

Tommi-Eemil Siintoharju

**MAASULKUVIRRRAN HAJAUTETUN  
KOMPENSOINNIN HUOMIOIMINEN  
VERKOSTOLASKENNASSA, VERKON  
KÄYTÖSSÄ JA  
MAASULKUSUOJAUKSESSA**

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: TKT Ari Nikander  
5/2020

# TIIVISTELMÄ

Tommi-Eemil Siintoharju: Maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin huomioiminen verkostolaskennassa, verkon käytössä ja maasulkusuojauksessa

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma

5/2020

---

Maasulkuvirran kompensoinnin tarkoituksena on kumota kapasitiivisen maasulkuvirran vaikutus tuottamalla vastaavan suuruinen induktiivinen virta kompensointikelan avulla ja näin helpottaa sähköjakeluverkolle standardissa SFS 6001 määriteltyjen turvallisuusvaatimusten toteuttamista. Hajautettuun kompensointiin käytettävät kompensointikelat eli sammutuskuristimet ovat pääpiirteiltään vastaavia kuin perinteisempään keskitettyyn kompensointiin käytetyt, mutta ne ovat kompensointikyvyltään pienempiä. Niiden kompensoimaa maasulkuvirtaa ei myöskään yleensä säädelä jännitteisenä. Hajautetussa kompensoinnissa paikalliset kompensointikelat on tyypillisesti sijoitettu jakelumuuntamoille yleensä suoraan muuntajan tähtipisteen ja maan väliin, mikäli muuntajan kytkentä sen mahdollistaa. Joissain tapauksissa kelan yhteydessä on erillinen maadoitusmuuntaja.

Pitkien maakaapelilähtöjen yleistyessä verkon kapasitiiviset maasulkuvirrat kasvavat. Kaapelien suuremman nollavaiheen sarjaimpedanssin takia verkostolaskennassa huomioitavaksi tulee aiemmin merkityksettömän pieneksi oletettu maasulkuvirran resistiivinen komponentti. Hajautetun kompensoinnin avulla pyritään pienentämään verkossa kulkevaa kapasitiivista maasulkuvirtaa, minkä seurauksena myös resistiivinen virta jää pienemmäksi. Hajautetun kompensointiyksikön mallinnuksessa käytetään kelan ja lisävastuksen impedanssin lisäksi niiden yhteydessä olevan muuntajan impedanssia. Verkon käytössä hajautetulla kompensoinnilla tavoitellaan verkon kompensointiasteen helpompaa kontrollointia vikatilanteissa verkonosia erotettaessa tai kytkettäessä. Lisäksi pienemmällä paikallisilla kompensointiyksiköillä vältetään joitakin kohtuuttoman suurista keskitetyistä kompensointikeloista koituvia ongelmia.

Kaapeloinnin on arveltu aiheuttavan joitakin ongelmia yleisesti käytettyjen maasulkusuojausreiden toimintaan. Tutkimusten perusteella kaapeloinnin haitallisia vaikutuksia voidaan kuitenkin minimoida hyvin tehokkaasti hajautettua kompensointia hyödyntämällä, minkä takia maasulkusuojaus voitaisiin edelleen toteuttaa pitkälti aiemmin hyväksi havaituilla keinoilla. Maasulkutilanteen jälkivärähtelyt ovat kuitenkin aiheuttaneet terveiden lähtöjen virheellisiä verkosta irtoamisia, joita on pyritty ehkäisemään esimerkiksi värähtelyjä vaimentavien lisävastusten avulla. Tulevaisuudessa ongelmia voi aiheuttaa myös joissakin tutkimuksissa havaittu resistiivisten maasulkuvirtojen kasvu. Syyksi on esitetty muun muassa sitä, että hajautetut kompensointiyksiköt itsessään saattavat joissain tapauksissa tuottaa merkittäviä määriä resistiivistä maasulkuvirtaa.

Avainsanat: maasulku, maasulkuvirta, hajautettu, kompensointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. MAASULKU SAMMUTETUSSA VERKOSSA .....	3
2.1 Maasulkuvirta perinteisessä maasulkuanalyysissa .....	3
2.2 Maasulkuihin liittyvät vaatimukset .....	6
2.3 Kaapeloinnin aiheuttamat muutokset .....	8
3. MAASULKUVIRRAN KOMPENSOINTI.....	10
3.1 Keskitetty kompensointi .....	10
3.2 Hajautettu kompensointi.....	12
4. HAJAUTETUN KOMPENSOINNIN HUOMIOIMINEN VERKOSTOLASKENNASSA JA VERKON KÄYTÖSSÄ .....	15
4.1 Muutosten vaikutukset verkostolaskentaan .....	15
4.2 Muutosten vaikutukset verkon käyttöön.....	20
5. MAASULKUSUOJAUS .....	23
5.1 Maasulkusuojaus sammutetussa verkossa .....	23
5.2 Kaapeloinnin ja hajautetun kompensoinnin vaikutukset maasulkusuojaukseen .....	25
6. YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET .....	31

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	ampeeri
s	sekunti
V	voltti
$\Omega$	ohmi
VA	voltiampeeri
Hz	hertsi
R	resistanssi
C	kapasitanssi
L	induktanssi
$U_V, U_L$	vaihejännite
$I_f$	maasulkuvirta vikapaikassa
$I_r$	sammutuskuristimen kautta kulkeva maasulkuvirta
$U_0$	tähtipistejännite
$R_f$	vikaresistanssi
$I_{R0}$	resistiivinen vikavirta per vaihe
$U_{TP}$	kosketusjännite
$U_E$	maadoitusjännite
$R_0$	nollaresistanssi
$X_0$	nollareaktanssi
$X_N$	sammutuskuristimen reaktanssi
$R_N$	lisävastuksen resistanssi
$X_{0M}$	muuntajan nollareaktanssi
$B_0$	kaapelin maasuskeptanssi
$I_c$	verkon varausvirta maasulkutilanteessa
$f_r$	rinnakkaisresonanssiin resonanssitaajuus
HV	high voltage, suurjännite
MV	medium voltage, keskijännite
LV	low voltage, pienjännite
PSCAD	Power System Computer Aided Design, sähköverkon muutosilmiöiden simulointiohjelma

# 1. JOHDANTO

Suomeen 2000- ja 2010-luvun luvun alussa osuneista myrskyistä aiheutuneet suurhäiriöt sähköjakelussa saivat useat sähköjakeluyhtiöt suunnittelemaan sähkön toimitusvarmuuden parantamista muun muassa maakaapeloinnin avulla. Suomen nykyinen sähköjakeluverkko on rakennettu pääosin 1960- ja 1970-luvuilla, joten uudistamistarpeita on myös käyttöiän loppumisen takia. Lisäksi poliitikot reagoivat erityisesti 2010-luvun alun Tapani- ja Hannu-myrskyjen paikoin useiden viikkojen pituisiin sähkökatkoihin, minkä seurauksena sähkömarkkinalakia uudistettiin vuonna 2013.

Kiristyneiden toimitusvarmuusvaatimusten seurauksena suurin osa sähköjakeluyhtiöistä on käynnistänyt mittavat investoinnit maakaapelointiin myös haja-asutusalueilla. Investointien tavoitteena on toteuttaa lain vaatimukset asemakaava-alueella enintään 6 tunnin ja asemakaava-alueen ulkopuolella enintään 36 tunnin yhtäjaksoisista sähköjakelun keskeytyksistä [1]. Monissa tapauksissa maakaapelointi on kustannustehokkain vaihtoehto kriteerien täyttämiseksi ja voimassa oleva Energiaviraston regulaatiomalli sähköjakeluyhtiöille myös kannustaa maakaapelointiin. Sähköverkon rakenteen muuttaminen vanhasta ilmajohtoverkosta kaapeloiduksi verkoksi aiheuttaa monia uusia haasteita, joihin sähköjakeluverkon haltijoiden tulisi varautua ja reagoida sopivilla muutoksilla yllättävien kustannusten välttämiseksi. Haasteet esiintyvät erityisesti pitkillä kaapelilähdöillä, joiden kuormitus on pienehköä, ja niihin kuuluvat esimerkiksi jännitteen nousu johtolähdön varrella, loistehon tuotannon kasvaminen sekä maasulkuvirtojen kasvaminen. [2] [3]

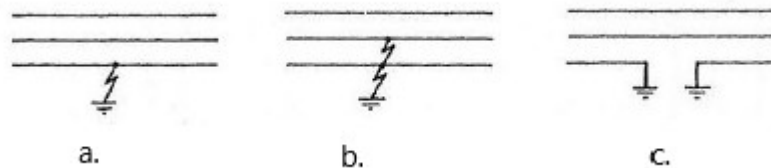
Tässä työssä tarkastellaan maasulkuilmiöitä ja niiden vaikutuksia keskijänniteverkossa. Tarkastelu on rajattu koskemaan pääosin sammutettua eli maasulkuvirran osalta kompensoitua verkkoa, sillä maasulkujen tutkiminen maasta erotetuissa tai suoraan maadoitetuissa verkoissa ei ole hajautetun kompensoinnin näkökulmasta relevanttia. Suomessa ei keskijänniteverkkoja juurikaan ole suoraan maadoitettuna ja maasta erotetut verkot ovat vähenemässä muun muassa maakaapeloinnin takia. Tarkastelussa keskitytään erityisesti hajautetun kompensoinnin vaikutuksiin perinteisen keskitetyn kompensoinnin sijaan. Hajautettu kompensointi on yleistynyt viime vuosina muun muassa haja-asutusalueiden pitkien mutta kuormitukseltaan vähäisten maakaapelilähtöjen yleistymisen takia ja työn tavoitteena onkin selvittää, millaisia

vaikutuksia hajautetulla kompensoinnilla on verkostolaskentaan, verkon käyttöön ja maasulkusuojaukseen. Tarkastelua suoritetaan osittain yritysesimerkin kautta, ja yritysesimerkkinä toimii Suomen toiseksi suurin sähköverkkoyhtiö Elenia Oy, joka pääosin haja-asutusalueen verkkoyhtiönä hyödyntää hajautettua kompensointia laajamittaisesti yhdessä keskitetyn kompensoinnin kanssa.

Työn alussa perehdytään maasulkuun ilmiönä sammutetussa verkossa ja selitetään tarkastelun kannalta olennaista maasulkuvirtaa käsitteenä. Luvussa 2 kerrotaan myös maasulkuihin liittyvistä vaatimuksista, jotka omalta osaltaan ohjaavat sähköverkkoyhtiöiden toimintaa maasulkutilanteisiin varautumiseksi sekä kuvaillaan lyhyesti kaapeloinnin aiheuttamia muutoksia sähköverkkojärjestelmiin maasulkujen näkökulmasta. Luvussa 3 kerrotaan maasulkuvirran kompensoinnin yleiset periaatteet sekä keskitetyn ja hajautetun kompensoinnin periaatteita ja ominaisuuksia keskittyen tämän työn kannalta olennaisempaan hajautettuun kompensointiin. Tämän jälkeen luvussa 4 kerrotaan, millaisia vaikutuksia hajautetulla kompensoinnilla on verkostolaskentaan sekä verkon käyttöön ja miten vaikutukset tulisi huomioida kyseisten aiheiden näkökulmasta. Luvussa 5 kerrotaan maasulkusuojauksen toimintaperiaatteet ja tarkastellaan sitä, millaisia vaikutuksia hajautetulla kompensoinnilla on suojauksen toimivuuteen ja asetteluihin. Viimeisenä on yhteenveto, jossa käsitellään lyhyesti työn keskeisimpiä havaintoja.

## 2. MAASULKU SAMMUTETUSSA VERKOSSA

Maasululla tarkoitetaan sähköverkossa vikatilannetta, jossa jännitteisellä osalla on yhteys maahan joko suoraan tai jonkin tai joidenkin komponenttien kautta. Maasulun aiheuttajana voi toimia esimerkiksi johtimen päälle kaatunut puu tai muu vierasesine, joka aiheuttaa maayhteyden, tai salamanisku, joka on yleisin maasulkujen aiheuttaja avojohdoilla. Lisäksi maasulkuja aiheuttavat eristeiden vaurioitumiset, jotka ovat yleisimpiä syytä maasulkuihin maakaapeleilla. [4] Kaapeliverkossa maasulku on yleisin vikatyyppe, ja kaapeliverkon yleistyessä yleistyvät myös sille tyypilliset katkeilevat maasulut [2]. Maasulku voi olla yksivaiheinen tai kaksivaiheinen, jolloin käytetään usein termiä maaosulku. Maasulku voi aiheutua myös johtimen katkeamisesta. Edellä mainitut maasulkutilanteet on esitetty kuvassa 1. Niiden lisäksi mahdollinen maasulkutilanne on vielä esimerkiksi niin sanottu kaksoismaasulku, jossa eri vaihejohtimiin aiheutuu kaksi eri maasulkua kahteen eri kohtaan verkkoa. [4]



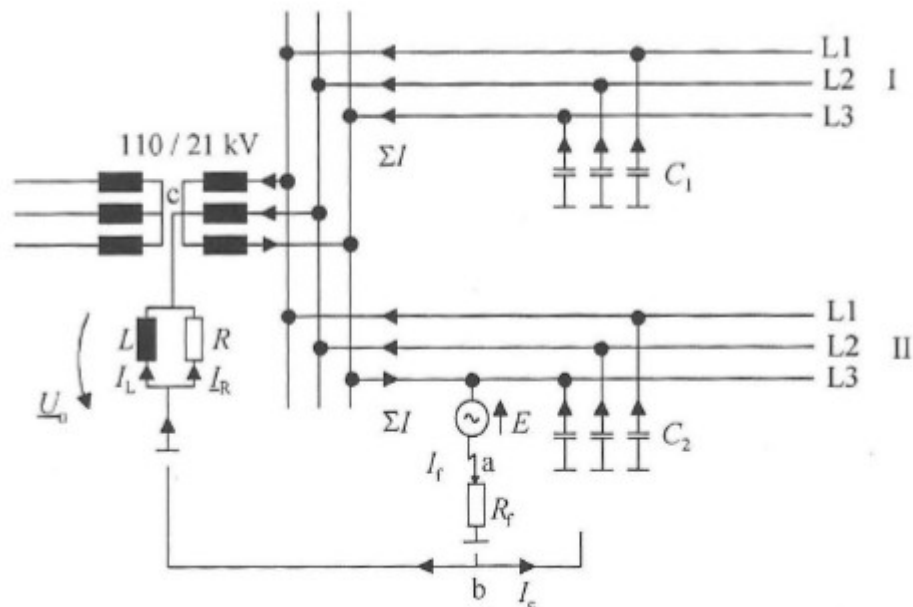
**Kuva 1.** Maasulkutilanteita: a. yksivaiheinen maasulku, b. maaosulku, c. johdinkatkeaman aiheuttama maasulku, muokattu lähteestä [4].

