

Sami Siljanto

AMR-HÄLYTYSRAJOJEN VALIDOINTI

Keskijänniteverkon vaihekatkoksen vaikutus
pienjänniteverkkoon ja nollavikojen tunnistaminen

Diplomityö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastajat: TkT Pertti Pakonen
TkT Ari Nikander
Syyskuu 2024

TIIVISTELMÄ

Sami Siljanto: AMR-hälytysrajojen validointi – Keskijänniteverkon vaihekatkoksen vaikutus pienjänniteverkkoon ja nollavikojen tunnistaminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2024

Elenian verkossa sähkömittarit lähettävät käytöntukijärjestelmään hälytyksiä, jotka perustuvat vaihejännitteiden poikkeamiin. Käyttötoiminnassa mittarihälytysten on syytä olla riittävän tarkasti määritelty, jotta eri hälytykset kuvaavat eri vikatilanteita useimmissa tapauksissa oikein. Elenian käyttötoiminnassa on tullut vastaan tapauksia, joissa mittarihälytykset eivät ole kuvanneet vikoja oikein, jolloin mittarihälytysten rajojen soveltuvuuden tutkimiselle on ollut tarvetta.

Diplomityössä tutkittiin jännite-epäsymmetriahälytyksen ja nollavikalaukaisun käytössä olevien jänniterajojen soveltuvuutta. Jännite-epäsymmetriahälytys perustuu mitattuun jännite-epäsymmetriaan pj-verkossa kj-vaihekatkoksen aikana. Kj-vaihekatkoksen aikana jännite-epäsymmetria on usean vaiheen alijännitettä. Nollavika on nollajohtimen epäjatkuvuudesta johtuva vika, joka aiheuttaa jännite-epäsymmetriaa. Nollaviassa jännite-epäsymmetria on usean vaiheen yli-jännitettä ja alijännitettä. Nollaviassa jännite-epäsymmetria riippuu kuormituksesta, nollajohtimen jatkuvuudesta ja käyttöpaikan maadoituksista.

Jännite-epäsymmetriahälytyksen osalta tutkittiin muuntajien kytkentäryhmän vaikutusta jännite-epäsymmetrian siirtymiseen kj-puolelta pj-puolelle. Elenian verkossa on käytössä kolmea eri kytkentäryhmäistä jakelumuuntajaa, jotka ovat Dyn11-, Yzn11- ja ZNzn0-kytkentäiset muuntajat. Kytkentäryhmän vaikutusta jännite-epäsymmetriaan tutkittiin todellisissa kj-vaihekatkoksissa tallentuneiden mittarihälytysten avulla. Tämän lisäksi työssä rakennettiin PSCAD-malli, jolla simuloitiin erilaisia kj-vaihekatkosvikoja. Mittarihälytyksillä ja simulointimallilla pyrittiin varmentamaan muuntajan kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen pj-verkkoon, ja siten arvioitiin hälytyksen soveltuvuutta kaikille Elenian verkon jakelumuuntajien takaisille mittareille.

Jännite-epäsymmetriahälytyksen osalta tutkittiin toisena osana nykyisen hälytyksen jänniterajojen sopivuutta. Tutkimuksessa hyödynnettiin kj-vaihekatkoksen aikaisten mittarihälytysten yhteydessä tallentuneita vaihejännitteitä. Tavoite oli selvittää voiko kj-vaihekatkoksissa esiintyä pj-verkossa vaihejännitteitä, jotka eivät täytä nykyisen jännite-epäsymmetriahälytyksen ehtoja.

Nollavikalaukaisun jänniterajojen sopivuutta tutkittiin hälytysten yhteydessä tallentuneiden jännitteiden ja virtojen avulla. Työssä selvitettiin kuormituksen vaikutusta tilanteissa, joissa nollajohdin on kokonaan poikki ja tilanteissa, joissa nollajohdin on ollut osittain jatkuva.

Työn tuloksena voidaan todeta, että kytkentäryhmällä on merkitystä jännite-epäsymmetrian siirtymiseen. Työssä todettiin, että nykyinen jännite-epäsymmetriahälytys soveltuu mittareille, joita syötetään Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisillä muuntajilla. Jännite-epäsymmetriahälytys ei sovellu mittareille, joita syötetään ZNzn0-kytkentäisillä muuntajilla.

Tämä johtuu siitä, että ZNzn0-kytkentäisten muuntajien toisiopuolella indusoituu selvästi poikkeavat vaihejännitteet kuin Dyn11- tai Yzn11-kytkentäisten muuntajien toisiopuolelle.

Jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajojen sopivuuden osalta tutkimuksessa huomattiin, että todellisten kj-vaihekatkojen aikana on ollut sellaisia tapauksia, joissa jännite-epäsymmetriahälytyksen ehdot eivät ole täyttyneet. Näissä tapauksissa vaihejännite on pudonnut alemmas kuin jännite-epäsymmetriahälytyksen 100 V alarajan, jolloin on muodostunut vaihe puuttuu -hälytys.

