ottamatta. Yhdessä yhtiössä rinnakkaiskuristinyksiköiden lämpenemistä pyritään seuraamaan erityisesti kesähelteillä, mutta asian merkityksestä ei ole vielä tarkempaa tietoa. Tarkoitus on asentaa myös lämpötilan mittauksia.

Keskitetyn kompensoinnin vika- ja korvaustilanteissa käytetään yleensä viereisillä sähköasemilla olevaa alueellista ylikapasiteettia. Joillakin sähköasemilla saattaa olla myös luontainen kahdennus, jos vanha kela on ollut päämuuntajan tähtipisteessä ja sähköasemalle on asennettu uusi kompensointi. Vanha järjestelmä on jäänyt varalle. Joillain sähköasemilla saattaa olla kahdennus myös uudemmilla laitteilla.

Keskitetyn kompensointikuristimen tulee kestää maasulkua 2 tuntia. Jos kela on ylimitoitettu ja sen läpi kulkee maasulussa huomattavasti nimellisvirtaa pienempi virta, se kestää vastaavasti myös maasulkua kauemmin. Hajautetun kompensoinnin yksiköiden vaatimus maasulun kestolle on yleensä joko 15 minuuttia tai 2 tuntia. Aika ei riipu suoraan yksikön tyypistä. Lisäkuormitusvastuksen maasulun kesto-aika on tyypillisesti 90 sekuntia, joka jälkeen terminen irtikytkentäsuojia irrottaa sen verkosta. Lisäkuormitusvastus on tyypillisesti koko ajan kytkettynä. Jos verkko on riittävän symmetrinen, vastus voi olla myös normaalitilassa pois päältä ja se kytketään vasta maasulun synnyttyä nollajännitemittauksen perusteella.

4.4 Keskitetyn kompensoinnin säätö, mittaukset ja käyttötapa

Ilmajohdoverkoissa ja sekaverkoissa keskitetyn kompensoinnin säätöön on perinteisesti käytetty nollajännitemittaukseen perustuvaa resonanssisäätöä. Säätömenetelmä edellyttää riittävää verkon epäsymmetriaa ja siten normaalitilan nollajännitettä. Kaapelointiasteen kasvaessa keskijänniteverkot tulevat huomattavasti symmetrisemmiksi eikä resonanssisäätö enää välttämättä toimi. Siksi uudet keskitetty kompensointilaitteistot on pääsääntöisesti varustettu tähtipisteen virtainjektioilaitteistolla, jonka toiminta ei ole riippuvainen verkon luontaisesta epäsymmetriasta. Säätäjissä on usein säätöviive aikajälleenkytkentöjä (ajk) varten, jotta kela ei lähde säätymään ajk:n aikana.

Nykyaikaiset säätölaitteet pystyvät mittaamaan verkosta tiettyjä parametreja, jotka yleensä on määritetty verkostolaskennan avulla. Tällä hetkellä näitä tietoja on tuotu vielä aika rajallisesti käytönvalvontaan. Riippuu myös asemaväylästä, mitä tietoja voidaan tuoda käytönvalvontaan. Tyypillisimpiä käytönvalvonnan kautta luettavia tietoja ovat resonanssipiste, kelan asento, laitteiston mittaama nollajännite, lisävastuksen päällä olo yms. Myös verkon resistiivinen maasulkuvirta on mahdollista saada säätäjältä. Säätäjältä saatava virta ei kerro kuitenkaan verkon laajuutta, jos säätäjälle ei ole tuotu tietoa mahdollisen apukelan kelojen tilatietoa. Keskitetyn kelan virta ei kerro myöskään hajautetun kompensoinnin osuutta. Keskitetty säätäjä ei summaa muiden kompensointiyksiköiden virtoja.

Lisäkuormitusvastus on pääsääntöisesti koko ajan kytkettynä. Joissakin tapauksissa lisäkuormitusvastus kytkeytyy viiveellä maasulun synnyttyä. Tämä käyttötapa edellyttää verkon riittävää symmetrisyyttä, jotta normaalitilan nollajännitettä ei tarvitse pienentää pitämällä vastus kytkettynä. Verkoissa, joissa on pitkiä vuorottelemattomia ilmajohdölähtöjä, vastus täytyy pitää epäsymmetriankin takia jatkuvasti kytkettynä. Joillain sähköasemilla saattaa olla 2 eri vastusta tai vastuksen mitoitusta voidaan säätää kahdessa pykälässä.

4.5 Maasulkuvirran resistiivinen komponentti

Hajautetun kompensointiyksikön resistiiviset häviöt kasvattavat resistiivistä maasulkuvirtaa. Toisaalta hajautettu kompensointi pienentää johdoilla kulkevia varausvirtoja, mikä pienentää maasulkuvirtaan muodostuvaa resistiivistä virtakomponenttia.

Suomessa verkkoyhtiöiden käyttämät hajautetun kompensoinnin yksiköt voidaan jakaa lähinnä kahteen ryhmään. Jakelumuuntajan ja maasulkuvirran kompensointiin tarkoitetut yhdistelmälaitteet ns. kombimuuntajat ovat tyypillisesti ZN(d)yn tai ZNzn kytkentäisiä. Toinen kompensointilaitetyyppi ovat rinnakkaiskuristimet (YN), joita voidaan käyttää myös loistehon kompensointiin. Tällaisia yksiköitä voidaan usein säätää portaittain välillä 5 – 15 A. Perinteistä

maadoitusmuuntajaa (ZN) ja sen tähtipisteeseen kytkettävää maadoituskuristinta käytetään pääasiassa vain sähköasemilla. Laitetyyppi vaikuttaa jossain määrin resistiivisiin häviöihin. Rinnakkaiskuristimilla R/X suhde on tyypillisesti luokkaa 1,5 %, mikä on hieman suurempi kuin kombimuuntajayksiköillä. Havaintojen mukaan hajautetun kompensoinnin kyky pienentää maasulkuvirran resistiivistä maasulkuvirtaa pitkillä lähdöillä on suurempi kuin laitteiden häviöistä tuleva pieni virran kasvu.