Erilaisilla vikatilanteilla on erilaisia vaikutuksia sähköverkon toimintaan, mikä tulee ottaa huomioon maasulkusuojauksen suunniteltaessa. Suojauksen kannalta oleellisin vikatapaus on yksivaiheinen maasulku, joka asettaa suojauksen reunaehdot maasulkuvirrasta ja sen kestosta riippuen. [5] Kaksoismaasulut puolestaan kehittyvät yleensä yksivaiheisen maasulun aiheuttaman epäsymmetrian takia ja ovat ongelmallisia, koska vikavirrat ovat suuria ja kulkevat maassa kohdissa, joissa johtavuus on suurin, esimerkiksi vesiputkissa, aiheuttaen helposti vaurioita [6].

### 2.1 Maasulkuvirta perinteisessä maasulkuanalyysissä

Maasulkuvirralla tarkoitetaan virtaa, joka kulkee johtimesta maahan maasulkuvian seurauksena. Sammutuksella eli kompensoinnilla pyritään rajoittamaan maasulkuvirran suuruutta ja loiventamaan vikapaikan palaavaa jännitettä vikatilanteissa muun muassa paremman turvallisuuden saavuttamiseksi. Suomessa maadoitusolosuhteet ovat melko

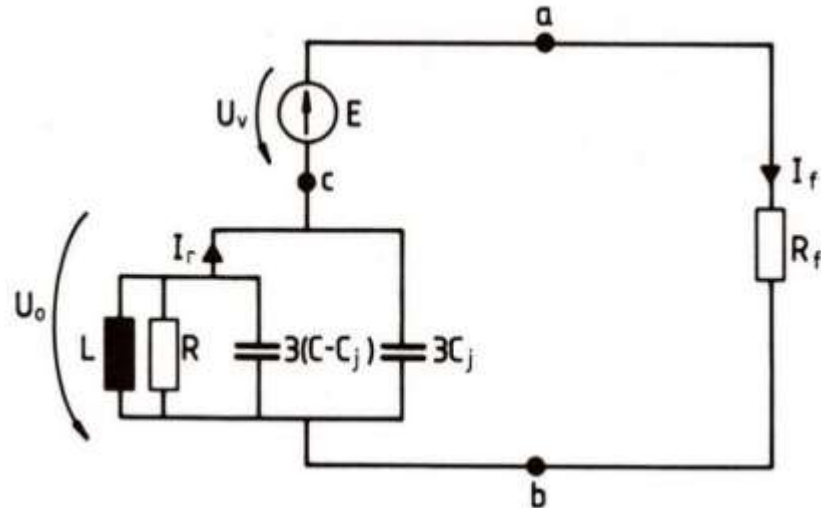
heikot maaperän huonon ominaisjohtavuuden takia, mikä puoltaa maasulkuvirran kompensointia tai maasta erottamista suoran maadoittamisen sijaan. Perinteisessä maasulkuanalyysissä sammutetussa verkossa verkon tähtipisteen ja maan väliin on kytketty reaktori, jonka tarkoituksena on kompensoida maasulkutilanteessa johtimien maakapasitanssien  $C$  aiheuttama kapasitiivinen maasulkuvirta  $I_c$  lähes yhtä suurella mutta vastakkaissuuntaisella induktiivisella virralla  $I_L$ . [6] Sammutuskuristimen induktanssin  $L$  rinnalle tähtipisteen ja maan väliin on yleensä kytketty myös resistanssiltaan  $R$  suuruinen lisäkuormitusvastus, jonka tarkoituksena on kasvattaa vikavirtaa maasulkusuojauksen selektiivisyyden toteuttamisen helpottamiseksi. [4] Perinteisen maasulkuanalyysin mukainen periaatekuva yksivaiheisesta maasulusta on esitetty kuvassa 2. Perinteisessä maasulkuanalyysissä sammutus on toteutettu keskitetyn kompensoinnin avulla.



**Kuva 2.** Sammutetussa verkossa tapahtuva yksivaiheinen maasulku [6].

Kuvassa 2 vikaresistanssi kuvataan merkinnällä  $R_f$ , vikavirta merkinnällä  $I_f$  ja tähtipistejännite merkinnällä  $U_0$ . Käytetyllä analyysimallilla maasulkuvirran pätökomponentin suuruuteen vaikuttavia seikkoja ovat sammutuskuristin, lisäkuormitusvastus, verkon johtimien resistanssit sekä verkon resistiiviset vuotovirrat. Piste c edustaa verkon tähtipistettä. Kuvassa 2 esitetystä maasulkutilanteesta voidaan muodostaa sijaiskytkentä, joka on esitetty kuvassa 3. [6]





**Kuva 3.** Maasulkupiirin sijaiskytkentä sammutetussa verkossa [6].

Kuvassa 3 merkintä  $C$  tarkoittaa galvaanisesti yhteen kytketyn verkon maakapasitanssia ja  $C_j$  viallisen lähdön maakapasitanssia. Molemmat suureet ovat vaihesuureita. Sijaiskytkennän mukaan maasulkuvirralle  $I_f$  saadaan kaava

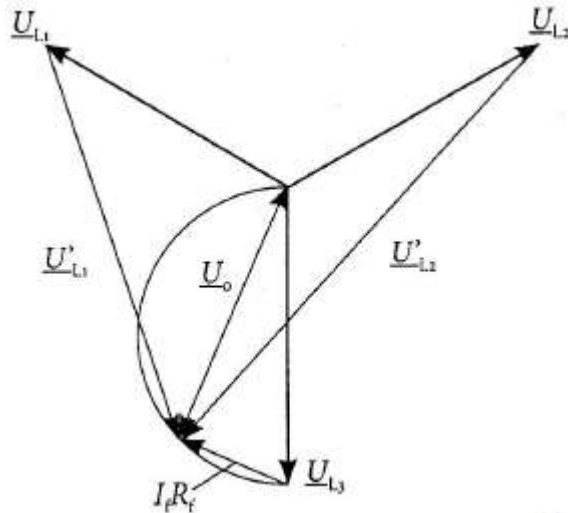
$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{1 + jR\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}}, \quad (2.1)$$

jossa  $U_v$  tarkoittaa verkon vaihejännitettä ja  $\omega L$  kompensointikelan reaktanssia. [6]

Tähtipiste- eli nollajännitteelle voidaan vastaavasti samasta kuvan 3 sijaiskytkennästä muodostaa lauseke

$$U_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} U_v. \quad (2.2)$$

Mikäli vikaresistanssi  $R_f$  saa arvon  $0 \Omega$ , vaihejännite  $U_L$  viallisessa vaiheessa laskee arvoon  $0 \text{ V}$  ja tähtipistejännite  $U_0$  nousee vaihejännitteen suuruiseksi. Terveiden vaiheiden jännitteet nousevat verkon pääjännitteen suuruiseksi. Vikaresistanssin kasvaessa tähtipistejännitteen  $U_0$  käyttäytymistä on havainnollistettu osoittimien avulla kuvassa 4. Kuvassa maasulkuvika tapahtuu vaiheessa L3 vikaresistanssin  $R_f$  kautta. Jännitteet  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$  ja  $U_{L3}$  kuvaavat vaihejännitteitä ennen vikaa ja  $U'_{L1}$  sekä  $U'_{L2}$  terveiden vaiheiden jännitteitä vian jälkeen. Osoitin  $I_f R_f$  kertoo viallisen vaiheen jännitteen suuruuden vikatilanteessa. [6]



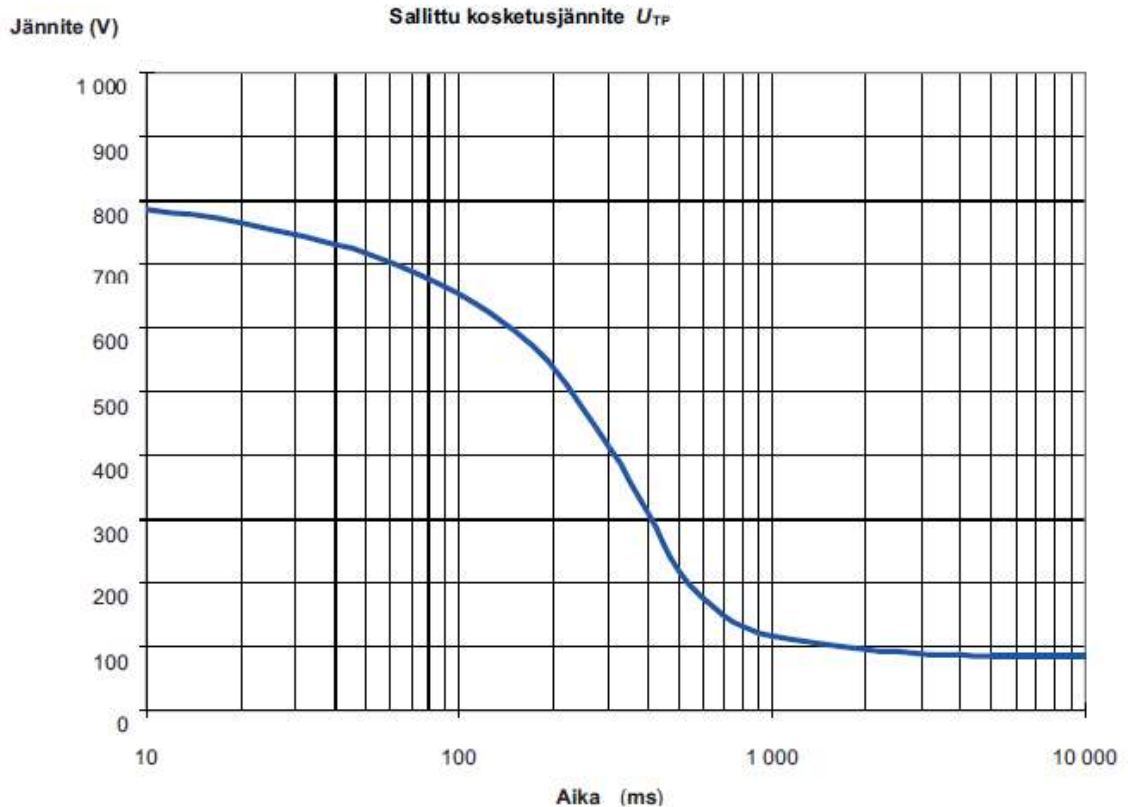
**Kuva 4.** Maasulun aikaiset jännitteet [6].

Edellä esitelty perinteiseen maasulkuanalyysiin pohjautuva laskentamalli ei kuitenkaan ole kaikilta perusoletuksiltaan enää voimassa pitkillä maakaapelilähdöillä, sillä niillä sarjanollaimpedanssia ei voida olettaa merkityksettömän pieneksi toisin kuin lyhyillä kaapelilähdöillä ja avojohdoilla vaan se tulee huomioida laskennassa. [2] Hajautettua kompensointia tarkasteltaessa kyseistä mallia tuleekin muokata, mitä käsitellään tässä työssä myöhemmin luvussa 4.