Nollavikalaukaisun jänniterajojen soveltuvuuden tutkimisessa todettiin kuormituksen epäsymmetrisyydellä olevan suurempi vaikutus tapauksissa, joissa nollajohdin on kokonaan poikki. Näissä tilanteissa nollavika on helpompi tunnistaa. Nollaviat, joissa on osittain jatkuva nollajohdin, voi olla hankala tunnistaa suuresta kuormituksen epäsymmetrisyydestä huolimatta. Ehdotuksena osittain jatkuvien nollavikojen tunnistamiseen on rinnakkain nollavikalaukaisun kanssa toimiva nollavikahälytys, jolle määritetään nollavikalaukaisua tiukemmat jännite-ehtojen rajat.

Avainsanat: verkon valvonta, AMR-hälytys, kytkentäryhmän vaikutus, jännite-epäsymmetria, nollavika, kj-vaihekatkos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Sami Siljanto: Validation of AMR-alarms – Effect on broken phase conductor in medium voltage network to the low voltage network and identification of faulty neutral conductor
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
September 2024

In Elenia's network the smart meters send alarms to the distribution management system when they measure an abnormality in the phase voltages. AMR-alarms used in DSO's network management ought to be accurate enough so that they describe the actual faults in most cases. In Elenia network management there has been actual cases where false positive alarms have occurred and that's why there is a need to study validity of used AMR alarm voltage limits.

This study aims to validate suitability of the phase voltage conditions used in two different AMR meter functionalities: voltage asymmetry alarm and neutral conductor fault trip. The voltage asymmetry alarm is used to detect broken phase conductor in MV network by measuring asymmetry in magnitudes of phase voltages in LV network. Detecting a broken neutral conductor is done by measuring voltage asymmetry in LV network. During neutral conductor fault it is not unusual that simultaneous overvoltage and undervoltage are present in some phases. The voltage asymmetry is dependent mostly of the loading but also the conductivity of the neutral conductor and grounding has a factor in the voltage asymmetry during fault.

Part of studying suitability of voltage asymmetry alarm was to examine the effect of secondary substation transformer's vector group to voltage asymmetry during broken phase conductor in MV network. In Elenia's network there are three types of secondary substation transformers with different winding couplings: Dyn11, Yzn11 and ZNzn0. The study was done by gathering data from smart meters that had been affected by broken phase conductor fault in MV network. For additional validation of the effect of different vector groups, a PSCAD-model was built to simulate various broken phase conductor faults, and thereby verify the suitability of the currently used voltage asymmetry alarm limits for every distribution transformer in Elenia network.

As a second part of voltage asymmetry alarm study, the suitability of currently used alarm's phase voltage conditions was examined. Study was done utilizing phase voltages recorded by meters during broken phase conductor faults in MV network. The aim of the study was to determine whether a such MV fault can cause phase voltages in the LV network that the conditions for voltage asymmetry alarm are not met.

The suitability of the phase voltage conditions for the neutral conductor fault trip was examined through the voltages and currents recorded by meters during neutral conductor faults. The impact of asymmetric loads on the voltage asymmetry was studied in two situations. One with neutral conductor is completely broken and the other with the neutral conductor partially conductive.

The results of the study concluded that vector group significantly affects the voltage asymmetry during MV phase outages. Currently used voltage asymmetry alarm is applicable for the meters that are fed by Dyn11 and Yzn11 coupled transformers. However, the alarm cannot be applied on meters that are fed by ZNzn0 coupled transformers.

Regarding the suitability of phase voltage conditions for voltage asymmetry alarm, it was found that there have been actual broken phase conductor faults where conditions for the alarm were not met. In these cases, the phase voltages were below 100 V which is the lower voltage threshold of the alarm, triggering a blown fuse alarm.

In the study of suitability of phase voltage conditions for neutral conductor fault trip, it was found that asymmetry of the loading has a greater impact in cases where the neutral conductor is completely broken. However, in the case of faults with partially conductive neutral conductor, it can be difficult to identify based on voltage asymmetry despite significant load asymmetry. To detect more reliability faults with partially conductive neutral conductor, it was suggested that an alarm with stricter voltage conditions to be used alongside with the neutral conductor fault trip.

Keywords: network monitoring, AMR-alarm, effect of vector group, voltage asymmetry, neutral conductor fault, broken phase conductor

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin toimeksiantona Elenia Verkko Oyj:n Käyttökeskus -tiimissä vuoden 2024 aikana. Diplomityöaiheen perään aloin kyselemään kesällä 2023 ollessani Käyttökeskus -tiimissä harjoittelijana ja työn aiheen raamitus alkoi seuraavana syksynä. Haluan kiittää Elenian 'käyttistä' mahdollisuudesta päästä tekemään diplomityö kiinnostavasta aiheesta.

Suuret kiitokset haluan osoittaa työn ohjaajalleni Elenialla, Käyttökeskuspäällikkö Teemu Suvelalle äärimmäisen hyvästä ohjauksesta, tuesta ja kommentoinnista koko työn ajan. Kiitokset myös Tampereen Yliopiston ohjaajilleni TKT Pertti Pakoselle ja TKT Ari Nikanderille hyvistä kommentteista ja ehdotuksista sekä työn tarkastamisesta. Kiitos kuuluu myös asiantuntijoille, jotka auttoivat työn eri vaiheissa.