Havaintojen mukaan resistiivinen maasulkuvirta on ongelma lähinnä verkoissa, joissa on hyvin pitkiä lähtöjä ja vähän muuntamoita. Myös korvaustilanteissa, joissa lähdön pituus muodostuu hyvin suureksi, resistiivinen komponentti kasvaa. Resisttiivistä komponenttia ei nähdä ongelmaksi niinkään alueilla, joissa on enemmän muuntamoita ja verkkorakenne on silmukoidumpi myös maadoitusten osalta. Resisttiivistä maasulkuvirtaa ei yleensä tunneta kovinkaan hyvin, mutta sen suuruutta on tarkkailtu mm. keskitetyn kompensoinnin säätäjiltä. Laaja maadoitusverkko ja erillisen maadoituskuparin käyttäminen maakaapeloinnin yhteydessä pienentävät resistiivistä vikavirtakomponenttia. Jäännösmaasulkuvirran arvioinnissa on käytetty yleensä kokemukseen perustuvaa arvoa vikavirran resistiiviselle komponentille ja riittävää varmuusmarginaalia.

Resistiivistä maasulkuvirtaa ei tällä hetkellä nähdä yleisesti suurena ongelmana käytettäessä keskitettyä ja hajautettua kompensointia. Sen suuruutta ei ole yleensä järjestelmällisesti selvitetty. Kun maasulkuvirtoja on mitattu yhdistettyjen maadoitusten tilanteessa, kosketusjännitteet ovat olleet pieniä. Kosketusjännitteiden kannalta haastavimmiksi nähdään keskijänniteverkon ulkopuolelta tulevat maasulut, (esim. 110 kV) tai viereisen sähköaseman ilmajohtoverkon kautta tulevat maasulut, joissa maadoitukset eivät ole läheltä yhdessä.

Keskijänniteverkoissa ei ole tehty juurikaan sähkönlaatumittauksia, joten harmonisten yliaaltojen esiintymistä normaalitilan vaihejännitteissä tai maasulkuvirrassa ei ole todennettu. Häiriötallenteista on voitu kuitenkin todeta, että maasulkuvirrassa saattaa esiintyä merkittävästikin harmonisia taajuuksia. Yhdessä yhtiössä harmonisia on mitattu sähkönlaatumittareilla ja harmonisia taajuuksia on verkoissa havaittu.

4.6 Kaupunkiyhtiön käytännöt

Uraanilla kaupunkialueella toimivassa sähköverkkoyhtiössä kompensoinnin toteutus ja haasteet poikkeavat selvästi haja-asutusalueilla toimivista yhtiöistä. Verkot ovat lähes kokonaan kaapeloituja. Kaupunkiverkossa on tyypillisesti paljon lyhyehköjä kaapelilähtöjä, joissa kaapeleiden poikkipinnat ovat suhteellisen suuria. Verkon maadoitukset muodostavat laajan silmukkamaisen maadoitusjärjestelmän. Paljolti edellä mainituista syistä hajautettua kompensointia ei käytetä ja kompensointi toteutetaan keskitetysti. Kompensointikelat on kytketty suoraan päämuuntajan (YNyn0) tähtipisteeseen. Kelojen normikoko on 400 A, mutta myös 500 A keloja käytetään.

Edellä mainituista verkon ominaisuuksista johtuen maasulkuvirran resistiivinen komponentti ei ole merkittävä. Kompensointilaitteiden resistiiviset häviöt ovat keskeisin lähde resistiiviselle maasulkuvirralle.

Päämotiivi 20 kV kompensointi-investoinneissa on ollut maasulkuvirran pienentäminen 150 – 300 A tasolta niin pieneksi, jotta 20 kV maasulkusuojaus voidaan muuttaa myös hälyttäväksi.

50 % keskijännitevioista ei näy asiakkailta mitenkään. Sammutetun verkon maasulut aiheuttavat myös vähemmän jännitemuuntajarasituksia ja pienjänniteverkon transientteja.

Kompensoinnin primäärikomponenteissa ei ole ollut vikoja. Laitteviassa yksi kela voi kompensoida koko sähköaseman ja verkko voidaan muuttaa myös maasta erotetuksi, jolloin suojaus muuttuu laukaisevaksi.

Lisäkuormitus kytkeytyy viiveellä maasulun synnyttyä. Se kytkeytyy 3 sekunnin viiveellä 3 sekunnin ajaksi automaattisesti. Vaikka lisäkuormitusvastus auttaa $\cos \varphi$ karakteristikaan perustuvan suojauksen toimintaa, sille ei nähdä yhtä suurta tarvetta kuin maaseutuyhtiöissä, koska käytössä on paljon muitakin suojausfunktioita, kuten transientteihin perustuva funktio, katkeilevan maasulun suoja ja harmonisiin yliaaltoihin perustuva funktio.

Kaapeliverkossa kosketusjännitteet eivät ole ongelma, koska lähes kaikki vikavirta kulkee kaapelin maadoitetuissa osissa. Kosketusjännitteet ovat ongelmallisempia lähinnä seka- ja avojohtoverkoissa, joissa jäännösvirta ja suojaus pitää suunnitella ilmajohtovian perusteella, jossa kaikki vikavirta menee maahan.

Sympatialaukaisut tai nollajännitteen jälkivärähtelyt eivät ole ongelma, kun käytetään hälyttävää suojausta. Myös katkeilevat maasulut havaitaan hyvin, koska käytössä on useampia funktioita.

Keskitetyn kompensoinnin hintaa nostaa kompensoinnin kahdennusvaatimus. Kelat voidaan korvaustilanteessa aina korvata toisella.

4.7 Uudentyyppinen hajautettu kompensointimenetelmä

Hankkeen tavoitteena oli selvittää luvussa 2 kuvatun maasulkuvirran kompensointitavan käytettävyyttä ja toteutettavuutta. Tällöin maakaapelin tuottama maasulkuvirta kompensoitaisiin pienellä kompensointiyksiköllä, joka voisi korvata maakaapelijatkoksen. Vastaavantyyppinen laite voisi olla sijoitettuna myös maan päälle esimerkiksi jakelumuuntamon yhteyteen. Kompensointiyksiköiden välisestä etäisyydestä, kaapelin tyypistä ja poikkipinnasta riippuen kompensointiyksikön kompensoima maasulkuvirta voisi olla esimerkiksi 1 – 3 A. Siten hajautettu kompensointi olisi nykyistä tasaisempi.