## 2.2 Maasulkuihin liittyvät vaatimukset

Maasulkutilanteisiin liittyy joitakin viranomaisten määrittelemiä vaatimuksia, joita sähköverkon haltijan tulee noudattaa. Vaatimusten periaatteena on, että maasuluista aiheutuvat vikavirrat ja -jännitteet eivät saa aiheuttaa vaaraa turvallisuudelle. Suomessa keskeisenä vaatimuksena on standardissa SFS 6001 määritellyt kosketusjänniterajat, joiden tavoitteena on estää ihmiselle tai eläimelle vaarallisten jännitteiden koskettamisen mahdollisuus. Kosketusjänniterajat riippuvat maasulkuvirran suuruudesta ja kestosta. Raja-arvot on määritely siten, että niillä pyritään välttämään sähköiskutilanteessa hengenvaarallinen sydänkammioväriä. [7]

Vian tapahtuessa maasulkuvirta kulkee aina suuruudeltaan vaihtelevan maadoitusresistanssin kautta. Sen yli vaikuttavaa jännitettä kutsutaan maadoitusjännitteeksi  $U_E$ , joka tarkoittaa vikapaikan ja äärettömän kaukana olevan todellisen maapotentiaalin välistä jännitettä. Kosketusjännitteellä  $U_{TP}$  tarkoitetaan kosketeltavissa olevaa osaa maadoitusjännitteestä ja sille SFS 6001 -standardissa määritellyt raja-arvot on esitetty kuvassa 5 vikavirran kestoajan funktiona. [6]



**Kuva 5.** Sallittu kosketusjännite vikavirran kestoajan funktiona [7].

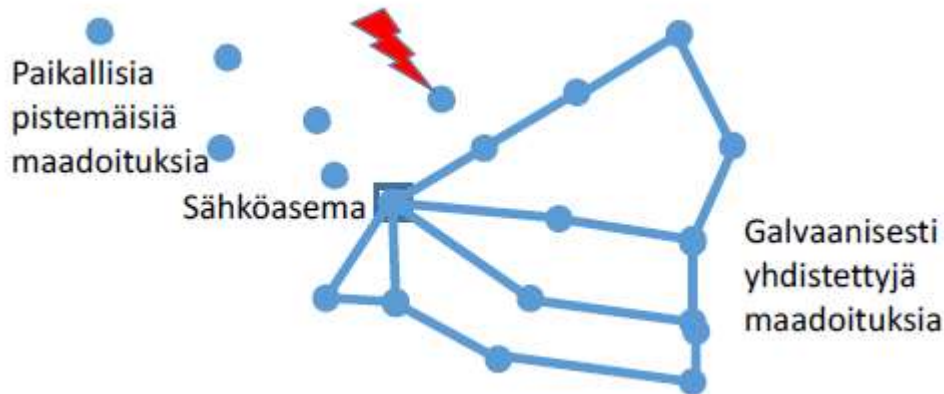
Vikavirran kestoajan ollessa merkittävästi pidempi kuin 10 s sallittuna kosketusjännitteenä  $U_{TP}$  voidaan käyttää arvoa 80 V. Maadoitusjännite ei saa olla suurempi kuin kuvan 5 kestoajasta riippuva kosketusjännitearvo kaksinkertaisena, ellei kyseessä oleva asennus ole laajan maadoitusjärjestelmän osa, kuten on yleensä esimerkiksi kaupunkialueen kaapeliverkoissa. Kosketusjännitevaatimuksen voidaan katsoa esimerkiksi huonoissa maadoitusolosuhteissa toteutuvan myös SFS 6001 -standardissa mainittuja erityistoimenpiteitä, muun muassa potentiaalinohtausta, toteuttamalla. [7] Käytännössä kosketusjännitevaatimuksen saavuttamiseksi on siis lyhennettävä maasulkusuojauksen toiminta-aikaa, parannettava maadoituksia, suoritettava edellä mainittuja erityistoimenpiteitä tai pienennettävä maasulkuvirtaa joko jakamalla verkkoa pienempiin osiin lisäämällä päämuuntajia tai sammutuskuristimen avulla toteutettavalla maasulkuvirran kompensoinnilla [6]. Tässä työssä päähuomio keskitetään kompensointiin.

Maasulkusuojauksen kannalta keskeinen sähköturvallisuusmääräys ohjeistaa, että suojauksen on toimittava vioissa, joiden vikaresistanssi on alle  $500 \Omega$  [7]. Kyseinen vaatimus tulee huomioida suojauksen asetteluja suunniteltaessa, jotta voidaan varmistua suojauksen riittävästä herkkyydestä nolaa suuremman vikaresistanssin vioissa. Maasulkusuojauksia käsitellään tarkemmin tässä työssä luvussa 5.

## 2.3 Kaapeloinnin aiheuttamat muutokset

Kaapelien ilmajohtoihin verrattuna erilaisen rakenteen ja asennustavan takia niiden sähköisissä ominaisuuksissa on eroja. Johtimen induktanssi on suoraan verrannollinen vaihejohtimien väliseen etäisyyteen. Kaapelin tiiviimmän rakenteen ja siitä aiheutuvan pienemmän johtimien välisen etäisyyden takia kaapelin induktanssi on vastaavaa avojohtoa pienempi. Kapasitanssin osalta tilanne on päinvastoin eli kaapelin kapasitanssi on suurempi kuin vastaavassa käyttötarkoituksessa olevan ilmajohtimen. [8] Tyypillisesti keskijänniteverkoissa käytettyjen kaapelien kapasitanssi on monikymmenkertainen saman käyttötarkoituksen ilmajohtoihin verrattuna [9]. Maasulkutilanteessa suurempi kapasitiivinen kytkeytyminen maahan aiheuttaa suurempaa reaktiivisen tehon tuotantoa ja sitä kautta maasulkuvirtojen ja siihen liittyvien resistiivisten häviöiden kasvua [10]. Kuten luvussa 2.1 mainittiin, osittain tai kokonaan kaapeloiduilla pitkillä johtolähdöillä sarjanollaimpedanssin läpi kulkevaa vikavirran pätökomponenttia ei voida olettaa merkityksettömän pieneksi, koska se on huomattavasti suurempi suuremman kapasitiivisen varausvirran takia, vaan se tulee huomioida maasulkutilanteita tarkastellessa. [2] Tätä kaapeloinnin aiheuttamaa muutosta tarkastellaan tarkemmin luvussa 4.

Kaapelointi aiheuttaa myös muutoksia maadoitusjärjestelmien rakenteeseen. Ilmajohtoverkoissa maadoitukset ovat yleensä yksittäisissä pisteissä erillismaadoituksia, joiden maadoitusimpedanssit vaihtelevat laajasti muun muassa maaperän mukaan. Kaapeliverkoissa maadoitukset yhdistyvät kaapelien rakenteen, esimerkiksi erillisten maadoitusjohtimien ja kosketussuojien, takia. Näiden galvaanisten yhteyksien takia eri maadoitusten välille syntyy ketjuuntuneita, laajempia maadoitusjärjestelmiä. [11] Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 6.



**Kuva 6.** Kaapeloinnin aiheuttamat muutokset maadoitusjärjestelmissä [2].

Kuvassa 6 vasemmalla on avojohtoverkolle tyypillinen maadoitusrakenne ja oikeassa reunassa kaapeloidulle verkolle tyypillinen maadoitusrakenne. Laajojen maadoitusjärjestelmien takia potentiaalinen nousu maasulkutilanteissa jää pienemmäksi yksittäisissä maadoitusjärjestelmän pisteissä sen jakautuessa laajemmalle, jolloin maadoitusjännitevaatimukset on helpompi toteuttaa. Kyseessä ei kuitenkaan ole haja-asutusalueilla luvussa 2.2 mainittu laaja maadoitusjärjestelmä, sillä järjestelmästä ei yleensä muodostu verkkomaista, useiden reittien kautta yhdistyvää rakennetta toisin kuin taajama-alueilla. Verkkoon jää myös yleensä ainakin kaapeloinnin ollessa kesken ilmajohto-osuuksia, jotka tulee erityisesti huomioida, sillä juuri niissä kohdissa tapahtuvissa vioissa maadoitusjännitteet nousevat korkeimmiksi. [2]

Kaapeloinnin aiheuttamaksi muutokseksi voidaan ajatella myös se, että aiemmin maasulkuvirran kompensointia on käytetty ennen kaikkea valokaarivikojen tehokkaamman poistamisen ja sitä kautta saavutettavan pienemmän jälleenkytkentöjen ja lyhyiden keskeytysten määrän takia. Kaapeloinnin lisääntymisen myötä kompensointia käytetään kuitenkin yhä enenevässä määrin maadoitusjännitteiden ja sitä kautta kosketusjännitteiden hallintaan, sillä se on usein ainut toimiva menetelmä niiden kontrollointiin maasulkuvirtojen kasvaessa suuriksi kaapelien suurten maakapasitanssien takia. [12]

### 3. MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINTI

Maasulkuvirran kompensoinnin eli sammutuksen peruseriaatteena on kytkeä maan ja verkon tähtipisteen väliin induktanssi, joka kumoaa verkon aikaansaaman kapasitiivisen maasulkuvirran. Sammutuksella saavutetaan joitakin etuja verrattuna suoraan maadoitettuihin tai maasta erotettuihin verkkoihin. Luvussa 2.2 käsiteltyjen sähköturvallisuusmääräysten helpomman toteuttamisen lisäksi etuina ovat pienivirtaisemmat valokaarimaasulut, jotka sammuvat helpommin itsestään. Se vähentää vikojen poistamiseen tarvittavien jälleenkytkentöjen määrää, mikä vähentää katkaisijoiden huoltotarvetta ja asiakkaille haitallisia lyhyitä katkoja. Maasulut eivät myöskään kehity oikosuluiksi niin helposti vikavirran ollessa pienempi. Sammutuksen haittapuolena voidaan pitää kompensointilaitteistoista aiheutuvia kustannuksia sekä normaalitilanteessa verkon yleensä suurempia nolajännitteitä, jotka aiheutuvat verkon epäsymmetriasta. [4] [6]

Kompensoinnin aste voidaan säätää Petersenin kelan induktanssin avulla ja se määritellään

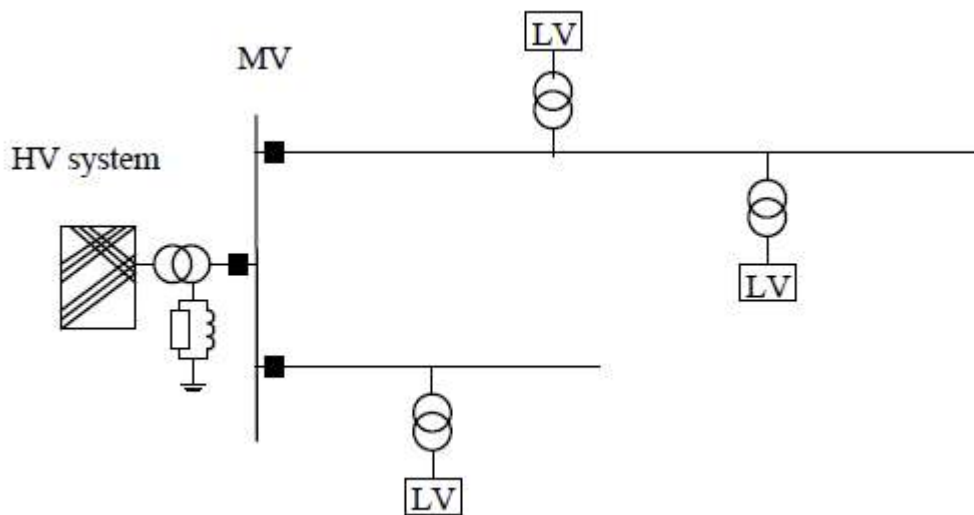
$$K = \frac{I_L}{I_C}, \quad (3.1)$$

jossa  $I_L$  tarkoittaa induktiivista virtaa ja  $I_C$  kapasitiivista virtaa. Kompensointiasteen ollessa 1 maasulkuvirta on systeemissä täysin kompensoitu. Sen ollessa yli 1 järjestelmä on ylikompensoitu ja alle 1 alikompensoitu. Yleensä kompensointiasteessa pyritään lähelle arvoa 1 eli 100 %, mutta ei kuitenkaan tasan siihen, sillä silloin ilmenee muun muassa haitallisia resonansseja. Suomessa keskijännitejärjestelmät ovat pääasiassa hieman alikompensoituja, tyypillisesti noin 5-10 % vinoviritettyjä, mutta yhtä hyvin voitaisiin käyttää ylikompensointia, kuten esimerkiksi Ruotsissa tehdään. [10] [2]

#### 3.1 Keskitetty kompensointi

Perinteisempää keskitettyä maasulkuvirran kompensointia on ollut käytössä jo pidempään ja se on useissa tapauksissa edelleen riittävää lyhyillä kaapelilähdöillä esimerkiksi taajamissa sekä avojohtolähdöillä niiden pienemmän kapasitanssin takia. Keskitetty kompensointi voidaan toteuttaa asentamalla Petersenin kela 110/20 kV - sähköasemilla päämuuntajan toisiopuolen tähtipisteen ja maan väliin. [13] Usein tähtipiste ei kuitenkaan ole suoraan käytettävissä päämuuntajan kytkennän takia, vaan kompensointikelan kytkemiseksi tarvitaan maadoitusmuuntaja, jonka avulla saadaan verkon tähtipiste kytkentäkäyttöön. Suomessa päämuuntaja on yleensä YNd11-

kytkentäinen ja maadoitusmuuntaja kuuluu yleensä ZN-kytkentäryhmään. [14] Tässä työssä esimerkkiyrityksenä toimivan Elenia Oy:n verkossa tähtipistettä ei ole käytettävissä missään, joten kaikilla kompensointia sisältävillä asemilla käytetään maadoitusmuuntajia [15]. Yleensä keskitetyssä kompensoinnissa käytettävän sammutuskuristimen reaktanssin on tarkoitus muuttua verkon tilanteen mukaisesti, mikä voidaan toteuttaa säätömenetelmillä automatiikkaa hyödyntäen [6]. Keskitetyssä kompensoinnissa käytettävät kelat ovat kompensointikyvyltään tyypillisesti välillä 100-250 A [10]. Elenialla uudet sähköasemille asennettavat kelat ovat pääasiassa 250 A keloja, jotka varustetaan virtainjektioilaitteistolla kompensointiasteen säätöä varten. Vanhoja, kompensointikyvyltään pienempiä keloja Eleniassa on siirretty muun muassa kevytsähköasemille ja kytkinasemille. [12] Periaatekuva pelkästään keskitettyä kompensointia sisältävästä sähköverkosta on esitetty kuvassa 7.