Kiitos kaikille läheisilleni, erityisesti ystävilleni. Teidän ansiostanne sain ajatukset välillä muualle opinnoista. Lopuksi osoitan kiitokset rakkaalle avopuolisolleni Elisalle suurimmasta tuesta opintojeni ajan.

Tampereella, 16.9.2024

Sami Siljanto

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimustyön tausta, rajaus ja tavoitteet	2
2. PIENJÄNNITEVERKKO	5
2.1 Pienjänniteverkon maadoitusjärjestelmät	6
2.2 Pienjänniteverkon suojaus	9
2.3 Jakelumuuntajat	10
2.4 Jakelumuuntajan kytkentäryhmät	12
3. JAKELUVERKON EPÄSYMMETRISET VIAT	14
3.1 Symmetriset komponentit	15
3.1.1 Kytkentäryhmän vaikutus nollaimpedanssiin	18
3.1.2 Kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen	22
3.2 Kj-verkon epäsymmetriset viat ja niiden vaikutus pj-verkkoon	24
3.2.1 Kolmi- ja kaksivaiheinen oikosulku	24
3.2.2 Maasulku ja maasulkuvirran kompensointi	26
3.2.3 Vaihekatkos ja sen aiheuttama jännite-epäsymmetria	29
3.3 Nollavika	34
4. AMR-MITTAREIDEN HYÖDYNTÄMINEN KÄYTTÖTOIMINNASSA	37
4.1 Mittareiden etäluentajärjestelmä	38
4.2 Mittareiden hyödyntäminen verkon valvonnassa	39
4.3 Mittarihälytysten kuvaus ja hälytysten muodostuminen	42
4.3.1 Nollavika	43
4.3.2 Jännite-epäsymmetria	46
4.3.3 Vaihe puuttuu	48
4.3.4 Kiertosuunta muuttunut	50
4.3.5 Alijännite ja ylijännite	51
4.4 Kj-verkon vikojen tunnistaminen etäluettavien mittareiden avulla	51
5. AMR-HÄLYTYSDATAN TILASTOLLINEN TUTKIMUS	53
5.1 Kytkentäryhmän vaikutuksen tutkiminen hälytysdatasta	53
5.1.1 Kytkentäryhmän vaikutus kj-vaihekatkoksessa	54
5.1.2 Kytkentäryhmän huomioiminen jännite-epäsymmetriahälytyksessä	57
5.2 Jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajojen soveltuvuus	58
5.2.1 Kj-vaihekatkoksen aiheuttamia muita hälytyksiä	59
5.2.2 Jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajojen päivitys	63
5.3 Nollavikatapausten tilastollinen tutkiminen hälytysdatasta	64

5.3.1 Kuormitusilanteen vaikutus jännite-epäsymmetriaan.....	64
5.3.2 Nollavikojen tunnistaminen AMR-mittareilla	66
6. SIMULOINTIMALLI	69
6.1 Tutkittavan verkon komponenttien mallintaminen	69
6.1.1 Mallinnettavat johdot	69
6.1.2 Muuntajien kytkentäryhmän mallintaminen.....	70
6.1.3 Maasulkuvirran kompensointilaitteistot.....	71
6.2 Könnin sähköaseman yksinkertaistettu verkkomalli	72
6.3 Simulointimallin soveltuvuuden varmentaminen.....	73
7. SIMULOINTIEN TULOKSET	77
7.1 Kj-vaihekatkos ilman maakosketusta	77
7.2 Kj-vaihekatkos maakosketuksella	79
7.2.1 Vaihekatkos ja maasulku kuorman puolelta	80
7.2.2 Vaihekatkos ja maasulku syötön puolelta.....	81
7.2.3 Vaihekatkos ja samanaikainen maasulku eri johtimella	82
7.3 Tulosten arviointi	83
8. YHTEENVETO.....	84
LÄHTEET	89
LIITE A: KÖNNIN SÄHKÖASEMAN PSCAD-MALLI.....	93