Menetelmä nähdään potentiaalisempänä yhtiöissä, joissa kaapelointi on vielä alkuvaiheessa. Niissä yhtiöissä, joissa suurin osa kaapeloiduiksi suunnitelluista verkoista on jo kaapeloitu, uusi menetelmä ei enää ehtisi kovin paljon vaikuttaa.

Periaatteessa nähdään hyvänä, että hajautetusta kompensoinnista tulisi vielä nykyistäkin paikallisempaa ja kompensointi siirtyisi verkon mukana kytkentämuutosten ja vikalaukaisujen yhteydessä. Siirtyvä kaapeliverkko tuottaisi vähän maasulkuvirtaa.

Yhdessä yhtiössä nähtiin myös, että kaupunki- ja taajama-alueilla on usein rajoitetusti paikkoja hajautetulle kompensoinnille. Erotinvälit ovat myös lyhyempiä. Siksi pienempi laite voisi olla taajamissa parempi. Tältä kannalta myös jälkeinpäin asennettava yksikkö esimerkiksi jakelumuuntamon yhteyteen voisi olla kiinnostava. Haja-asutusalueilla ei yleensä ole isompia ongelmia löytää paikkoja hajautetulle kompensoinnille. Keskitetty kompensointi pitää olla aina hajautetusta kompensoinnista huolimatta.

Sähköverkkoyhtiöissä nähdään, että Energiaviraston julkaisemia yksikköhintoja voidaan käyttää hintatarkastelun karkeana pohjana, kun hintoja verrataan mahdollisen uuden kompensointiyksikön hintaan [4]. Vertailtaessa eri ratkaisuja, kompensoinnin hinta on tarkoituksenmukaista määritellä kompensoitavaa ampeeria kohti (€/A). Kaikissa yhtiöissä nähtiin, että uuden kompensointiratkaisun tulisi olla kustannustehokas nykyisiin kompensointikäytäntöihin verrattuna. Maasulun keskitettyjen sammutuslaitteistojen yksikköhinnat kompensoitavaa ampeeria kohti vaihtelevat välillä 634-1331 €/A riippuen sammutuslaitteiston koosta [4]. Mitä isommalle virralle sammutuslaitteisto on mitoitettu, sitä alhaisemmaksi hinta jää kompensoitavaa ampeeria kohti. Hajautetun kompensoinnin yksikköhinnat on määritelty joko alle 10 A tai yli 10 A yksiköille. Jos ampeerikohtainen hinta lasketaan 10 A:lla, hinnat vaihtelevat välillä 1120-1910 €/A [4]. Yhdessä yhtiössä nähtiin, että Energiaviraston yksikköhinnat olisivat hieman todellisia hintoja korkeammat.

Todellisia hintoja ei aina voi suoraan verrata Energiaviraston yksikköhintoihin. Hintojen suoraa vertailua vaikeuttaa se, että hajautetun kompensoinnin laitteet ovat usein yhdistelmälaitteita. Maasulkuvirran kompensoinnin lisäksi samaa laitetta voidaan käyttää myös jakelumuuntajana tai loistehon kompensointiin. Joissain yhtiöissä kompensointi on ohjattavissa kaukokäytön välityksellä, joka myös nostaa hintaa. Hintaan vaikuttaa myös se, millaisia rakenteita verkossa käytetään ja millaisiin laitesuojaiin yksiköt sijoitetaan.

Vaatimukset uuden laitteen suojaustasolle ovat pitkälti samat kuin nykyisille kompensointilaitteille. Laitteen tulee kestää maasulkua vähintään 2 h. Laitteen tulee kestää myös kaksoismaasulkuvirrat. Laitteen suunniteltu käyttöikä pitäisi olla vähintään sama kuin maakaapeleilla eli 45 - 50 vuotta eivätkä ne saisi huonontaa maakaapeliverkon luotettavuutta. Nykyisten maakaapeleiden on arvioitu todellisuudessa kestävän huomattavasti kauemmin kuin 50 vuotta. Kaapelijatkokset ja –päätteet ovat todennäköisesti itse kaapeleita heikompia komponentteja.

Laitteen 2 h maasulun kestoa pidettiin riittävänä. Jos sellaiset laitteet tai menetelmät, joilla verkkoa voitaisiin käyttää maasulun aikana, yleistyisivät tulevaisuudessa, maan alle sijoitettu laite määrittää pisimmän maasulussa pitoajan. Sama pätee tietysti nykyisiinkin hajautetun kompensoinnin laitteisiin, mutta ne ovat helpommin vaihdettavissa tai erotettavissa.

Pääsääntöisesti nähtiin hyvänä, jos kompensointilaitteet olisi mahdollista irrottaa verkosta, vaikka kaikissa yhtiöissä sitä ei nähty välttämättömänä. Uusille asemille tehdään maasulkukokeet usein myös maasta erotettuna, mikä ei olisi mahdollista, jos kompensointia ei saada erotettua. Tältä osin verkon käyttö ja testaus muuttuisivat jonkin verran nykyisestä. Kaikissa yhtiöissä verkkoa ei pystytä saamaan enää puhtaasti maasta erotetuksi. Siksi uudenkaan laitteen erottamista kytkinlaitteen avulla ei pidetä välttämättömänä. Olennaisempaan nähdään loistehon kompensoinnin erottamismahdollisuus. Verkoissa saattaa esiintyä varasyöttötilanteita, joissa jännite saattaa ruveta laskemaan. Tällaisissa tilanteissa on olennaista, että hajautettua loistehon kompensointia saadaan kytkettyä irti. Siksi rinnakkaiskuristimet onkin yleensä varustettu kauko-ohjattavalla erottimella. Pienimpien kompensointilaitteiden erottamismahdollisuutta ei nähdä välttämättömänä, jos laitetta ei tarvitse huoltaa tai tehdä sille muita toimenpiteitä.

Vaikka kaikissa verkkoyhtiöissä ei nähty laitteen sijoittamista maan alle mahdottomana, esille tuli myös ajatus laitteen sijoittamisesta maan päälle erillislaitteena, esimerkiksi jakelumuuntamolle tai keskijännitejakokaappiin, mikäli laitteen koko on riittävän pieni. Tällöin

sijoituskohdassa voisi olla myös kaapeliverkon erotuskohta. Tämä tukisi myös kaapelivaurioiden korjaamista. Maan alle sijoitettaessa laitteen tiiviys kosteuden suhteen nähtiin kriittisenä. Myös kaapeleiden asennussyvyys rajoittaa laitteen fyysisiä mittoja, koska se ei saa jäädä liian pintaan. Yhdessä yhtiössä nähtiin, että kompensointia ei pitäisi sijoittaa maan alle.