**Kuva 7.** Järjestelmä, jossa keskitetty kompensointi sähköasemalla [13].

Maasulkutilanteessa verkon tuottama varausvirta siirtyy nolaimpedanssin läpi aiheuttaen resistiivistä vikavirtaa, joka on samanvaiheinen nolajännitteen kanssa. Avojohtoilla ja lyhyillä kaapelilähdöillä varausvirta on melko pieni, mutta pitkillä kaapeleilla se kasvaa niin suureksi, että se aiheuttaa myös merkittävän jäännösvikavirran pätökomponentin. Petersenin kelalla voidaan kompensoida vain reaktiivista maasulkuvirtaa mutta ei sen resistiivistä komponenttia eli pätövirtaa, minkä vuoksi pelkkä keskitetty kompensointi ei riitä maasulkuvirran riittävään kompensointiin pitkillä kaapelilähdöillä vaan tulee siirtyä osittain hajautettuun kompensointiin halutun vikavirran saavuttamiseksi. [2] Myös Guldbland ja Samuelsson [13] sekä KAPELI-projektin [16] tutkimukset päätyivät samanlaisiin tuloksiin hajautetun kompensoinnin tarpeellisuudesta.

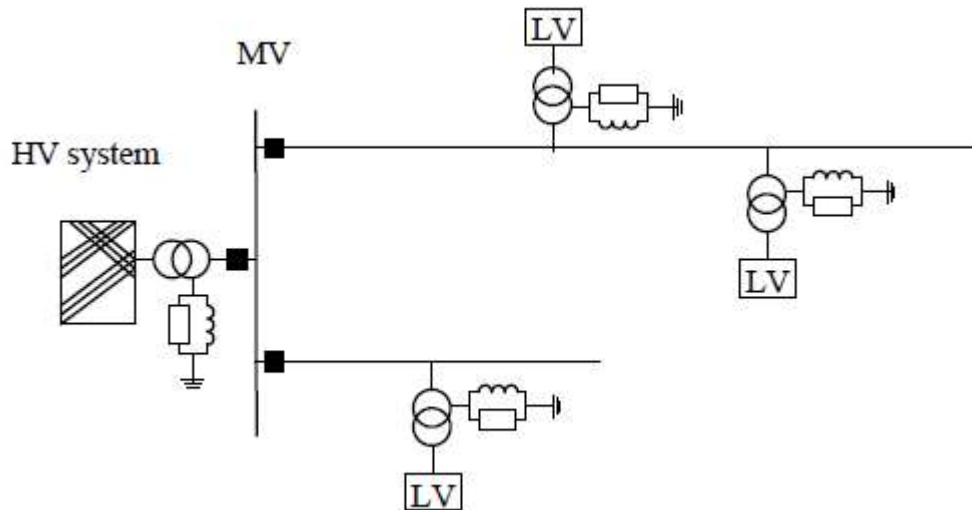
### 3.2 Hajautettu kompensointi

Maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin tavoitteena on erityisesti maadoitusjännitteen hallinta turvallisuusvaatimusten täyttämiseksi. Valokaarien sammuttamiseksi se ei useinkaan ole riittävää käytettävien kelojen pienemmän kompensointikyvyn takia. [6] Koska sähköasemille keskitetty kompensointi ei ole riittävää pitkillä kaapelilähdöillä, kompensointiin käytetään paikallisia yksiköitä lähtöjen varrella. Hajautettuun kompensointiin käytettävät kelat ovat yleensä kompensointikyvyltään huomattavasti pienempiä kuin keskitettyyn kompensointiin käytettävät, tyypillisesti noin 5-15 A. Toimintaperiaate on samanlainen, mutta paikalliset kompensointiyksiköt ovat yleensä kiinteitä eli niiden kompensoimaa maasulkuvirtaa ei säädellä jännitteisenä. [10] Kompensointikelan asennus vaatii esiin tuodun tähtipisteen muuntajan 20 kV -puolella ja paikalliset kompensointiyksiköt sijoitetaan yleensä jakelumuuntamoille 20 kV -puolen tähtipisteen ja maan väliin. Kustannusten hillitsemiseksi yksiköt kannattaisi sijoittaa jo olemassa oleville muuntoasemille. [13] Kompensointikelalla varustetun uuden muuntajan hinta on noin 2,5-kertainen verrattuna vastaavaan muuntajan ilman kompensointia [17].

Kompensoinnin kannalta optimaalisin on ZN-kytkentäryhmään kuuluva käämitys, jonka keskeisenä hyötynä on pienet nollavaiheen häviöt. Keskijännitepuolen käämien symmetrian takia nollavaiheen virta ei myöskään pääse missään tilanteessa pienjännitepuolelle. Suomessa hajautetut kompensointiyksiköt onkin yleensä kytketty ZN(d)yn- tai ZNzn-kytkentäisten jakelumuuntajien yhteyteen [10]. Havaintojen mukaan kompensointi muilla käämityksillä varustetuilla muuntajilla, esimerkiksi Ruotsissa aiemmin yleisesti käytetyllä YNzn-käämityksellä, ei ole yhtä tehokasta kuin sen pitäisi olla laskelmien mukaan. Syyksi esitetään resistiivisiä häviöitä muuntajissa erityisesti nollavaiheessa kulkevan suuremman virran takia. [18]

Pelkästään hajautettua kompensointia sisältäviä järjestelmiä ei juurikaan ole vaan yleensä hyödynnetään yhdistelmää keskitetystä ja hajautetusta kompensoinnista. Tavoitteena on usein, että keskitetyn kompensointiyksikön avulla säädellään kompensointiastetta ja kapasitiivinen maasulkuvirta kompensoidaan pääasiassa paikallisilla yksiköillä. [10] Periaatekuva tällaisesta järjestelmästä on esitetty kuvassa 8.

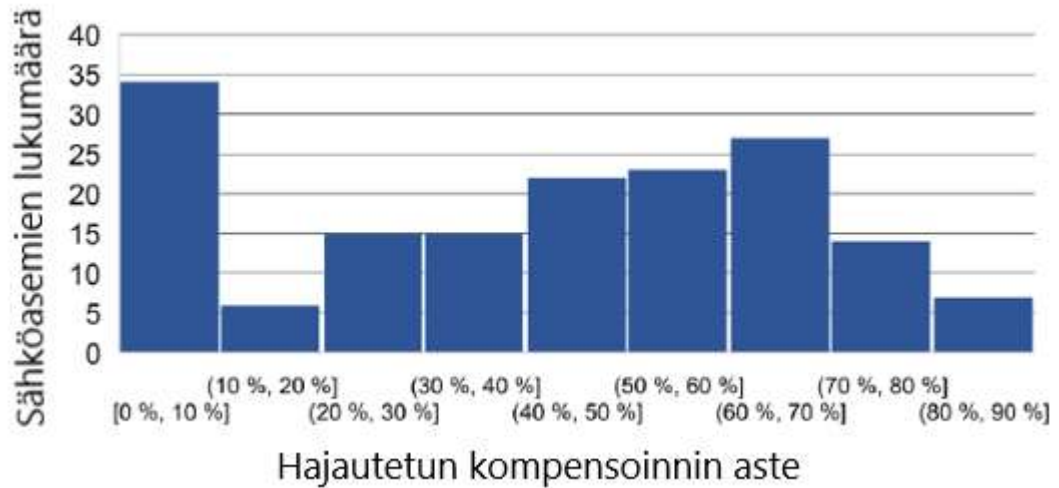




**Kuva 8.** Järjestelmä, jossa yhdistetty keskitetty ja hajautettu kompensointi [13].

Hajautettujen kompensointiyksiköiden sijoittamisessa johtolähtöjen varrelle tulee huomioida erottimien sijainnit, jotta osia verkosta erotettaessa verkon kompensointiaste pysyisi vakiona [13]. Sekä Suomessa että Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa teknis-taloudellisesti optimaalisimmaksi välimatkaksi hajautettujen kompensointiyksiköiden välillä todettiin 10-20 km riippuen toki verkon muusta rakenteesta, muun muassa edellä mainitusta erottimien sijainnista. [19] [13]

Myös Elenia hyödyntää sähköverkoissaan yhdistelmää keskitetystä ja hajautetusta kompensoinnista, koska se on vuodesta 2009 lähtien rakentanut uutta keskijänniteverkkoa vain kaapeloituna, mikä aiheuttaa maasulkuvirtojen merkittävää kasvua ja sitä kautta tarvetta myös hajautetulle kompensoinnille [10]. Pelkästään hajautettua kompensointia sisältäviä järjestelmiä ei Elenialla ole. Hajautetun kompensoinnin yhteydessä olevat laitteistot ovat pienjännitejakelun tehokapasiteetiltaan joko 200 kVA tai 50 kVA, joiden molempien yhteydessä käytetään kompensointikyvyltään 5-15 A keloja. Tällä hetkellä hajautetun kompensoinnin yksiköitä on Elenian verkossa noin 1600. [15] Tavoitteena Elenian verkon kehittämisessä on kompensoida suurin osa maasulkuvirrasta hajautetusti ja huomioida yksiköiden sijoittelussa erityisesti kaukokäytettävien erottimien sijainti [12]. Maasulkuvirtojen lisäykset eri verkkoalueilla ovat hyvin erilaisia reaktiivisen komponentin osalta, joten Elenia on ottanut periaatteeksi, että kaikki kompensointiasemat ovat 5 A verran alikompensoituja. Hajautetun kompensoinnin aste vaihtelee kuitenkin paljon kohteen mukaan. [10] Kuvassa 9 on esitetty asemien määrä niiden hajautetun kompensoinnin asteen mukaan Elenian verkossa vuonna 2019.



**Kuva 9.** *Kompensointiasemien määrä hajautetun kompensoinnin asteen funktiona Elenian verkossa vuonna 2019, muokattu lähteestä [10].*

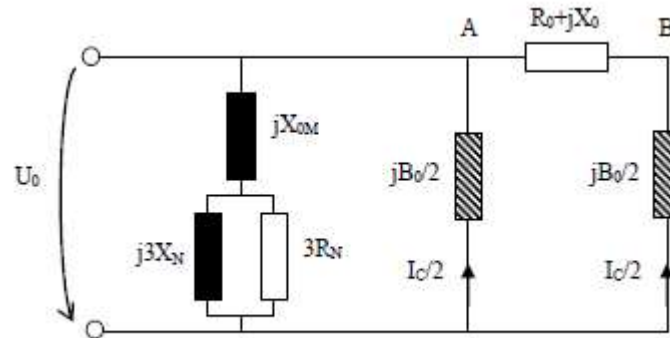
Verkon tuottaman maasulkuvirran ollessa suuri myös hajautetun kompensoinnin aste on korkea, sillä keskitetyllä kompensoinnilla pystytään sammuttamaan Elenian käytännöllä suurimmillaan 250 A maasulkuvirtaa. Kuvassa 9 prosenttiluvut kuvaavat, kuinka suuri osa kokonaismaasulkuvirrasta kullakin sähköasemalla kompensoidaan hajautetusti. Mikäli arvo on 0 %, kyseisellä asemalla on vain keskitetty kompensointikela. [10]

## 4. HAJAUTETUN KOMPENSOINNIN HUOMIOIMINEN VERKOSTOLASKENNASSA JA VERKON KÄYTÖSSÄ

Tässä luvussa tarkastellaan kaapeloinnin ja hajautetun kompensoinnin aiheuttamia muutoksia sähköverkoissa ensin verkostolaskennan ja laskentaan käytettävien mallien kannalta. Kuten luvussa 2.1 todettiin, siinä esitellyn perinteisen maasulkuanalyysin kaikki perusoletukset ovat voimassa ilmajohtoverkoissa sekä kaupunkien kaapeliverkoissa. Haja-asutusalueiden pitkillä kaapelilähdöillä kyseiset perusoletukset eivät kuitenkaan ole enää voimassa kaikilta osin. Alaluvun 4.1 alussa käsitellään kaapeleiden tarkempaa mallintamista, vaikka se ei suoraan itsessään liitykään hajautettuun kompensointiin. Se kuitenkin vaikuttaa olennaisesti hajautetun kompensoinnin huomioimiseen verkostolaskennassa. Alaluvussa 4.2 muutoksia verkon käytön näkökulmasta erityisesti maasulkutilanteisiin keskittyen.

### 4.1 Muutosten vaikutukset verkostolaskentaan

Kaupunkiverkoissa ja ilmajohtoverkoissa johtolähtöjä kuvataan  $\pi$ -sijaiskytkennällä, joka muodostuu kahdesta suuresta maakapasitanssista ja pienestä sarjanollaimpedanssista, joka voidaan olettaa näiden verkkotyypin kohdalla maasulkuvirran kannalta merkityksettömäksi. Haja-asutusalueen kaapeliverkon pidemmillä lähdöillä lähtöä voidaan kuvata lyhyiden johto-osien sarjakytkentänä. Näitä johto-osia puolestaan kuvataan vastaavalla  $\pi$ -sijaiskytkennällä kuin lyhyitäkin kaapelilähtöjä. Merkittävänä erona on se, että sarjanollaimpedanssi kasvaa sarjakytkennässä suuremmaksi eikä sarjanollaimpendanssia voida olettaa maasulkuvirran kannalta enää merkityksettömäksi. Maakapasitanssien edustaman impedanssin suhteellinen vaikutus kokonismaasulkuvirtaan puolestaan pienenee. [2] Yleisen maasulkuteorian mukaisesti maasulkutilanne voidaan mallintaa myötä-, vasta- ja nollaverkkona. Tässä työssä käsitellään vain lyhyesti nollaverkon mallintamista, sillä se on ainut, johon hajautetulla kompensoinnilla on merkittävää vaikutusta. Tarkemmin yleistä maasulkuteoriaa on esitelty esimerkiksi lähteessä [2]. Kuvassa 10 on esitetty yksinkertaistettu nollaverkon  $\pi$ -sijaiskytkentä kompensoidussa kaapeliverkossa.