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMI	engl. Advanced Metering Infrastructure, kehittynyt mittausinfrastruktuuri
AMR	engl. Automatic Meter Reading, automaattinen mittarinluenta
ATJ	Asiakastietojärjestelmä
DFT	engl. Discrete Fourier Transform, diskreetti Fourier -muunnos
DMS	engl. Distribution Management System, käytöntukijärjestelmä
FFT	engl. Fast Fourier Transform, nopea Fourier -muunnos
IT-järjestelmä	engl. Isolated, lat. Terra, maadoitusjärjestelmä, jossa jännitteelle alttiit osat ovat maasta erotettu
MDMS	engl. Meter Data Management System, mittaustietojärjestelmä
N	engl. Neutral, summavirran paluujohdin eli nollajohdin
PE	engl. Protective Earth, suojamaadoitusjohdin
PEN	engl. Protective Earth and Neutral, yhdistetty suojamaadoitus- ja nollajohdin
RMS	engl. Root Mean Square, tehollisarvo
SCADA	engl. Supervisory Control and Data Acquisition, käytönvalvontajärjestelmä
PSCAD	engl. Power Systems Computer Aided Design, sähköjärjestelmän tietokoneavusteinen suunnittelu
TN-järjestelmä	lat. Terra, engl. Neutral, maadoitusjärjestelmä, jossa yksi piste on maadoitettu ja jännitteelle alttiit osat ovat yhdistetty maadoituspisteeseen
TN-C-järjestelmä	lat. Terra, engl. Neutral Combined, maadoitusjärjestelmä, jossa on yhdistetty suojamaadoitus- ja nollajohdin (PEN)
TN-S-järjestelmä	lat. Terra, engl. Neutral Separated, maadoitusjärjestelmä, jossa on erilliset suojamaadoitus- ja nollajohtimet (PE ja N)
TN-C-S-järjestelmä	lat. Terra, engl. Neutral Combined Separated, maadoitusjärjestelmä, jossa osassa verkkoa on TN-C-järjestelmä ja osassa verkkoa on TN-S-järjestelmä.
TT-järjestelmä	lat. Terra, lat. Terra, maadoitusjärjestelmä, jossa jännitteelle alttiit osat ovat paikallisesti yhdistetty maadoituspisteeseen
α	vaihesiirto-operaattori
ω	järjestelmän kulmataajuus
I_1, I_2, I_0	myötä-, vasta- ja nollavirta
I_A, I_B, I_C	vaihevirrat
I_a, I_b, I_c	pienjänniteverkon vaihevirrat
$I_{\sigma, max}$	virta, joka poikkeaa eniten vaihevirtojen keskiarvosta
I_{DC}	tasavirtakomponentti
I_k	yksivaiheinen oikosulkuvirta
I_{k3}	kolmivaiheinen oikosulkuvirta
I_N	nollajohtimen paluuvirta
$I_{\bar{x}}$	vaihevirtojen keskiarvo
k	maasulkukerroin
R_{Fe}	rautahäviöitä kuvaava resistanssi
R_k	oikosulkuresistanssi
T_1	Muuntajatyypin 1 muunnosmatriisi
T_2	Muuntajatyypin 2 muunnosmatriisi
T_3	Muuntajatyypin 3 muunnosmatriisi

$\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$	myötä-, vasta- ja nollajännite
$\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$	vaihejännitteet
\underline{U}_n	nimellisjännite
\underline{U}_v	vaihejännite ennen vikaa
\underline{U}_v	vaihejännitteet ensiöpuolella
\underline{u}_v	vaihejännitteet toisiopuolella
$U_{\omega B}, U_{\omega C}$	käämijännitteet
X_k	oikosulkureaktanssi
X_m	magnetointireaktanssi
\underline{Z}	järjestelmän impedanssi
$\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0$	myötä-, vasta- ja nollaimpedanssi
Z_f	vikaimpedanssi
Z_k	oikosulkuimpedanssi
\underline{Z}_N	maan ja tähtipisteen väliin kytketty impedanssi
Z_{th}	Thevenin impedanssi nähtynä vikapaikasta

1. JOHDANTO

Verkonhaltijan on sähköverkossaan järjestettävä sähkömarkkinalain nojalla sähkönkäyttöpaikoille taseselvityksen ja laskutuksen perustana oleva sähköntoimitusten ja mittaus-tietojen rekisteröinti ja toimitus sähkömarkkinoiden osapuolille [1]. AMR (Automatic Meter Reading) -mittarilla tarkoitetaan etäluettavaa mittaria, jolla on kyky kaksisuuntaiseen tiedonvaihtoon mittarin ja mittaus-tietojärjestelmän välillä. Kaksisuuntaisen tiedonvaihdon ansiosta etäluettavan mittauksen lisäksi mittarille voidaan lähettää komentoja, kuten katkoreleen kytkentätilan muutoskomento. AMR-mittaria kutsutaan usein myös älykkääksi sähkömittariksi. Tarkkaa määritelmää älykkäälle sähkömittarille ei ole, sillä eri ihmisille ja ryhmille se voi tarkoittaa eri asioita. Uusien ominaisuuksien ja vaatimusten myötä nykyhetken älykäs sähkömittari ei välttämättä enää ole älykäs tulevaisuudessa. [2] Tässä työssä älykkäällä sähkömittarilla tarkoitetaan Elenian verkkoalueelle asennettavia toisen sukupolven älykkäitä sähkömittareita, jotka korvaavat ensimmäisen sukupolven älykkäät sähkömittarit. Toisen sukupolven älykkäitä sähkömittareita on asennettu vuodesta 2021.