Yhdessä yhtiössä nähtiin, että laitteen tulisi olla käsin liikuteltavissa. Muissa yhtiöissä ei nähty ongelmallisena laitteen siirtämistä koneen avulla maakaapeloinnin yhteydessä.

Yhtenä haasteena nähdään myös tarve kompensoida loistehoa. Maaseutuyhtiöissä kaapelit ovat usein aika pienikuormaisia, jolloin loistehoa syntyy yli tarpeen. Jos yhtiö on valinnut rinnakkaiskuristimet maasulkuvirran ja loistehon kompensointiin, uuden menetelmän käyttöön ottaminen edellyttäisi loistehon kompensoinnin uudelleen suunnittelua.

Lopuksi on listattu vielä sähköverkkoyhtiöiden haastatteluissa esille tulleita muita haasteita ja kehittämistarpeita.

- Maasulkuvirran resistiivisen komponentin hallinta
- Taajamien hajautettu kompensointi – jälkiasenteinen kompensointiyksikkö
- Maasulkuvirran ja loistehon kompensointiin tarkoitetuissa rinnakkaiskuristinyksiköissä ääniongelman poistaminen
- Harmonisten taajuuksien esiintyminen jäännösmaasulkuvirrassa ja niiden vaikutukset kosketusjännitteisiin sähköturvallisuuden näkökulmasta
- Suuri laitekanta kompensointilaitteiden osalta

5 LAITTEEN TOTEUTETTAVUUS

Hankkeen tavoitteena oli selvittää alustavasti laitteen toteutettavuutta, johon laitteen aktiivisten osien paino ja mitat vaikuttavat olennaisesti. Tämä edellytti kuristimen ja maadoitusmuuntajan alustavaa suunnittelua. Laitteen paino ja ulkoiset mitat vaikuttavat olennaisesti myös sen mahdolliseen asennuspaikkaan ja sille asetettaviin vaatimuksiin. Toinen keskeinen asia olivat kompensointiyksikön resistiiviset häviöt sekä niiden yhteys laitteen kokoon. Kompensointikuristimen ja tähtipisteen muodostamiseen käytettävän ZN-kytkentäisen maadoitusmuuntajan suunnittelua tarkasteltiin erikseen. Laitteen aktiivisten osien koon arvioinnissa käytetyt menetelmät ja analyysi on esitetty tarkemmin liitteessä 1. Tässä esitetään lähinnä pääkohdat ja keskeiset johtopäätökset.

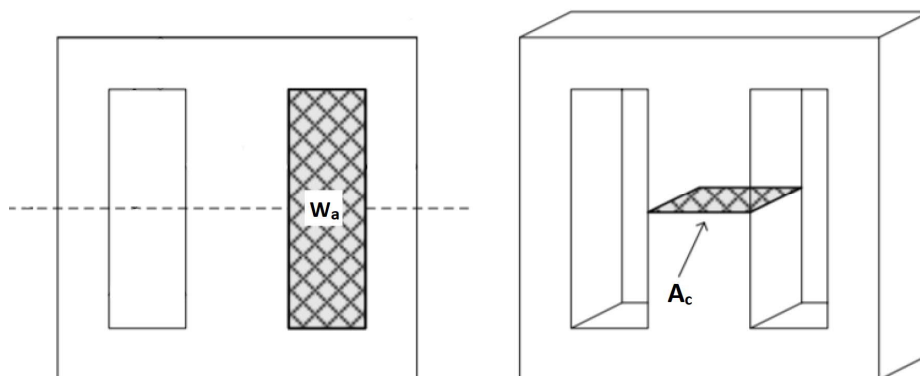
5.1 Kompensointikuristimen koon arviointi

Kompensointikuristimen suunnittelun lähtökohtana oli kuristimen induktanssi, jonka edustama reaktanssi mitoitetaan vastaamaan tietyn pituisen maakaapelin kolmen vaiheen maakapasitanssien edustamaa kapasitiivista reaktanssia. Kun kompensoitavaksi suunnitellun kaapeliosuuden maasulussa tuottama kapasitiivinen virta tunnetaan, sen edustama maakapasitanssi voidaan määrittää. Maakaapeleiden maakapasitanssiarvot löytyvät myös kaapelivalmistajien julkaisemista taulukoista.

Hankkeessa tarkasteltiin kahta erityyppistä kuristin- ja sydänrakennetta. Sydämen kokoa arvioitiin erikseen toroidi- ja EI tyyppisille sydänrakenteille. Sydämen suunnitteluun käytettiin ”area product” menetelmää, joka hyödyntää seuraavia parametreja [8].

- Suunnittelun pohjana oleva haluttu induktanssin arvo (L)
- Kaapeliosuuden tuottaman kapasitiivisen vikavirran tehollisarvo (I_0)
- Sopiva arvo magneettivuon tiheyden huippuarvolle sydämessä (B_{max})
- Sopiva arvo RMS virrantiheydelle käämissä (J_{rms})

Parametri ”area product” (A_p) määritetään sydämen poikkipinta-alan (A_c) ja sydämen ikkuna pinta-alan (core window area W_a) tulona. Parametri K_u (käämi-ikkunan täytekerroin) kuvaa sitä, kuinka suuren osa ns. ikkunapinta-alasta kuparikäämit täyttävät. Tyypilliset arvot parametrille K_u ovat 0,4:n ympärillä. Arvo 40 % tarkoittaa, että 40 % ikkunapinta-alasta on varattu kuparikäämille ja loppu 60 % käämieristeelle, kerroseristeelle, kelan rungolle yms.



Kuva 5.1 EI tyyppisen rautasydämen poikkipinta-ala A_c ja ikkunapinta-ala W_a [9].