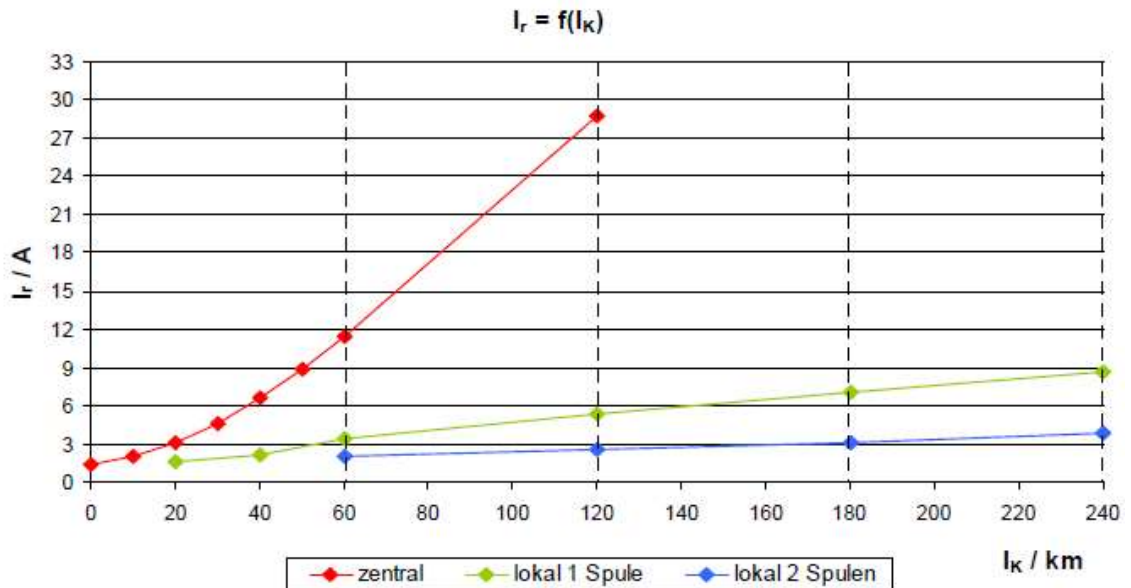
**Kuva 10.** Yksinkertaistettu nollaverkon  $\pi$ -sijaiskytkentä kaapeliverkossa [2].

Kuvassa 10 keskeisiä suuria maasulkuvirran pätökomponentin muodostumisen kannalta ovat nolaresistanssi  $R_0$  ja nolareaktanssi  $X_0$ , jotka muodostavat nolaimpedanssin. Kompensointikelan reaktanssia merkitään  $X_N$ , lisävastuksen resistanssia  $R_N$  ja päämuuntajan nolareaktanssia  $X_{OM}$ . Nollajännitettä merkitään  $U_0$  ja kaapelin maasuskeptanssia  $B_0$ . Pitkällä kaapelilla keskeistä on varausvirran  $I_C/2$  aiheuttama jännitehäviö nolaimpedanssin  $R_0 + jX_0$  yli vaikuttaessaan. Jäännösmaasulkuvirran kannalta olennaisinta on nolaresistanssissa  $R_0$  tapahtuva jännitehäviö, sillä sen aiheuttamaa maasulkuvirtaa ei pystytä kompensoimaan sammutuskuristimilla toisin kuin nolareaktanssista  $X_0$  aiheutuvaa. [2]

Kaapeleiden sarjanolaimpedansseja ei yleensä ole saatavilla taulukoituna toisin kuin niiden kapasitansseja, mikä aiheuttaa haasteita maasulkuvirran pätökomponentin laskennalliseen määrittämiseen. Varausvirtaan  $I_C$  vaikuttaa kaapelityypin lisäksi tarkasteltavan verkon rakenne, esimerkiksi runkojohdon haarat ja niiden sijainti, minkä takia myös lähdön rakenteella on vaikutusta pätökomponenttiin. Kaapelin nolaresistanssiin puolestaan vaikuttavat kaapelityypin ohella maadoitukset. [2] Myös KAPELI-projektin [16] tulosten perusteella todettiin, että erillinen maadoitusjohdin kaapelissa parantaa merkittävästi maadoitusta. Seurauksena kaapelin nolaresistanssi jää pienemmäksi, minkä takia maasulkuvirtaan ei muodostu niin suurta pätökomponenttia kuin ilman erillistä maadoitusjohdinta.

Kun kaapelipituus kasvaa, kompensointi pelkästään sähköasemalle keskitetyllä kompensointiyksiköllä ei riitä kompensoimaan kaapelin aiheuttamaa maasulkuvirtaa. Seurauksena voidaan havaita merkittävää kasvua jäännösmaasulkuvirroissa. KAPELI-projektin [16] tarkoituksena oli kehittää kevyt kaapelijärjestelmä, joka olisi kustannustehokas ja riittävän kestävä haja-asutusalueiden tarpeisiin. Projektin yhteydessä tehtyjen simulointien avulla havaittiin jäännösmaasulkuvirran merkittävää kasvua pidemmällä AHXAMK-W 20 kV-kaapeleilla, joiden poikkipinta oli melko pieni

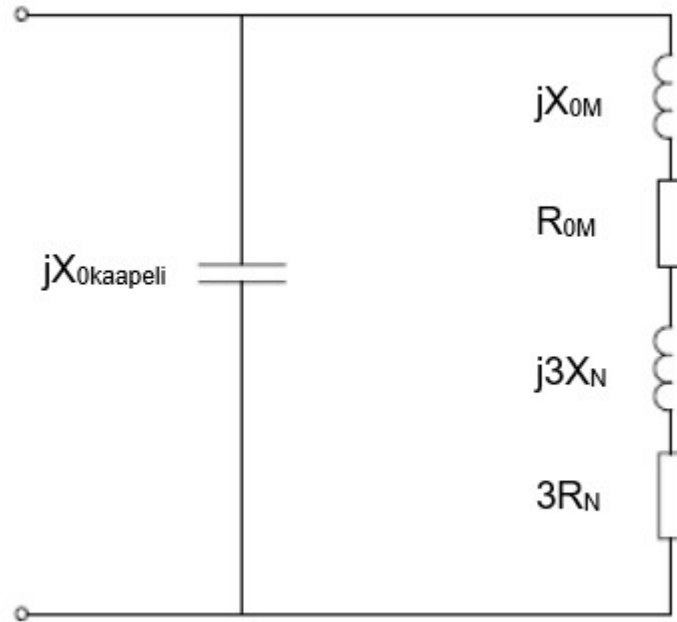
mahdollisimman kevyen kaapelijärjestelmän tarpeiden takia. Simuloinnin tulokset on esitetty kuvassa 11.



**Kuva 11.** Maasulun jäännösvirta kaapelipituuden funktiona [16].

Kuvassa 11 punaisella värillä on merkitty lähtöä, jossa on pelkästään keskitetty kompensointiyksikkö, vihreällä lähtöä, jossa on 1 hajautettua kompensointiyksikkö, ja sinisellä lähtöä, jossa on 2 hajautettua kompensointiyksikköä [16]. Kuvasta 11 voidaan havaita, että hajautetun kompensointiyksikön sijoittaminen kaapelilähdön varrelle pienentää oleellisesti maasulun jäännösvirtaa. Pienennysvaikutus on vielä jonkin verran suurempi, kun kompensointiin käytetään 2 hajautettua kelaa. Tulokset puoltavat vahvasti hajautetun kompensoinnin hyödyntämistä pitkillä kaapelilähdöillä.

Brännman on julkaisussaan ”Analysmodell för Impedansjordat System med Lokal Kompensering” [20] esitellyt mallin, jonka avulla verkostolaskentaa voidaan suorittaa hajautettua kompensointia sisältävälle impedanssin kautta maadoitetulle järjestelmälle. Malli on lähinnä tarkennusta jo aiemmin tässä luvussa esitellyn nollaverkon sijaiskytkentään. Myös se perustuu symmetrisiin komponentteihin, ja sitä on hyödyntänyt esimerkiksi Nokelainen tutkimuksessaan maakaapeloinnin vaikutuksista käytöntuki- ja verkkotietojärjestelmiin [21]. Kyseisessä mallissa huomioimatta jätetään vain ne impedanssit, joiden vaikutus kokonaisimpedanssiin on alle 1 %. Hajautettua kompensointia sisältävän lähdön nollaverkon malli on muuten samanlainen kuin kuvassa 10 esitetty, mutta reaktansseista  $X_{OM}$  ja  $X_N$  sekä resistanssista  $R_N$  koostuva kytkentäosuus on korvattu kuvassa 12 esitetyllä kytkennällä.



**Kuva 12.** Hajautetun kompensointiyksikön sijaiskytkentä, muokattu lähteestä [20].

Kuvassa 12  $X_{0M}$  on maadoitusmuuntajan nolhareaktanssi,  $R_{0M}$  maadoitusmuuntajan resistanssi,  $X_N$  kompensointikelan nolhareaktanssi ja  $R_N$  kompensointikelan sekä lisävastuksen nolaresistanssi. Kompensointiyksikön kytkentöihin käytettävän kaapelin kapasitiivista nolhareaktanssia kuvataan merkinnällä  $X_{0kaapeli}$ . Mikäli lähdöllä käytetään useita paikallisia kompensointiyksiköitä, ne voidaan esitellyssä menetelmässä mallintaa kuvan 12 mukaisten mallien rinnankytkentöinä. Hajautetun kompensointiyksikön jälkeisen kaapeliosuuden sarjanollaimpedanssi on jätetty huomioimatta tässä menetelmässä kuten kuvasta 12 voidaan havaita, sillä sen vaikutus on tarkoitus minimoida kompensoinnilla. Tässä mallissa siis oletetaan systeemin olevan täysin kompensoitu, mikä ei yleensä todellisuudessa toteudu, vaan jäljelle jää jäännösmaasulkuvirtaa.

Simuloinneissa maasulkuvirran hajautettua kompensointia voidaan mallintaa samaan tapaan eri komponenttien yhdistelmänä. Se on toistaiseksi edelleen maailman mittakaavassa melko harvinainen konsepti, minkä takia valmiita kokonaismalleja ei useinkaan ole. Laskennan perustana käytetään usein verkkotietojärjestelmistä saatavia tietoja verkon rakenteesta. Esimerkiksi yleisesti sähköverkon muutosilmiöiden simulointiin käytettävässä PSCAD-ohjelmassa ei löydy valmista mallia hajautetusta kompensointiyksiköstä, vaan laskentaa varten sellainen tulee muodostaa ohjelmasta valmiina löytyvien kelojen, vastusten ja muuntajien avulla. Muiden muassa Vehmasvaara on haja-asutusalueen kaapeliverkon kompensointistrategioita tutkiessaan mallintanut Petersenin keloja induktanssin ja Zn-kytkentäisen muuntajan yhdistelmänä.

Muuntaja oletettiin simuloinnissa ideaaliseksi, koska sen tarkoitus oli vain muodostaa virtuaalinen tähtipiste, johon sammutuskuristin voidaan kytkeä. Sammutuskuristimien induktanssien arvot asetettiin kullekin yksikölle erikseen tavoitteena kompensoida 15 A maasulkuvirtaa jokaisella kompensointiyksiköllä. Uudentyyppisiä shunttireaktoreita Vehmasvaara puolestaan on mallintanut kaikkien vaiheiden ja tähtipisteen välisillä kelan ja vastuksen sarjakytkennöillä, joista muodostui Yn-kytkentä. Selvityksen tuloksena kuitenkin todettiin, että hajautetut shunttireaktorit eivät ole kustannustehokkaita, vaan maasulkuvirran hajautettuun kompensointiin kannattaa käyttää vain Petersenin keloja. [22] Myös Tukiainen on kaapeliverkkoon varastoitunutta energiaa tutkiessaan käyttänyt hajautetun kompensoinnin mallintamiseen samanlaista PSCAD-mallia kuin Vehmasvaara Petersenin kelojen kohdalla on käyttänyt [8]. Samanlaista mallinnusta on käytetty myös Kiinassa toteutetussa simulointitutkimuksessa, jossa selvitettiin hajautetun kompensointiyksikön lisäämisen vaikutuksia kaupunkiverkossa [23].

Tutkimuksessaan [21] Nokelainen toteaa, että verkostolaskentaohjelmissa tehdään joitain yksinkertaistuksia, jotka eivät kaapeloinnin ja hajautetun kompensoinnin lisääntyessä välttämättä enää toimi, vaan laskennan tulokset saattavat vääristyä. Esimerkiksi tutkitun käytöntukijärjestelmän virheellisiä oletuksia tutkimuksessa nimetään 3, jotka tulisi korjata oikeampien laskentatulosten saavuttamiseksi. Sammutuskuristimet eivät ole todellisuudessa ideaaleja ja häviöttömiä, maadoitusmuuntajat tulee huomioida laskennassa ja nollaverkon sijaiskytkentään vaikuttaa todellisuudessa useampi komponentti kuin mitä järjestelmät huomioivat.

Elenian tapauksessa hajautetun kompensoinnin käyttöönotossa haasteena on ollut verkkotietojärjestelmän dokumentaation ajantasaisuus, josta ei aina voida olla täysin varmoja muun muassa eri tietojärjestelmien tietojen yhdistelyn takia. Nykyään verkkotietojärjestelmä kuitenkin huomioi hajautettujen kompensointiyksiköiden kompensoiman maasulkuvirran onnistuneesti. Sen sijaan kaapeloinnin aiheuttamaa maasulkuvirran resistiivistä komponenttia Elenian tällä hetkellä käyttämät verkkotietojärjestelmät eivät kuitenkaan huomioi verkostolaskennassa kovinkaan hyvin. [15] Samanlaista ongelmaa on ilmennyt muissakin verkkotietojärjestelmissä, joten vaikka kaapelien sarjanollaimpedanssien arvoja olisi helposti saatavilla, niitä ei pystyttäisi nykyisillä verkostolaskentaohjelmilla hyödyntämään optimaalisesti [10] [21]. Alaluvussa 2.2 mainittuihin maadoitusvaatimuksiin resistiivinen komponentti kuitenkin luonnollisesti vaikuttaa, joten se täytyy huomioida muilla keinoilla maadoituksia suunniteltaessa.