Valtioneuvoston asetuksessa sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta 767/2021 annetaan vähimmäisvaatimukset AMR-mittarin toiminnallisuuksista. Uuden asetuksen myötä edeltävät älykkäät sähkömittarit on korvattava asetuksen 767/2021 vaatimukset täyttävillä uusilla sähkömittareilla, mikäli vanhat mittarit eivät vaatimuksia täytä. Yhtenä tärkeimpänä uutena vaatimuksena on energiankulutuksen mittaus 60 minuutin sijasta 15 minuutin mittausjaksoilla. Vuoden 2028 loppuun mennessä kaikki tuntimittauslaitteistot ovat vaihdettava varttimittauslaitteistoksi. [1]

Elenialla toisen sukupolven etäluettavia mittauslaitteita hyödynnetään pienjänniteverkon valvonnassa seuraamalla jännitteen laatua. Mittausasetus edellyttää kaikilta etäluettavilta mittareilta jännitekatkon havaitsemista ja rekisteröintiä sekä keskeytyksen alkamis- ja päättymisajankohdan rekisteröintiä. Aikaisemman sukupolven älymittareilta vaadittiin yli kolmen minuuttia kestävään keskeytykseen havahtumista ja rekisteröintiä, mutta uusien mittareiden on rekisteröitävä kaikki mittarin havaitsemat sähkökatkot vaihekohtaisesti. Kuitenkaan jännitemittaus ei ole aukotonta ja mittauksen näytteenottotaajuudet vaihtelevat mittareittain riippuen valmistajasta, minkä takia hyvin lyhyitä katkoja ei kaikilla mittareilla välttämättä havaita. [1][3]

Verkonhaltija voi halutessaan lisätä mittarille lisätoiminnallisuuksia, kuten indikoinnit tai hälytykset sähkönjakelun keskeytyksistä tai muista poikkeavista tapahtumista käyttöpaikoilla määriteltyjen ehtojen mukaisesti. Mittareiden hälytyksille sopivilla, vapaasti määritettävillä ali- ja ylijännitteen raja-arvoilla tunnistetaan erilaisia vikoja kuten nollavika, keskijänniteverkon vaihekatkos ja pienjänniteverkon yhden tai kahden vaiheen katko. Lisätoiminnallisuuksia voidaan määrittää jännitteen lisäksi myös muiden sähköisten suureiden avulla. Vastaavanlaisia indikaatioita ja hälytyksiä voidaan luoda virralle esimerkiksi havahtumaan ylivirrasta vaihekohtaisesti, jolloin on mahdollista tunnistaa epäsymmetriset kuormitustilanteet käyttöpaikalla. Indikointi- ja keskeytyshälytyksistä tiedot siirtyvät mittarikohtaisesti mittaustietojärjestelmään. Hälytyksistä tiedot voidaan edelleen siirtää käytöntukijärjestelmään (DMS eli Distribution Management System) tukemaan pienjänniteverkon valvontaa. [3]

Työn alussa käydään yleisesti läpi pienjänniteverkon rakennetta, eri maadoitusjärjestelmiä ja kuinka pienjänniteverkon suojaus on perinteisesti toteutettu. Työn alussa perehdytään jakelumuuntajiin ja niiden käämitysten erilaisiin kytkentöihin. Tämän jälkeen esitellään tarkemmin muuntajan käämitysten kytkentöjen vaikutus nollaimpedanssin suuruuteen verkon epäsymmetrisissä tilanteissa. Tämän jälkeen tarkastellaan kj-vaihekatkoksen aiheuttaman jännite-epäsymmetrian siirtymistä erilaisten Elenian verkossa yleisimpien jakelumuuntajien lävitse. Teoriaosuuden loppuksi esitellään Elenian verkossa oleville älymittareille konfiguroituja käytössä olevia hälytyksiä sekä kuinka niitä hyödynnetään verkkoyhtiön käyttötoiminnassa.

1.1 Tutkimustyön tausta, rajaus ja tavoitteet

Elenian verkossa lähes jokaisella käyttöpaikalla on älykäs sähkömittari. Mittareiden luontajärjestelmän ja käytöntukijärjestelmän integraatio mahdollistaa tehokkaan vianhoidon. Integraatio mahdollistaa hälytysten tuomisen suoraan käytöntukijärjestelmään käytönvalvojan reagoitavaksi. Käytönvalvoja lähettää tarvittaessa mittareille käytöntukijärjestelmästä tilakyselyitä. Käytönvalvoja hyödyntää tilakyselyiden yhteydessä saatavia jännitteiden ja virtojen hetkellisarvoja vikojen rajauksessa.

Mittareilta lähetettäviä, käyttötoimintaa tukevia hälytyksiä jakeluverkonhaltijat voivat määrittää tarpeidensa mukaan. Verkonhaltija voi mittarin tekniset rajoitteet huomioiden valita parametrit ja rajat-arvot, joiden täytyessä mittarit lähettävät hälytyksiä. Elenian verkossa käytössä olevat hälytykset ovat määritelty vaihejännitteen poikkeamiin yhtälön 1.1 mukaisesti.

$$U_n \pm X, \quad (1.1)$$

missä U_n on nimellisjännite ja X on hälytykselle määriteltävä jännitteen poikkeama nimellisestä. Jännitepoikkeaman lisäksi hälytyksen muodostumiselle määritellään aikaperusteinen ehto. Jännitepoikkeaman täytyy kestää yli määritellyn ajan.