5.1.1 Toroidisydäminen kuristin

Toroidisydämisen kuristimen aktiivisen osan painoa arvioitiin "area product" menetelmällä, kun virrantiheyden tehollisarvona käytettiin arvoa $J_{rms} = 6 \text{ A/mm}^2$ ja magneettivuon tiheyden huippuarvona $B_{max} = 1,2 \text{ T}$. Käämi-ikkunan täyttekertoimelle laskettiin arvo $K_v = 0,39$ käyttäen käämijohtimien ohjelehdistä saatavaa informaatiota [10] ja valitsemalla sopivat käämi- ja kerroseristeet [11]. Kun kompensoitava virta kasvaa, myös kuristimen paino kasvaa vastaavasti. Kun toroidisydämisen kuristimen aktiivisen osan painoa arvioitiin "area product" menetelmällä, havaittiin, että arvioitu paino oli välillä 13,7 – 56,0 kg, kun kompensoitava virta vaihteli välillä 1 – 3 A. Kun vikavirta oli 1,5 A, aktiivisen osan paino oli 20,5 kg, rautasydämen ulkosäde oli 102 mm ja sen paksuus 94,8 mm. Vikavirran vaihdellessa välillä 1 – 3 A, kuristimen resistanssi vaihteli välillä 23,3 – 42,1 Ω ja R/X suhde välillä 0,4 – 0,6 % vastaavasti.

5.1.2 EI sydäminen kuristin

"Area product" menetelmää käytettiin myös kompensointikuristimen aktiivisen osan painon arviointiin, kun kela on varustettu standardikokoisella laminoidulla EI rautasydämellä. 1,5 A vikavirralla EI sydämisen laitteen aktiivisen osan paino olisi 25,2 kg ja mitat (360 x 305 x 87,5) mm. Millä tahansa kompensointivirran arvolla välillä 1 – 3 A laminoidulla EI rautasydämellä varustetun kuristimen aktiivisen osan paino oli hieman suurempi toroidisydämiseen kuristimeen verrattuna.

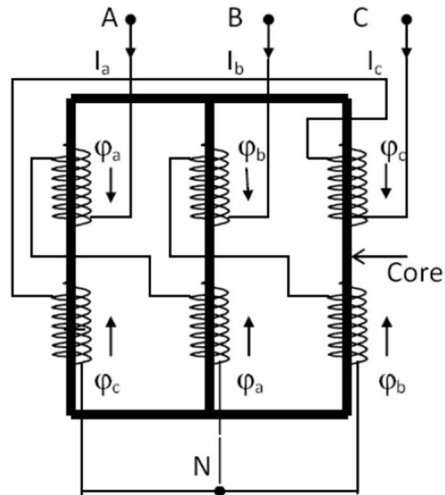
5.1.3 Maadoitusmuuntaja

Jotta maasulkuvirran kompensointikuristin saadaan kytkettyä verkkoon, sitä varten pitää muodostaa tähtipiste. Tätä varten arvioitiin myös ZN kytkentäisen maadoitusmuuntajan aktiivisen osan painoa "area product" menetelmän avulla. Kuvassa 5.2 on esitetty ZN kytkentäisen maadoitusmuuntajan käämien kytkeytyminen.

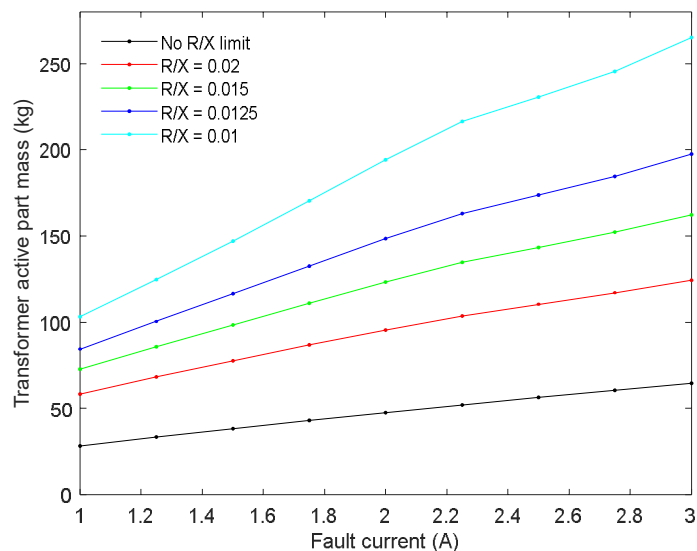
Muuntajan kokoa estimoitiin skaalaamalla normaalin kolmivaiheisen laminoidun EI sydämen mitat kertoimella siten, että haluttu "area product" arvo saavutetaan. Sydämen poikkipinta on oletettu neliön muotoiseksi. Vaihekäämin resistanssi R_{zn} riippuu suurimmasta sallitusta virrantiheydestä J_{rms} . Maadoitusmuuntajan resistanssi kasvattaa koko kompensointilaitteen R/X suhdetta pelkkään kuristimeen verrattuna. Laitteen R/X suhde voidaan rajoittaa sopivalle tasolle siten, että alla oleva ehto täyttyy. R_0 on kuristimen resistanssi.

$$\frac{R_{zn}}{3} + R_0 \leq \frac{R}{X}$$

Tämä ehto määrittelee maksimiarvon maadoitusmuuntajan (ZN) resistanssille R_{zn} . Tällöin virrantiheys J_{rms} valitaan siten, että tämä resistanssiraja toteutuu. Siten "area product" ja muuntajan paino kasvavat, kun R/X raja pienenee. Kuvassa 5.3 on esitetty arvio maadoitusmuuntajan aktiivisen osan massalle kompensointivirran (vikavirta) ja R/X suhteen funktiona.



Kuva 5.2 ZN kytkehtäisen maadoitusmuuntajan käämien kytkeytyminen [12].



Kuva 5.3 ZN kytkehtäisen maadoitusmuuntajan aktiivisen osan massa erilaisilla vikavirran ja R/X suhteen arvoilla.

5.2 Johtopäätökset

Tutkimuksessa havaittiin, että käyttämällä toroidisydämistä kompensointikuristinta, laitteen paino saataisiin hieman pienemmäksi EI rautasydämiseen kuristimeen verrattuna. Esimerkiksi 1,5 A mitoitusvirralla toroidisydämisen kuristimen aktiivisen osan paino voisi olla lähellä 20 kg:aa. Maadoitusmuuntajan (ZN) aktiivinen osa on kuristinta selvästi painavampi ja suurempi komponentti. Maadoitusmuuntajan painoon vaikuttaa merkittävästi sen R/X suhde. Laitteen kokonaishäviöt määräytyvät kuristimen ja maadoitusmuuntajan yhteenlasketuista häviöistä.