## 4.2 Muutosten vaikutukset verkon käyttöön

Kuten jo alaluvussa 3.2 mainittiin, hajautetun kompensoinnin sijoittelussa olisi hyvä huomioida verkon rakenne, erityisesti katkaisijoiden ja erottimien sijainnit. Niiden sijainti on oleellista, koska vikatapauksissa verkkoa voidaan rajata niiden määräämillä tavoilla, jolloin myös hajautetut kompensointiyksiköt joko liittyvät toiseen verkonosaan tai irtoavat kokonaan verkosta suoritettavan toimenpiteen mukaisesti. [18] Verkon kompensointiasteen tulisi kuitenkin pysyä hallittuna, joten verkon suunnittelussa olisi oleellista miettiä myös mahdollisia vaihtoehtoisia verkkorakenteita vikatilanteita ajatellen. Verkko kannattaisikin suunnitella sellaiseksi, että vikatilanteissa verkkoa käytettäessä ei tarvitsisi enää miettiä esimerkiksi verkonosan erottamisen vaikutuksia kompensointiasteeseen, vaan se olisi hoidettu jo verkon suunnitteluvaiheessa kompensointiyksiköiden sopivalla sijoittelulla ja mitoituksella.

Myös Elenian tapauksessa keskeinen syy hajautetun kompensoinnin käyttöönotolle on ollut juuri tavoite hajauttaa kompensointikapasiteettia erityisesti keskeytystilanteita ajatellen. Esimerkiksi keskitetyn kompensointilaitteiston vikaantuessa sähköaseman lähdöt joudutaan korvaamaan muita asemilta. Tällaisessa tilanteessa hajautettua kompensointia hyödyntämällä suurin osa maasulkuvirrasta saadaan kompensoitua lähtöjen varrella ja keskitetyn kompensointikelan kapasiteetti riittää siihen, että verkko voidaan pitää edelleen hallitusti kompensoituna ja näin ollen jatkaa käyttöä ilman haitallisia keskeytyksiä asiakkaille. Toisaalta hyötynä on myös keskitettyjen kompensointilaitteistojen pysyminen maltillisen kokoisina, mikä vähentää niistä aiheutuvia hankintakustannuksia. Vikatilanteissa maltillisen kokoisten keskitettyjen kompensointikelojen kapasiteetti on mahdollista korvata muualta verkosta esimerkiksi varayhteyksien avulla. Mikäli kompensointikapasiteetit kasvaisivat hyvin suuriksi, näin ei olisi mahdollista enää tehdä kustannusten kannalta järkevästi. Kolmas keskeinen syy on maasulkuvirran kompensointi siellä, missä sen tuotto tapahtuu eli johtolähtöjen varsilla. [15] Pitkillä kaapelilähdöillä pystytään näin pienentämään resistiivistä vikavirtaa, joka muuten aiheuttaisi alaluvussa 4.1 käsiteltyjä ongelmia.

Elenian käytännöillä hajautettu kompensointi on pyritty verkon suunnittelussa mitoittamaan kaukokäytettävillä erotinväleillä tuotetun kapasitiivisen maasulkuvirran mukaisesti. Tavoitteena on saada kullekin kaukokäyttövälille hajautetun kompensoinnin asteeksi noin 90 %, jolloin vikatilanteissa pystytään muuttamaan verkon kytkentää ilman, että hajautetun kompensoinnin määrää tarvitsisi erikseen huomioida vikaa rajatessa. Tarkoituksena on välttää lähtöjen ylikompensoituminen ja toisaalta taas varmistaa riittävä kompensointikapasiteetti tehokkaan sammutuksen varmistamiseksi. Toinen verkon käytön kannalta huomioitava asia Elenian tapauksessa on se, että induktiivisen



virran säätö toteutetaan väliottokytkimellä. Seurauksena on se, että kun hajautetun kompensointikelan induktiivista virtaa halutaan säätää, joudutaan pienjännitejakeluun aiheuttamaan keskeytys. Samasta syystä kompensointikeloja ei voi myöskään säätää kaukokäytöllä, vaan säätö on tehtävä paikan päällä, mikä hidastaa säätämistä ja toisaalta aiheuttaa kustannuksia muun muassa työvoiman muodossa. [15]

Alaluvussa 2.1 esitetty keskijännitepuolen epäsymmetria ei siirry jakelumuuntajien toisipuolelle vaan jännitteet 0,4 kV:n verkossa ovat normaalit jakelumuuntajien ensiökäämien kolmiokytkennän takia. Tämän takia verkon käyttö maasulun aikana olisi periaatteessa mahdollista, sillä asiakasjännitteet ovat kunnossa ja vikavirta riittävän pieni, jotta se ei vahingoita laitteita. Yleensä käyttöä maasulun aikana rajoittavat kuitenkin luvun 2.2 kosketusjännitevaatimukset, joita ei pystytä täyttämään verkon ollessa jännitteinen maasulkuutilanteen aikana. [6] Kuitenkin luvussa 2.3 kerrotun maadoitusten ketjuuntumisen ansiosta pelkästään kaapeleista koostuvan verkon maadoitusimpedanssit voitaisiin usein saada niin pieniksi, että jopa verkon normaali käyttäminen olisi mahdollista maasulun aikana [16]. Monin paikoin keskijänniteverkot koostuvat kuitenkin ainakin toistaiseksi sekä kaapeli- että avojohto-osuuksista eli ovat niin sanottuja sekaverkkoja. Sekaverkoissa ilmenee alaluvussa 2.3 mainittu avojohtojen yksittäismaadoitusten aiheuttama ongelma eli potentiaalinen nousu maasulkuvian seurauksena on suurinta näissä yksittäismaadoituksissa. Sen takia kaapeliosuuden aiheuttama maasulkuvirran lisäys on kompensoitava hajautetusti maadoitusjännitevaatimusten täyttämiseksi eikä yleensä tällöinkään keskijänniteverkon normaalia käyttöä ole tarkoituksenmukaista jatkaa vikatilanteessa.

Standardissa SFS 6001 ohjeistetaan lähtökohtaisesti kytkemään kaikki maasulut pois automaattisesti. Poikkeustilanteessa käyttöä saa jatkaa ja kytkeä vian käsin pois vasta myöhemmin tiettyjen ehtojen täytyessä. Ehtojen mukaan valokaarimaasulun todennäköisyyden tulee verkossa olla pieni ja maadoitusjännite saa olla enintään yhtä suuri kuin sallittu pitkäaikainen maadoitusjännite, suurimmillaan kuitenkin vain 150 V. Lisäksi maasulun tulee aiheuttaa heti ilmaantuessaan hälytys, joka saatetaan verkon käyttötoimintaa valvovan tahon tietoon, jonka on aloitettava vian selvittäminen välittömästi. Tällöinkin käyttöä maasulkuutilanteessa saa jatkaa yleensä vain enintään 2 tuntia, jos voidaan olla varmoja, että käyttö ei aiheuta vaaroja tai merkittäviä häiriöitä esimerkiksi ihmisille tai omaisuudelle. Jakelumuuntamoilla sijaitsevien maasulkujen tapauksessa käyttöä ei kuitenkaan saa jatkaa lainkaan ja kaksoismaasulkuutilanteessa maasulut on aina kytkettävä pois. [7]

Hajautetun kompensoinnin avulla maasulkuvirrat saadaan pienemmiksi, minkä seurauksena viat sammuvat todennäköisemmin itsellään [16]. Vikojen poistamiseen ei

näin ollen tarvitse käyttää niin paljon resursseja. Pienemmän vikavirran ansiosta maasulku ei myöskään jätä valokaarta palamaan niin usein. Valokaarien poistamiseksi jouduttaisiin tekemään pika- tai aikajälleenkytkentöjä, jotka aiheuttavat monien asiakaslaitteiden kannalta haitallisia lyhyitä keskeytyksiä sähkönjakeluun. Hajautettua kompensointia hyödyntämällä pystytään siis hieman vähentämään niitä ja niistä asiakkaille aiheutuvia haittoja. Tämän edun merkitys kuitenkin vähenee koko ajan kaapelien ja niissä esiintyvien katkeilevien maasulkujen yleistyessä.

## 5. MAASULKUSUOJAUS

Maasulkuvian poistumiseen sähköverkossa on olemassa lähinnä kaksi eri tapaa. Joko vika sammuu itsestään tai maasulkusuojaus laukeaa ja erottaa viallisen lähdön verkosta. [2] Maasulkusuojauksen tavoitteena on toteuttaa luvun 2.2 kosketusjännitevaatimukset ja sitä kautta välttää ihmisille ja eläimille vaaralliset jännitteet. Toisaalta tavoitteena on jonkin verran myös suojata sähkölaitteistoja vaurioitumiselta liian suurten virtojen tai muiden haitallisten ilmiöiden varalta. Käytännön sähköverkoissa maasulkusuojaus toteutetaan yleensä maasulkureleillä ja suojauksen asettelussa joudutaan huomioimaan muutamia, osittain keskenään ristiriitaisia asioita.

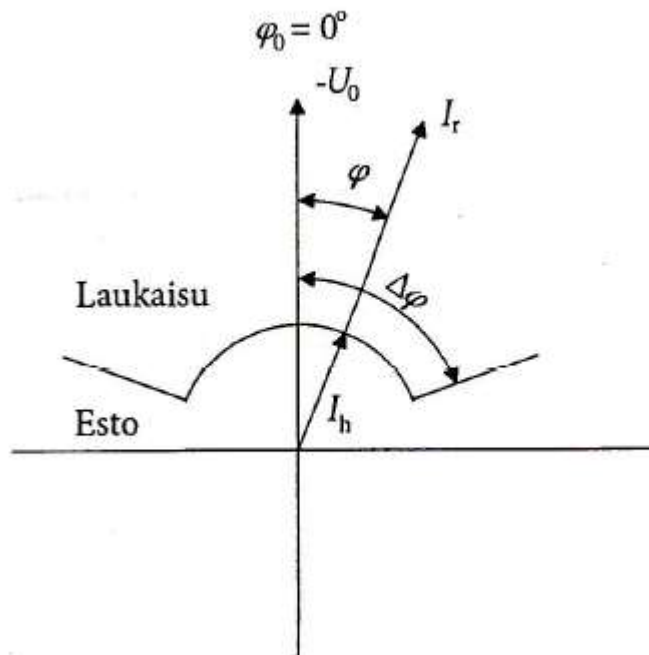
Suojauksen toimivuuden kannalta kiinnostavia ovat pienimmät verkossa esiintyvät maasulkuvirrat ja tähtipistejännitteet. Maadoitusjännitevaatimusten kannalta oleellisia puolestaan ovat suurin maasulkuvirta, joka esiintyy verkon ollessa suuri ja vikaresistanssin pieni, sekä maasulun mahdollisimman lyhyt kesto aika. Toisaalta maasulun paikantamisen ja mahdollisen maasulun itsestään sammumisen kannalta maasulun kestoajan tulisi olla mahdollisimman pitkä. [6] Maasulkusuojauksessa olennaisia ominaisuuksia ovatkin toimintaherkkyys ja -nopeus, selektiivisyys, aukottomuus sekä automatiikka. Toimintaherkkyydellä ja -nopeudella tarkoitetaan verkon kaikkien maasulkujen havaitsemista sekä toimintaa sopivalla nopeudella suojattavan kohteen mukaan. Selektiivisyyden tavoitteena on, että vain vikaantunut osa erotetaan muusta järjestelmästä. Aukottomuudella tarkoitetaan sitä, että suojaamattomia kohteita ei saa olla ja suojauksen tulee toimia tarvittaessa myös poikkeustilanteissa. Automatiikalla pyritään mahdollisimman nopeaan toimintaan sekä ohimenevien vikojen vähentämiseen. [5]

### 5.1 Maasulkusuojaus sammutetussa verkossa

Sammutetussa verkossa maasulkusuojaus toteutetaan tyypillisesti samankaltaisilla suuntareleillä kuin maasta erotetussa verkossa. Suojaus perustuu vaihevirtojen epäsymmetriaan ja tähtipistejännitteen kohoamiseen maasulun aikana. Vian suunnan tunnistavan suunnatun maasulkusuojauksen ideana on, että rele suorittaa vioittuneen johto-osan poiskytkennän lähimpänä vikapaikkaa sijaitsevan katkaisijan avulla. Vikavirran mittausta suoritetaan yleensä johtolähdön alkupäässä virtamuuntajien summakytkennällä tai nykyään usein myös erillisellä kaapelivirtamuuntajalla, mikäli johtolähdön alkupää on kaapeloitu, kuten nykyään on useimmissa tapauksissa. Kaapelivirtamuuntajan mittausta perustuu kaapelin vaihevirtojen osoitinsumman

mittaamiseen ja siinä tulee huolehtia, ettei kaapelin metallivaipassa kulkeva vikavirta aiheuta vääristymiä mittaukseen. Tähtipistejännitteen mittaus puolestaan toteutetaan yleensä vaihejännitteisiin kytkettyjen jännitemuuntajien toisiokäämien avokytkennästä. [6]

Maasta erotetussa verkossa vikavirran  $I_r$  ja tähtipistejännitteen  $U_0$  välinen kulma on  $90^\circ$ , jolloin maasulkusuojaukseen käytettävän suojausfunktion peruskulmaksi eli karakteristiseksi kulmaksi voidaan valita joko  $90^\circ$ , jolloin kyseessä on kapasitiivinen kytkentä tai  $0^\circ$ , jolloin kyseessä on resistiivinen kytkentä. Sammutetussa verkossa kompensointikelan kautta kulkeva loisvirta aiheuttaa häiriötä kapasitiiviseen kytkentään, joten sammutetussa verkossa suojaukseen on mahdollista käyttää vain resistiivistä kytkentää hyödyntäviä suojausfunktioita. Niissä toiminta siis perustuu nollavirran pätökomponentin mittaamiseen. Sen suuruuden säätelyyn voidaan käyttää kompensointikelan rinnalle asennettua lisävastusta, jotta voidaan varmistaa suojauksen havahtumisen kannalta riittävä vikavirran pätökomponentti. [24] Sammutetun verkon suojausfunktion toimintaperiaate on esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13.** Sammutetun verkon vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi [6].