Eri vikatilanteille määritetään omat hälytykset. Eri hälytyksien parametreja määriteltäessä on oltava riittävän hyvin tiedossa kyseisen vian aikainen vaihejännitteiden käyttäytyminen käyttöpaikassa. Elenian verkossa on tällä hetkellä käytössä seuraavat hälytykset käyttötoiminnan tueksi: vaihe puuttuu, jännite-epäsymmetria (keskijänniteverkon vaihekatkos), nollavika, ylijännite, alijännite ja kiertosuunta muuttunut. Tässä työssä keskitytään keskijänniteverkon vaihekatkoksen tunnistamiseen käytettävään jännite-epäsymmetriahälytykseen sekä nollavikojen tunnistamiseen käytettäviin nollavikalaukaisuun ja nollavikahälytykseen.

Jännite-epäsymmetriahälytystä hyödynnetään kj-vaihekatkoksen tunnistamisessa. Kj-vaihekatkos on vikana haastava, sillä se ei välttämättä aiheuta oikosulkua tai riittävän pieni vikaimpedanssista maasulkua, jonka sähköaseman suojaus havaitsisi. Kj-vaihekatkos aiheuttaa jännite-epäsymmetriaa vikapaikan jälkeisille pienjänniteverkon käyttöpaikoille. Sähkömittareiden hälytysominaisuudet ovat tuoneet kj-vaihekatkosten tunnistamisen ja tarkan vikapaikan havaitsemisen huomattavasti paremmalle tasolle kuin aikana ennen älymittareita.

Nollavikahälytyksen ja uuden nollavikalaukaisun tarkoituksena on jännitteiden epäsymmetrian perusteella tunnistaa PEN-johtimen katkeaminen tai muu nollapiirin epäjatkuvuus TN-maadoitusjärjestelmissä. Elenialla nollavikalaukaisu on uusi, käyttöönottoa odottava ominaisuus, jossa mittari on konfiguroitu avaamaan automaattisesti katkorele nollaviassa. Tällä hetkellä nollavikalaukaisu ei fyysisesti avaa katkorelettä. Mahdollisesta nollavikalaukaisusta tulee tieto käytöntukijärjestelmään.

Nollavika on vaarallinen vika ihmisille ja eläimille, sillä nollajohtimen katkeaminen voi saada aikaan vaihejännitteen suuruisia jännitteitä jännitteelle alttiiden osien ja maan välille. Nollaviassa ovat myös laiterikot mahdollisia, sillä vaihejännitteet voivat nousta pääjännitteen suuruiseksi. Nollavikalaukaisu -ominaisuuden myötä nollavian vaikutusaika jää lyhyeksi. Automaattisesti aukeavan katkoreleen myötä käyttöpaikka erotetaan jakeluverkosta, jonka myötä nollavika ei vaikuta käyttöpaikkaan.

Tämän työn tutkimuksen osalta apuna on käytetty seuraavanlaisia tutkimuskysymyksiä, jotka rajaavat työn aihetta ja ohjaavat tutkimusprosessin eri vaiheissa.

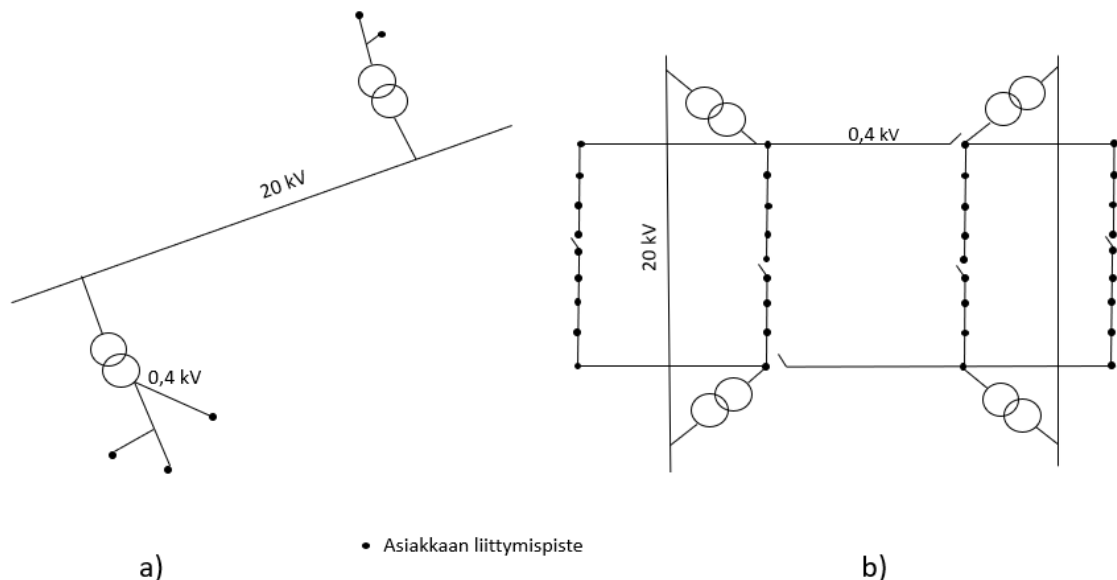
1. Kuinka suuri ero on jakelumuuntajien kytkentäryhmien välillä jännite-epäsymmetrian siirtymisessä kj-viassa muuntajan läpi pj-puolelle? Älymittarilla voidaan tunnistaa kj-vaihekatkoksia, onko hälytysrajoissa otettava huomioon välissä olevan jakelumuuntajan kytkentäryhmä?
2. Ovatko nykyiset jännite-epäsymmetriahälytyksen rajat sopivat? Kuinka suuressa osassa kj-vaihekatkoksissa on tilanne, jossa vian aikaiset vaihejännitteet ovat varsinaisen jännite-epäsymmetriahälytyksen ulkopuolella?
3. Kuinka tiukat jännitteen rajat nollavikalaukaisulle voidaan asettaa ilman, että ilmenee turhia nollavikalaukaisuja? Ovatko nollavian tunnistamiseen tällä hetkellä käytetyt rajat sopivat? Kuinka suuren jännitteen epäsymmetrisyyden vinokuorma aiheuttaa?