Tuloksia arvioitaessa tulee muistaa, että tavoitteena oli ainoastaan laitteiden aktiivisen osan koon arviointi. Näistä arvioista puuttuvat mm. laitteen suojakuoren, eristysten yms. vaikutus koko laitteen kokoon ja painoon.

6 YHTEENVETO

Hankkeessa selvitettiin maasulkuvirran kompensoinnin nykykäytäntöjä ja kehittämistarpeita yhteistyössä sähköverkkoyhtiöiden kanssa. Hankkeen taustalla oli myös ajatus siitä, että hajautettu kompensointi voitaisiin toteuttaa pienillä, esimerkiksi 1 – 3 A kompensointiyksiköillä. Kompensointiyksiköt voitaisiin sijoittaa kaapelijatkoksen yhteyteen. Sähköverkkoyhtiöiden kanssa toteutetuissa haastatteluissa ja keskusteluissa tuli esille myös muita mahdollisia maanpäällisiä sijoituspaikkoja, kuten esimerkiksi jakelumuuntamot tai keskijännitejakokaapit.

Hajautetun kompensoinnin tasaisuudella on teoriassa vaikutusta maakaapelin maasulussa tuottaman resistiivisen maasulkuvirran suuruuteen. Kompensointiaste vaikuttaa myös maasulkuvirran reaktiiviseen komponenttiin. Hankkeessa tarkasteltiin laskennallisesti kompensointiyksiköiden välisen etäisyyden vaikutusta kaapelin maasulussa tuottamaan resistiiviseen maasulkuvirtaan esimerkkitapauksessa. Tarkastelussa oletettiin, että nykyisin käytettävien kompensointiyksiköiden R/X suhde on sama kuin mahdollisten uusien pienempien yksiköiden R/X suhde. Esimerkitapauksessa todettiin, että kompensointiyksiköiden välisen etäisyyden ollessa 5 – 10 km tai sitä lyhyempi, täysin kompensoidun kaapelin tuottama maasulkuvirta muodostuu pääasiassa kompensointiyksiköiden resistiivisistä häviöistä.

Maasulkuvirran suuruuden osalta tarkasteltiin esimerkitapauksessa myös kompensointiyksiköiden välisen etäisyyden pienentämistä nykyisestä 5 – 10 km:stä. Tarkastellut yksiköiden resistiiviset häviöt olivat 1 % ja 2,5 %. Kompensointiyksiköiden koon pienentämisellä ja niiden välisen etäisyyden pienentämisellä nykykäytäntöihin verrattuna ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta maasulkuvirran resistiivisen komponentin kannalta, jos lähdön kompensointiaste ja yksiköiden resistiiviset häviöt oletetaan vakioiksi. Maasulkuvirran kannalta olennaisempia tekijöitä ovat hajautetun kompensoinnin kompensointiaste ja yksiköiden resistiiviset häviöt nykykäytäntöihin verrattuna. Myös kaapelityyppi, johtimienpoikkipinta ja maadoitukset vaikuttavat resistiiviseen vikavirtaan.

Nykyistä tasaisemmalla hajautetulla kompensoinnilla ei ole nähtävissä suurta vaikutusta verkon suojaukseen, mikäli sitä sovelletaan yhdessä keskitetyn kompensoinnin kanssa. Mikäli sovellettaisiin pelkästään hajautettua kompensointia, tilanne muuttuisi. Tällöin pitäisi huolehtia resistiivisen vikavirran riittävydestä suojauksen kannalta.

Maasulun poistuttua ilmenevien jälkivärähtelyiden kannalta olennaisia kysymyksiä ovat verkon kokonaiskompensointiaste vian poistumishetkellä ja verkon vaimennus. Mikäli verkossa on säädettävä keskitetty kompensointi, hajautetun kompensoinnin toteutuksella ei ole merkittävää vaikutusta jälkivärähtelyiden taajuuteen. Keskitetyn kompensointikuristimen säätötarve vikalaukaisujen jälkeen olisi pienempi, mikäli lähtöjen kompensointiaste olisi korkeampi.

Useimmissa haastatelluissa haja-asutusalueella toimivissa sähköverkkoyhtiöissä uudentyypistä kompensointiratkaisua ei tyrmätä. Kompensoinnin nykyistä parempi siirtyminen verkon mukana kytkentämuutosten ja vikalaukaisujen yhteydessä nähdään positiivisena. Yleinen näkemys oli kuitenkin, että keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin yhdistelmästä ei haluta luopua. Joissakin verkkoyhtiöissä huolta herätti laitteiden sijoittaminen maan alle ja kompensoinnin erottamismahdollisuuden puuttuminen. Siksi esille nousi myös muita mahdollisia sijoituspaikkoja, kuten jakelumuuntamot tai keskijännitejakokaapit.

Hankkeessa selvitettiin alustavasti 1 – 3 A kompensointikuristimen ja ZN kytkentäisen maadoitusmuuntajan muodostaman kompensointilaitteen toteutettavuutta ja kokoa. Suunnittelussa huomioitiin ainoastaan kompensointilaitteen aktiiviset osat. Kompensointikuristimen sydämen ja käämin paino ja mitat pysyvät kohtuullisina. Sen sijaan maadoitusmuuntaja on huomattavasti painavampi komponentti. Maadoitusmuuntajan R/X suhde vaikuttaa myös merkittävästi laitteen painoon.