Merkintä  $I_h$  tarkoittaa releen havahtumisvirtaa. Suojausfunktion karakteristista kulmaa kuvataan merkinnällä  $\varphi_0$  ja se on tässä tapauksessa  $0^\circ$ . Nollavirran  $I_r$  ja negatiivisena otetun tähtipistejännitteen  $U_0$  välistä kulmaa kuvataan merkinnällä  $\varphi$  ja sen vaihteluväliä, jolla rele laukee, merkinnällä  $\pm\Delta\varphi$ . Sammutetussa verkossa suurin sallittu toleranssi  $\Delta\varphi$  on yleensä suuri, jopa  $80^\circ$ , koska vian aikaiset kulmaerot vaihtelevat suuresti vikatapauksen mukaan muun muassa resonanssitilanteen läheisyyden takia. [6]

## 5.2 Kaapeloinnin ja hajautetun kompensoinnin vaikutukset maasulkusuojaukseen

Guldbrand ja Samuelsson päätyivät tutkimuksessaan [18] tuloksiin, jotka ennustivat vaikeuksia havaita maasulkuvikoja pitkillä kaapelilähdöillä aiemmin yleisesti käytetyn maasulkusuojaustekniikan avulla. Syynä ovat erilaiset muutokset jäännösmaasulkuvirrassa ja tähtipistejännitteessä kuin mihin suojausreleet on suunniteltu reagoimaan. Pitkillä kaapeleilla suurien virtojen siirtäminen aiheuttaa resistiivisiä nollavaiheen häviöitä, jotka yhdessä vikaimpedanssin kanssa vaimentavat resonanssia, johon kapasitiivisen maasulkuvirran kompensointi perustuu. Resonanssin virituskäyrästä eli tähtipistejännitteestä  $U_0$  kelan susceptanssin funktiona tulee matalampi ja leveämpi, jolloin tähtipistejännite  $U_0$  ei maasulkutilanteessa saavuta yhtä suuria arvoja kuin lyhyillä kaapeleilla tai ilmajohdoilla. Tällöin tähtipistejännite  $U_0$  ja maasulkuvirran pätökomponentti  $I_{R0}$  eivät välttämättä saavuta releen laukeamiseksi vaadittavia arvoja, vaikka niin tulisi tapahtua. Suunnatun jäännösylivirtareleen tulee olla herkemäksi säädetty kuin tähtipistejännitereleen, jotta suojauksen selektiivisyys toteutuu. Herkkyyttä rajoittaa järjestelmän luonnolliset epäsymmetriat esimerkiksi eri vaiheiden välillä, koska releiden ei ole tarkoitus lauet niiden seurauksena. [18]

Yleensä suunnattua jäännösvirtaa mittaavat ylivirtareleet on säädetty tarkkuuteen, joka on noin 5-10 % maksimivikavirran aktiivisesta komponentista, josta käytetään merkintää  $3I_{R0}$ . Tavanomaisissa järjestelmissä vikavirran aktiivinen komponentti aiheutuu vain maadoitusresistanssista, mutta pitkiä kaapeleita sisältävissä järjestelmissä aktiivinen komponentti on suurempi kuin maadoitusresistanssista aiheutuva virta. Tämä on seurausta terveiden lähtöjen resistiivisistä häviöistä, jotka vaikuttavat nollaimpedanssin vikavirtaan. Simulointien perusteella resistiivinen vikavirta voi olla moninkertaisesti suurempi kuin maadoitusresistanssista aiheutuva virta. Tämän takia samoja suhteellisia releasetteluja ei voida ainakaan suoraan käyttää osittain tai kokonaan kaapeloiduissa järjestelmissä ilman tarkempia tutkimuksia aiheesta. [18]

Samaisessa tutkimuksessa todettiin tähtipistejännitteen  $U_0$  saavuttavan pitkillä kaapelilähdöillä vain noin 2 % vaiheen ja maan välisestä jännitteestä vikaresistanssin ollessa 5 k $\Omega$ . Varmuusmarginaali huomioiden voidaan olettaa, että kyseinen arvo on maksimiarvo ja rele tulee säätää toimimaan esimerkiksi noin 80 % maksimiarvosta suuruisella jännitteellä. Resistiivisen jäännösvirtamaksimin suhde releasetteluarvoon on sama kuin tähtipistejännitteille. Suojauksen selektiivisyyden toimimiseksi ylivirtareleen laukaisuarvo tulisi asettaa vielä alemmaksi kuin 80 %. Tyypillisesti releet on säädetty toimimaan herkkyydellä, joka on noin 3-5 % joko maadoitusjännitteen kautta kulkevasta virrasta tai vaiheen ja maan välisestä jännitteestä. Vikavirtojen ja -jännitteiden liian pienet

arvot aiheuttavat sen, että kaikkia vikoja ei pystytä havaitsemaan nykyisillä releasetteluilla vain keskitettyä kompensointia sisältävissä pitkissä kaapeliverkoissa. Kyseinen tilanne tulee eteen varsinkin suurempien vikaimpedanssien kautta tapahtuvissa vioissa. Kynnysvirtoja ja -jännitteitä on kuitenkin mahdollista pienentää aiemmin käytetyistä, sillä vaimenemisen takia luonnolliset epäsymmetriat verkossa vaikuttavat vähemmän eikä vahinkoloukeamisia näin ollen tapahdu kovinkaan helposti. Kyseisessä tutkimuksessa ei kuitenkaan tutkittu esimerkiksi kytkentäilmiöiden vaikutuksia, mitkä saattavat aiheuttaa vahinkoloukeamisia. Pitkät kaapelit aiheuttavat myös pientä kulmavirhettä mittamuuntajissa, mutta sillä ei havaittu olevan suojauksen kannalta olennaista merkitystä. [18]

Edellä mainittuja ongelmia tutkittiin myös verkoissa, joissa hyödynnettiin hajautettua kompensointia luvun 3.2 periaatteiden mukaisesti, ja tulokset olivat lupaavia. Sekä tähtipistejännite että resistiivinen jäännösvirta olivat vähintään 10 % maksimiarvoista kaikilla tutkituilla verkkotopologioilla aina 60 km pituisiin kaapelilähtöihin asti vikaimpedanssin ollessa 5 k $\Omega$ . Näin ollen voidaan todeta, että yleisesti käytettävä suojaus pystyy havaitsemaan myös suuremman impedanssin kautta tapahtuvia vikoja ja edellä mainitut kaapelien aiheuttamat ongelmat pystytään poistamaan, mikäli lähdoilla hyödynnetään paikallista kompensointia. Hajautettu kompensointi pienentää myös tähtipistejännitteen  $U_0$  riippuvuutta vikapaikan sijainnista. Simuloinneissa havaittiin  $U_0$  olevan huomattavasti pienempi vian tapahtuessa 60 km lähdön loppupäässä verrattuna lähellä pääkiskoa tapahtuvaan vikaan, kun järjestelmässä oli vain keskitetty kompensointiyksikkö. Hajautetun kompensoinnin järjestelmässä  $U_0$  ero vikapaikkojen välillä oli huomattavasti pienempi. [18] Relesuojauksen asettelu on näin ollen helpompaa pienemmän vaihtelun takia, kun hyödynnetään hajautettua kompensointia.

Kaapeliverkon merkittävän suurella nolaimpedanssilla siis on merkitystä myös vikapaikan paikantamiseen maasulkuutilanteissa. Luvussa 2 esitellyssä perinteisessä maasulkuanalyysissä vian sijainnilla ei ole merkitystä maasulkuvirran suuruuteen. Pitkillä kaapelilähdöillä nolaimpedanssissa tapahtuvien jännitehäviöiden takia vikapaikalla on kuitenkin vaikutusta maasulkuvirtaan. Ilman hajautettua kompensointia maasulkuvika lähellä lähdön kuorman puoleista päätä aiheuttaisi pienemmän vikavirran kuin vika lähellä sähköaseman kiskostoa. Vian nopean paikantamisen kannalta ilmiöstä voisi olla jopa hyötyä, mutta haitat suurista maasulkuvirroista ovat niin suuria, että ilmiön vaikutus pyritään minimoimaan. Hajautetun kompensoinnin avulla sarjanolaimpedanssin vaikutusta pystytään pienentämään eli maasulkuvirtoja pienentämään, minkä seurauksena myös maasulkuvirtojen ero pienenee ja vian paikannukseen aiheutuvat kaapeloinnista muutokset ovat pienempiä. [25]

Jaakkola ja Kauhaniemi päätyivät simulointitutkimuksessaan [19] samankaltaisiin tuloksiin suojauksen osalta. Hajautetun kompensoinnin avulla pystytään kasvattamaan tähtipistejännitteen arvoa vikatilanteessa, mikä tekee tähtipistejännitteeseen perustuvan suojauksen toiminnasta luotettavampaa. Myöskään admittanssivektoreihin perustuvassa maasulkusuojauksen toiminnassa ei kyseisen tutkimuksen mukaan tule olemaan merkittäviä ongelmia hajautettua kompensointia hyödynnettäessä.

Laajasti kaapeloiduissa haja-asutusalueiden verkoissa, joissa käytetään hajautettua kompensointia, on havaittu tilanteita, joissa terve lähtö on myös irronnut verkosta viallisen lähdön lisäksi. Näiden sympatialaukaisujen syyksi esitetään sammutetussa kaapeliverkossa esiintyvää ilmiötä, jossa maasulkuvian poistuttua verkon nollajännite ja lähtöjen summavirrat jäävät vaimenevasti värähtelemään maakapasitanssien varauksen purkautuessa. Laukaisuja on esiintynyt pääasiassa hajautettua kompensointia sisältävissä verkoissa, sillä osittain hajautetun kompensoinnin seurauksena myös terveillä lähdöillä voi ilmetä taajuudeltaan verkon perustaajuudesta poikkeavia vikavirtoja. [2] Mikäli suojausta suunniteltaessa kyseisiä ilmiöitä ei ole huomioitu, verkon rakenteen ja kompensointitapojen muutosten seurauksena saattavat perustaajuudesta poikkeavat ilmiöt aiheuttaa virheellisiä ja tarpeettomia suojaustoimintoja.

Maakaapeliverkossa maasulku tapahtuu yleensä kaapelin vaihejohtimesta maadoitettuun osaan, jolloin seurauksena on yleensä katkeileva vika, jossa valokaari syttyy ja sammuu maasulkuvirran katketessa ja jännitteen palatessa vikakohtaan. Kun vikaantunut verkonosa on erotettu ja vika on poistunut käytössä olevasta verkosta, nollajännite jää värähtelemään verkon kompensoinnin ja maakapasitanssien määrittelemällä rinnakkaisresonanssiin resonanssitaajuudella. Resonanssitaajuus  $f_r$  riippuu verkon kompensointiasteesta vian poistumisen jälkeen ja on 50 Hz eli sama kuin verkon perustaajuus, mikäli verkon kompensointiaste on 100 %. Lähdön rakenteesta, kompensointitavoista ja suojauksen toteutustavasta riippuen verkon kompensointiaste voi jälkivärähtelyn aikana muuttua merkittävästi. Tällöin joissain tapauksissa rele saattaa virheellisesti tulkita terveen lähdön vialliseksi ja laukaista sen irti verkosta. Vian jälkeisessä tilassa verkon kompensointiasteen olisi optimaalista olla lähellä 100 %, koska tällöin jälkivärähtelyn aiheuttamat haitat ovat pienimpiä. [2]

Elenia Oy:n verkossa tehdyissä tutkimuksissa oli havaittu maasulun jälkeisiä virhelaukaisuja. Laukaisujen syyksi paljastui verkossa käytettävät paikalliset kompensointiyksiköt, joiden aiheuttamat jälkivärähtelyt aiheuttivat releiden toiminnan kautta katkaisijoiden epätoivottuja toimintoja aivan kuten edellä esitettiin. Ongelman ratkaisuksi löydettiin kompensointikelan rinnalle kytkettävät vastukset, joiden avulla värähtely saadaan vaimenemaan nopeammin ja virheellisiä laukeamisia on pystytty

vähentämään. [15] [22] Myös Nikander ja Mäkinen [2] ehdottavat jälkivärähtelyn vaimentamiseksi lisäkuormitusvastuksen mahdollisimman pientä resistanssia sekä sitä, että se on kytkettynä verkkoon nimenomaan vian poistumishetkellä.