Tutkimuskysymyksiin haetaan vastauksia teoriasta kirjallisuuskatsauksen kautta ja asennettujen uuden sukupolven mittareiden hälytysten kautta tilastollisesti. Tämän lisäksi työssä varmennetaan kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetrian muodostumiseen rakentamalla Elenian Könnin sähköaseman PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) -simulointimalli. Kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetriaan selvitetään simuloimalla erilaisia epäsymmetrisiä kj-vaihekatkoksia. Simuloinnista kerätään pj-verkon sähköisiä suureita näissä vikatilanteissa ja tulosten pohjalta tarkastellaan, voiko nykyisiä mittareiden hälytysparametreja säätää ilman 'väärä tosi' tai 'väärä epätosi' hälytysten ilmaantumista. Saatavan datan analysoimisen tukena toimii jo tietojärjestelmiin tulleet hälytykset nykyisillä hälytysten parametreilla. Tarkemmilla jännite-epäsymmetriahälytyksillä voidaan parantaa kj-vaihekatkoksen tunnistettavuutta ja paikantamisen tarkkuutta ja siten tehostaa näiden vikojen korjaamista. Nollavikalaukaisurajojen tarkempi asettelu parantaa henkilöturvallisuutta ja vähentää asiakkaiden laitteiden rikkoutumista, kun nollavika saadaan automaattisesti rajattua pois käyttöpaikalta mahdollisimman nopeasti. Tämän työn tavoitteena on esittää päivitettyt rajat nykyisille hälytysparametreille ja siten nopeuttaa vikojen havaitsemista, mikä edelleen parantaa sähkönjakelun varmuutta.

2. PIENJÄNNITEVERKKO

Pienjänniteverkko on osa sähkönjakelujärjestelmää ja Suomessa käytetään yleisesti 0,4 kV pienjännitejärjestelmää. Pienjänniteverkkoa syötetään keskijänniteverkosta yleisemmin 20/0,4 kV jakelumuuntamoilla, ja pj-verkko on turvallisuussyistä maadoitettu jakelumuuntajan tähtipisteestä. Myös jokaiselta syötettävältä käyttöpaikalta vaaditaan omat maadoitukset turvallisuuden takaamiseksi. Maadoittamisen ensisijainen tehtävä on estää kosketusjännitteiden muodostuminen jännitteelle alttiille osille sekä toimia vikavirran matalaimpedanssisena reittinä vikavirtasuojaukselta varten. [4, 9–1]

Kun keskijänniteverkko on keskeisimmiltä osin muuntamoiden välillä rakennettu silmukoiduksi, jossa on varasyöttöyhteys, niin pienjänniteverkko rakennetaan yleensä säteittäiseksi. Taajamissa ja muissa tiheään asutuissa paikoissa voi olla kannattavaa rakentaa myös pj-verkko silmukoiduksi. Haja-asutusseuduilla tämä ei ole teknistaloudellisesti järkevää, koska etäisyydet ovat pitkiä ja muuntopiirit ovat asiakasmääriltään pieniä. Kuvassa 1 on esitelty yksinkertainen topologia, kuinka pj-verkko voidaan rakentaa a) säteittäisesti b) silmukoidusti. [5, s.161–162]



Kuva 1. a) Säteittäin b) säteittäisesti käytetty silmukoitu pienjänniteverkko. Muokattu [5, s. 162]