7 LÄHDELUETTELO

- [1] Sähkömarkkinalaki 588/2013.
- [2] Nikander, A., Mäkinen A., Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset - suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2017, 40 s. + liites. 1 s.
- [3] Saarni, A., Transmission cable joint for a medium voltage underground cable system, patent application, BP212548
- [4] Energiavirasto, Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 – 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 – 31.12.2023 valvontajaksolla, Liite 2: Sähkön jakeluverkkotoiminta, Sähkön suurjännitteinen jakeluverkkotoiminta, 2018
- [5] Gulbrand A. Earth faults in Extensive Cable Networks, Licentiate thesis. Lund, Sweden, 2009, Lund University, 121p.
- [6] Haase, H., Taimisto, S., Distributed compensation of earth fault current in medium voltage networks. Proceedings of the 8th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 1985), IEE Conference Publication No. 250, Part 1, Brighton, UK, May 1985, pp. 150-153
- [7] VDE 0228, Teil 2, VDE-Bestimmung für Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen; Beeinflussung durch Drehstromanlagen. Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE), December 1987, 23 p.
- [8] Kazimierczuk, M. and Sekiya, H., "Design of AC resonant inductors using area product method," in Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, p. 994, 2009.
- [9] Versèle, C. Deblecker O. and Lobry, J., "Multiobjective optimal design of transformers for isolated switch mode power supplies," in Proc. SPEEDAM, pp. 1687-1692, 2010.
- [10] McLyman, C. (2011). Transformer and inductor design handbook. 4th ed. New York: Dekker, pp. 160-195.
- [11] Nitto Denko Corporation. Insulation paper product data sheet. p.1., 2020.
- [12] Basu K. and Hanoon, N., "Zigzag transformer - some new applications with a note to energy efficiency," International Journal of Power and Energy Conversion, vol. 6, no. 3, p. 268, 2015.

APPENDIX 1: EVALUATING A SIZE OF SMALL COMPENSATION UNIT

Arc Suppression Coil

For a given capacitive fault current, the weight of the active part of the required compensation device can be estimated using the area product method. The required inductance value of the compensation device can be found from

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0} \quad (1)$$

where $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency based on a system frequency $f = 50$ Hz and C_0 is the distributed capacitance of the line. When the RMS fault current (I_0) is known, C_0 can be found from

$$C_0 = \frac{I_0}{\sqrt{3}\omega U}, \quad (2)$$

where $U = 20$ kV is the RMS line-to-line voltage.

The area product method utilises the required inductance value, the RMS fault current, as well as suitable values for peak flux density B_{\max} in the core and RMS current density J_{rms} in the windings to provide good criteria for core selection [8]. The area product refers to the product of the core cross-sectional area A_c and the core window area W_a as shown in Figure 1 and is calculated as

$$W_a A_c = \frac{\sqrt{2} L I_0^2}{K_u J_{\text{rms}} B_{\max}} \quad (3)$$

The window utilisation factor K_u is a measure of how much of the core window area is taken up by the copper of the winding. Typical values for K_u are around 0.4 [10], meaning that 40% of the window area is reserved for the copper of the winding and the remaining 60% for winding insulation, layer insulation and coil formers, etc. Figure 2 shows a representation of a window utilisation factor of 0.4.

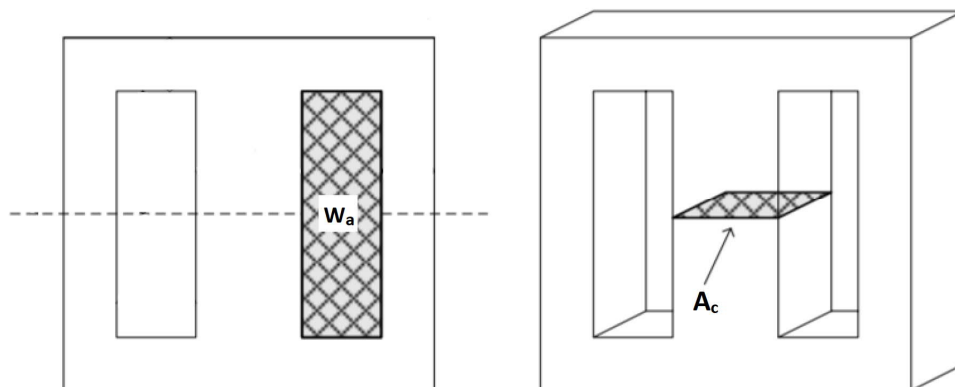


Figure 1. Cross-section and Window Area of EI-type Core [9]

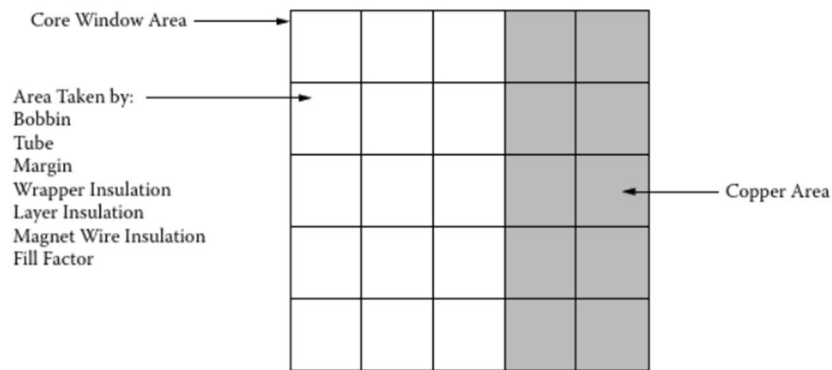


Figure 2. Window Utilisation Factor of 0.4 [10]

Toroidal Core

Selecting an RMS current density of $J_{rms} = 6 \text{ A/mm}^2$ and a peak flux density of $B_{max} = 1.2 \text{ T}$, some estimates were made for the active part weight of a toroid-core compensation inductor for various values of fault current using the area product method. The results are shown in Figure 2. A value of $K_u = 0.39$ for the window utilisation factor was calculated using information from winding wire data sheets [10] and selecting suitable winding and layer insulation [11].

From Figure 3, it can be seen that as the fault current increases, the active part weight of the compensation device also increases. For a fault current of 1.5 A, the active part weight is 20.5 kg and the iron core of the device has an outer radius of 102 mm and a depth of 94.8 mm. For fault currents from 1 A to 3 A the resistance of the devices ranges from 23.3 Ω to 42.1 Ω . Due to the small resistance value of the devices compared to the reactance it may be required to connect an earthing resistor in parallel with the device in order to allow for the detection of faults. Table 1 shows the properties of toroid type compensation devices for different values of fault current.

EI Core

The area product method was also used to estimate the active part weight of a compensation device built using standard-size EI laminations. For a fault current of 1.5 A, an EI-core device would have an active part weight of 25.2 kg with dimensions (360x305x87.5) mm. For any given value of fault current, the active part weight of a device built using EI laminations is always slightly heavier than for the toroid type device. This is because when using standard laminations, it is not possible to match exactly the calculated area product. The actual area product will be slightly larger than the calculated area product.