Maasulkusuojauksen perusteena ovat kosketusjännitevaatimukset, joiden mukaan suojaus on aseteltu ja mitoitettu. Kokonaisjännösvikavirran osalta on kuitenkin olemassa epävarmuutta liittyen harmonisiin yliaaltoihin ja verkon tuottamaan resistiiviseen vikavirtakomponenttiin. Niiden arviointi on vaikeaa, mutta niillä voi olla suojauksen kannalta jonkinlainen merkitys. [2] Standardissa SFS 6001 jännösmaasulkuvirraksi ohjeistetaan oletamaan 10 % kapasitiivisesta maasulkuvirrasta, jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä esimerkiksi mittausten seurauksena [7]. Kangasluoman Elenia Oy:n verkossa tekemissä tarkasteluissa päädyttiin tulokseen, jonka mukaan verkko tuottaa resistiivistä maasulkuvirtaa arviolta noin 5 % kapasitiivisesta kokonismaasulkuvirrasta. Kangasluoma toteaaakin, että standardin menetelmät jännösmaasulkuvirran arviointiin soveltuvat huonosti Elenian verkkoon. Niiden avulla saadut tulokset olivat suuruudeltaan pääsääntöisesti joko liian suuria tai pieniä riippuen siitä, huomioidaanko hajautetusti kompensoitu kapasitiivinen virta vai ei. Hän myös huomauttaa, että verkon rakenne vaikuttaa merkittävästi jännösmaasulkuvirran arviointiin. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin hajautettujen kompensointiyksikköjen itsessään tuottavan resistiivistä maasulkuvirtaa resistiivisten häviöiden seurauksena, mikä saattaa aiheuttaa jopa kokonismaasulkuvirran kasvua ja sitä kautta ongelmia tulevaisuudessa. [10]



## 6. YHTEENVETO

Haja-asutusalueen maakaapeloinnin seurauksena pitkät kaapeliosuudet lisääntyvät, mikä aiheuttaa verkon kapasitiivisen ja resistiivisen maasulkuvirran kasvua. Kapasitiivinen maasulkuvirta pystyttäisiin kompensoimaan perinteisemmällä keskitetyillä kompensointiyksiköilläkin, mutta niiden koko ja kustannukset kasvaisivat niin suuriksi, että on järkevämpää siirtyä osittain hajautettuun kompensointiin. Myös käytön kannalta yksittäiset hyvin suuret yksiköt saattaisivat aiheuttaa ongelmia vikatilanteissa. Hajautettuun kompensointiin siirtymistä puoltaa myös erityisesti kaapelin suuremman nollaimpedanssin aiheuttama resistiivinen maasulkuvirta. Sitä ei pystytä suoraan kompensoimaan hajautetuillakaan yksiköillä, mutta pienemmän verkossa siirtyvän kapasitiivisen virran ansiosta myös resistiivinen vikavirta jää pienemmäksi. Yleisesti voidaan todeta, että hajautettuja kompensointiyksiköitä olisi optimaalista hyödyntää pitkiä kaapeliosuuksia sisältävillä lähdöillä noin 5-20 km välein. Jokaiseen verkkoon ja tilanteeseen sopivaa yleispätevää ratkaisua on kuitenkin vaikeaa antaa, sillä hajautetun kompensoinnin tarpeellisuus ja hyödyllisyys riippuvat hyvin paljon verkon nykyisestä rakenteesta, kehityssuunnitelmista ja käyttöperiaatteista. Jokainen hajautetun kompensointiyksikön hankinta kannattaisikin tarkastella erikseen optimaalisen ratkaisun löytämiseksi.

Verkostolaskennan näkökulmasta jo kaapelointi itsessään aiheuttaa muutoksia, sillä kaapelien suuremman sarjanollaimpedanssin takia kaikki aiemmin käytetyssä perinteisessä maasulkuanalyyysissa tehdyt yksinkertaistukset eivät enää ole päteviä. Keskeistä kaapelin mallintamisessa on kaapelin sarjanollaimpedanssin yli vaikuttavan kapasitiivisen varausvirran aiheuttamat häviöt, joista pitkien kaapeleiden ilmajohtoja suurempi maasulkuvirta pääosin aiheutuu. Hajautettua kompensointiyksikköä mallinnetaan laskennassa yleensä kompensointikelan impedanssin ja sen yhteydessä olevan lisävastuksen resistanssin sekä niiden yhteydessä olevan muuntajan impedanssin kytkentänä. Kaapeloinnin seurauksena uusien tekijöiden, esimerkiksi maasulkuvirran resistiivisen komponentin, merkitys laskentatulokseen kasvaa. Oikeamman tuloksen saavuttamiseksi vain merkitykseltään todella vähäiset komponentit saisikin jättää huomioimatta. Esimerkiksi alle 1 % kokonaisimpedanssista aiheuttavat komponentit voidaan tässä yhteydessä käsittää riittävän vähäisiksi merkitykseltään. Kyseinen asia olisi hyvä huomioida verkon rakenteen muuttuessa myös verkostolaskentaan käytettävien ohjelmien kehityksessä.

Verkon käytössä hajautetussa kompensoinnin näkökulmasta olennaista on huomioida erityisesti vikatilanteet, joissa verkonosia erotetaan toisistaan tai kytketään yhteen. Jo verkon suunnitteluvaiheessa tulisi ottaa huomioon erilaiset rakenteet, joilla verkkoa voidaan käyttää, jotta verkko säilyy hallitusti kompensoituna kaikissa tilanteissa. Tyypillisesti suurin osa maasulkuvirrasta pyritään kompensoimaan lähtöjen varsilla paikallisilla yksiköillä ja keskitettyä kompensointia käytetään kompensointiasteen säätelyyn. Kaapeloinnin seurauksena maadoitukset voidaan ketjuttaa ja näin pienentää maadoitusimpedanssia, minkä takia verkon normaali käyttö voisi olla vikatilanteessa mahdollista. Näin ei kuitenkaan yleensä tehdä muun muassa standardin SFS 6001 ohjeistuksen ja mahdollisten riskien takia.

Maasulkusuojauksen perustana toimii standardi SFS 6001, joka määrittelee sallitut maadoitusjännitteet ja suojauksen toimintaperiaatteet. Maasulkusuojauksen toiminnan näkökulmasta tarkasteltuna kaapelointi sekä siitä seuraava resistiivisen ja kapasitiivisen maasulkuvirran kasvu saattaisi aiheuttaa merkittäviä muutoksia suojauksen toimintaan ja asetteluihin. Tutkimusten mukaan näyttää kuitenkin olevan niin, että hajautetun kompensoinnin avulla pystytään minimoimaan kaapeloinnin vaikutuksia niin tehokkaasti, että suojaukseen ei kovinkaan merkittäviä muutoksia tarvita. Maasulkutilanteen jälkivärähtelyiden aiheuttamat virhelaukaisut ovat kuitenkin yleistyneet. Niiden vähentämiseen on jo löydetty ratkaisuksi esimerkiksi värähtelyjä vaimentavia lisävastuksia, mutta asiaa voisi tutkia myös lisää. Samaten lisää tutkimusta kaipaisi myös resistiivisen jäännösmaasulkuvirran laskenta ja sen muodostumiseen vaikuttavat tekijät, sillä esimerkiksi hajautetut kompensointiyksiköt itsessään saattavat lisätä sitä.

# LÄHTEET

- [1] Sähkömarkkinalaki 588/2013, Finlex, Helsinki, 2013.
- [2] A. Nikander, A. Mäkinen, Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöidenvaikutukset - suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2017, 40 s. + liit. 1 s., [https://energia.fi/files/2130/Laajan\\_kaapeloidun\\_keskijanniteverkon\\_maasulkuilmioiden\\_vaikutukset\\_TTY\\_2017.pdf](https://energia.fi/files/2130/Laajan_kaapeloidun_keskijanniteverkon_maasulkuilmioiden_vaikutukset_TTY_2017.pdf), viitattu 19.2.2020
- [3] P. Verho, Sähköverkko-omaisuuden hallinta -luentomateriaali, Tampereen yliopisto, Tampere, 2020.
- [4] J. Bastman, Sähköverkkotekniikka -luentomateriaali, Tampereen yliopisto, Tampere, 2019.
- [5] M. Pesonen, 20 kV ilmajohtoverkon maakaapeloinnin vaikutus maasulkusuojaukseen ja loistehotaseeseen, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta, 2015, [https://energia.fi/files/1392/Diplomityo\\_Matti\\_Pesonen\\_2015\\_20\\_kV\\_ilmajohtoverkon\\_maakaapeloinnin\\_vaikutus\\_maasulkusuojaukseen\\_ja\\_loistehotaseeseen.pdf](https://energia.fi/files/1392/Diplomityo_Matti_Pesonen_2015_20_kV_ilmajohtoverkon_maakaapeloinnin_vaikutus_maasulkusuojaukseen_ja_loistehotaseeseen.pdf), viitattu 4.3.2020
- [6] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakelutekniikka, 3. painos, Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto, Helsinki, 2008, 295 s.
- [7] SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset, 5. painos, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2018, 155 s.
- [8] A. Tukiainen, Kaapeliverkkoon varastoituneen energian vaikutukset kytkentäylijännitteisiin, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2018, <https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Kaapeliverkkoon%20varastoituneen%20energian%20vaikutukset%20kytkent%C3%A4ylij%C3%A4nnitteisiin.pdf>, viitattu 10.4.2020

- [9] F. M. F. da Silva, Analysis and simulation of electromagnetic transients in HVAC cable transmission grids, PhD Thesis, Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, Aalborg, 2011, 263 s., [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/316446121/filipe\\_miguel\\_faria\\_da\\_silva.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/316446121/filipe_miguel_faria_da_silva.pdf), viitattu 11.4.2020
- [10] P. Kangasluoma, Medium Voltage Network Residual Earth Fault Current Estimation Methods, Master of Science Thesis, Tampere Univesity, Tampere, 2019, [https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Keskij%C3%A4nniteverkon\\_j%C3%A4nniteverkon\\_B6smaasulkuvirran\\_arviointimenetelm%C3%A4t.pdf](https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Keskij%C3%A4nniteverkon_j%C3%A4nniteverkon_B6smaasulkuvirran_arviointimenetelm%C3%A4t.pdf), viitattu 10.3.2020
- [11] A. Mäkinen, Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2016, 34 s. + liit. 4 s., <https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Selvitys%20keskij%C3%A4nniteverkon%20%20maadoitusj%C3%A4rjestelmist%C3%A4.pdf>, viitattu 17.3.2020
- [12] V. Hälvä, Verkko-omaisuuden hallinta Elenia Oy:ssa, vierailuluento 17.2.2020, Sähköverkko-omaisuuden hallinta -kurssi, Tampereen yliopisto, Tampere, 2020.
- [13] A. Gulbrand, O. Samuelsson, Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems, 2007 IEEE Lausanne Power Tech, IEEE, Lausanne, Switzerland, 2007, pp. 1129-1134, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4538474>, viitattu 25.2.2020
- [14] Multirel: Kompensointi ja maasulkureleet, Multirel Oy, verkkosivu, saatavissa (viitattu 12.4.2020): <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/>
- [15] H.-M. Aalto, diplomi-insinööri, suojausasiantuntija, Elenia Oy. Sähköpostihaastattelu 3.4.2020.
- [16] M. Lehtonen, E. Saarijärvi, K. Nurminen, Kevyt kaapelijärjestelmä haja-asutusalueiden tarpeisiin - KAPELI-projektin loppuraportti, Aalto-yliopisto, Espoo, 2010, 50 s. + liit. 2 s., [https://www.merinoval.fi/wp-content/uploads/2016/10/kapeli\\_loppuraportti\\_286.pdf](https://www.merinoval.fi/wp-content/uploads/2016/10/kapeli_loppuraportti_286.pdf), viitattu 5.3.2020

- [17] V. Sults, G. Kalcevs, Concepts and Practical Application for Distributed Compensation of Earth Fault Current in Latvia's 20 kV Networks, 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), IEEE, Riga, Latvia, 2019, pp. 1-6, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8982302>, viitattu 20.3.2020
- [18] A. Guldbrand, O. Samuelsson, Influence of Distributed Compensation on Earth Fault Protection in Cable Distribution Systems, 2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008), IET, Glasgow, UK, 2008, pp. 615-620, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4497057>, viitattu 1.3.2020
- [19] J. Jaakkola, K. Kauhaniemi, Factors affecting the earth fault current in large-scale rural medium voltage cable network, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), IET, Stockholm, Sweden, 2013, pp. 1-4. <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6683667&tag=1>, viitattu 20.2.2020
- [20] G. Brännman, Analysmodell för impedansjordat system med lokal kompensering, University Of Trollhättan/Uddevalla, Master Thesis, Trollhättan, 2003, <http://hv.diva-portal.org/smash/get/diva2:214924/FULLTEXT01.pdf>, viitattu 15.4.2020
- [21] J. Nokelainen, Effects of Increased Distribution Network Cabling on Distribution Management and Network Information Systems, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, 2015, <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23077/Nokelainen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>, viitattu 4.4.2020
- [22] S. Vehmasvaara, Compensation Strategies In Cabled Rural Networks, Master of Science Thesis, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2013, <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21392/Vehmasvaara.pdf?sequence=3&isAllowed=y>, viitattu 23.3.2020

- [23] M. Liu ja J. Zhao, The compensation effect of the distributed Arc suppression coil in 10kV network system, IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, Florence, Italy, 2016, pp. 3918-3923, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7793918>, viitattu 17.4.2020
- [24] J. Mörsky, Relesuojaustekniikka, Otatieto, Espoo, 1992, 459 s.
- [25] A. Guldbrand, Earth Faults in Extensive Cable Networks, Licenciate Thesis, Lund University, Lund, 2009, 121 p., <https://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1057.pdf>, viitattu 19.4.2020