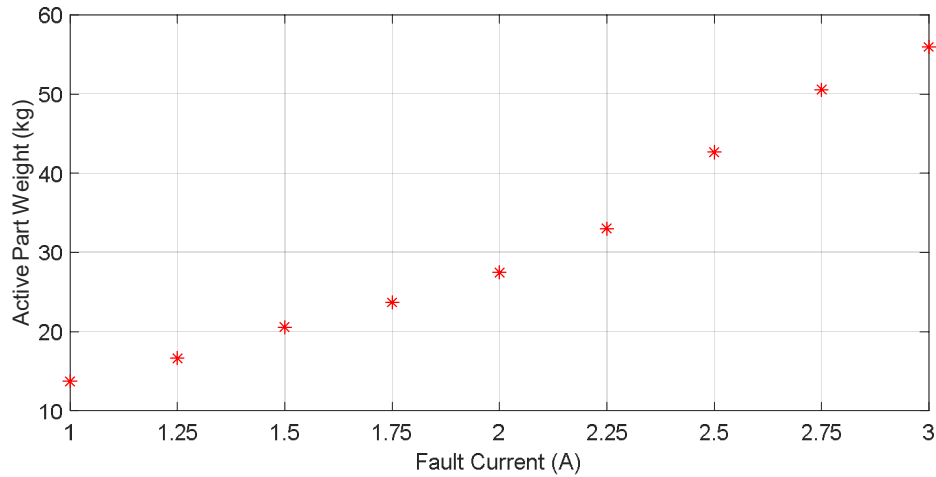


Figure 3. Graph of Active Part Weight for Increasing Values of Fault Current

Table 1. Properties of Toroid-Core Compensation Device for Different Values of Fault Current

Fault Current (A)	Active Part Weight (kg)	Resistance (Ω)	Inductance (H)	R/X Ratio (%)	Outer Radius (mm)
1	13.7	42.1	36.8	0.4	87.7
1.25	16.6	38.9	29.4	0.4	94.1
1.5	20.5	36.4	24.5	0.5	102.0
1.75	23.7	34.2	21.0	0.5	107.4
2	27.5	32.2	18.4	0.6	113.6
2.25	33.0	30.0	16.3	0.6	122.1
2.5	42.7	27.0	14.7	0.6	135.1
2.75	50.6	24.7	13.4	0.6	144.1
3	56.0	23.3	12.3	0.6	149.5

Zig-Zag Transformer

The active part weight of a zig-zag transformer for providing a neutral point in an ungrounded system can also be estimated using the area product method. Figure 4 shows the winding arrangement of the zig-zag transformer. Each phase has a zig winding and a zag winding, each wound in the opposite direction. From analysis of the flux paths in the core and using current loop analysis, the ratio between the line-to-line voltage and the limb flux can be found. The required area product is calculated based on the line-to-line voltage and the fault current. The area product is found from

$$W_a A_c = \frac{8}{9\sqrt{2}} \frac{U I_0}{\omega K_u B_{\max} J_{\text{rms}}} \quad (4)$$

The transformer size is estimated by scaling the dimensions of a standard three-phase EI core lamination with a constant so that the required area product is obtained. A square core cross section is assumed. The phase winding resistance R_{zn} depends on the maximum allowed current density J_{rms} . The zig-zag transformer resistance increases the R/X ratio of the whole compensation system from the values of Table 1. In order to limit the R/X ratio to a suitable level, the following condition must be fulfilled:

$$\frac{\frac{R_{zn} + R_0}{3} + R_0}{\omega L} \leq \frac{R}{X}, \quad (5)$$

where R_0 is the resistance of the inductor. This sets a maximum for the zig-zag transformer phase resistance R_{zn} . The current density J_{rms} is chosen so that this resistance limit is fulfilled. Thus the area product and the weight of the transformer increase when the R/X limit is reduced. Figure 5 and Table 2 give the approximate active part mass as a function of the fault current and the R/X ratio.

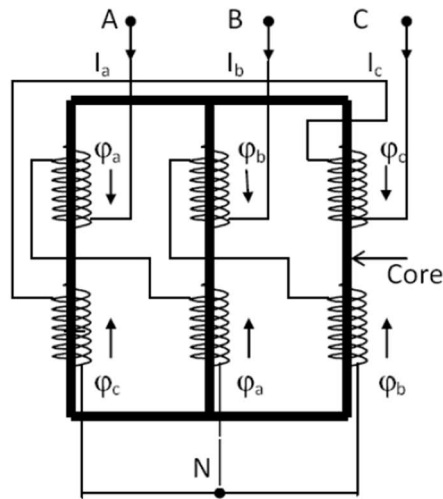


Figure 4. Zig-Zag Transformer Winding Arrangement [12]

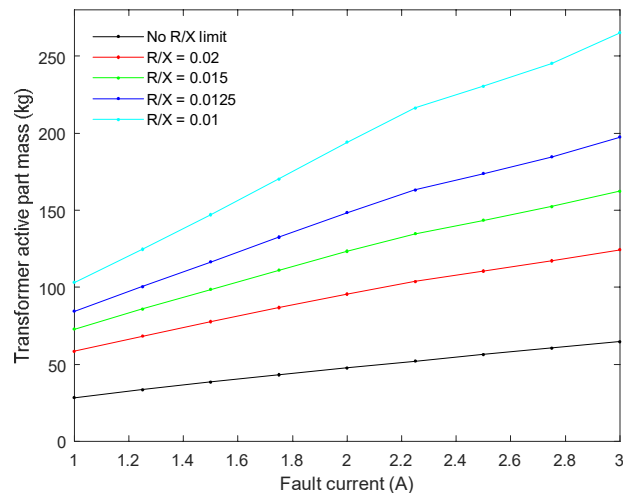


Figure 5. Graph of Active Part Mass of Zig-Zag Transformer for Different Fault Currents and R/X Ratios

Table 2. Some Numerical Values for the Masses Shown in Figure 5

R/X Limit (%)	Fault Current (A)	Active Part Mass (kg)
1.5	1	73
1.5	1.5	99
1.5	2	123
1.5	2.5	144
1.5	3	162
1.25	1	84
1.25	1.5	117
1.25	2	148
1.25	2.5	174
1.25	3	198
1	1	103
1	1.5	147
1	2	194
1	2.5	231
1	3	265