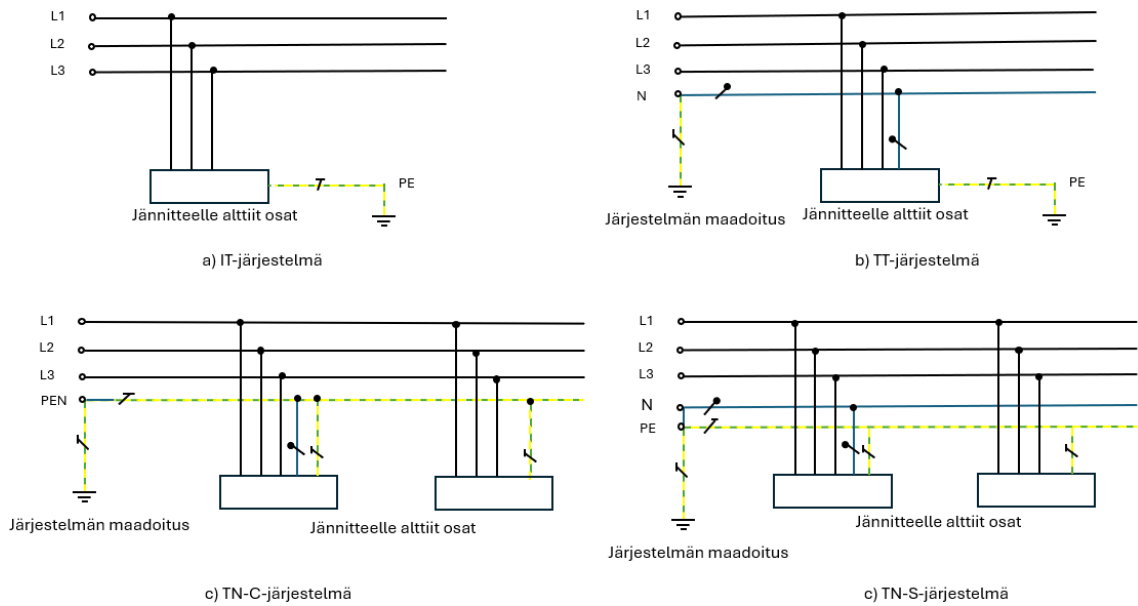
Pienjänniteverkossa on yleensä kolme vaihejohtinta ja yksi yhdistetty suojamaadoitus- ja nollajohdin (Protective Earth and Neutral, PEN). PEN-johdin toimii paluuvirran reittinä

takaisin muuntamolle. Uusilla käyttöpaikoilla PEN-johdin erotellaan omiksi suojamaadoitus- ja nolajohtimiksi. Vanhoissa rakennuksissa PEN-johdinta ei ole eroteltu erillisiksi suojamaadoitus- ja nolajohtimiksi. Suojamaadoittamisella tarkoitetaan virtapiiriin kuulumattomien osien eli jännitteelle alttiiden osien yhdistämistä maadoituksiin. Pienjänniteverkossa käytetään nelijohdinjärjestelmää, koska kuorman jakautuminen on huomattavasti epäsymmetrisempää verrattuna keskijännitejakeluverkon liittymispisteissä. Toisena merkittävänä syynä miksi nelijohdinjärjestelmää käytetään, on matalaimpedanssinen reitti vikavirralle suojausta varten. Käyttöpaikat kytketään yleensä kolmivaiheisesti, mutta yksittäiset sähkölaitteistot kytketään usein yksivaiheisesti vaihejohtimen ja nolajohtimen väliin. Sähkölaitteiden eri aikainen käyttö ja vaihtelevat sähkölaitteiden ottamat tehot aiheuttavat epäsymmetriaa kuormituksessa, vaikka kiinteistöjen sähköasennusten suunnitteluvaiheessa pyritään jakamaan kuormien tehot tasaisesti kaikille vaiheille. [4, 9–1]

Luvussa 2.1 käsitellään pienjänniteverkon maadoitusjärjestelmiä ja luvussa 2.2 esitellään, kuinka pienjänniteverkon suojausta on perinteisesti toteutettu. Luvussa 2.3 käsitellään tarkemmin jakelumuuntajia ja niihin liittyvää terminologiaa ja kuinka muuntaja huomioidaan yksinkertaisissa tehonjako- ja vikavirtalaskennoissa. Luvussa 2.4 esitellään tarkemmin muuntajien käämitysten yhdistämistä eli tällöin puhutaan kytkentäryhmistä. Kytkentäryhmällä on vaikutus, kuinka epäsymmetrisissä tilanteissa epäsymmetria kulkeutuu muuntajan läpi. Luvun lopussa esitellään Elenian verkon jakelumuuntajien yleisimmät kytkentäryhmät.

2.1 Pienjänniteverkon maadoitusjärjestelmät

Jakelujärjestelmät luokitellaan maadoitustavan perusteella. Tämä tarkoittaa, että jakelujärjestelmät ovat joko maasta erotettuja tai maadoitettuja. Maadoituksen pääasialliset tehtävät ovat kosketus- ja askeljäännitteiden nousun rajoittaminen potentiaalintasaajana sekä vikatilanteessa hyvä maadoitus toimii matalaimpedanssisena reittinä maahan ylivirtasuojauksia varten. Erilaisia maadoitusjärjestelmiä ovat TN-, TT- tai IT-järjestelmät, joita on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Maadoitusjärjestelmät. Muokattu [6, s. 31–32]

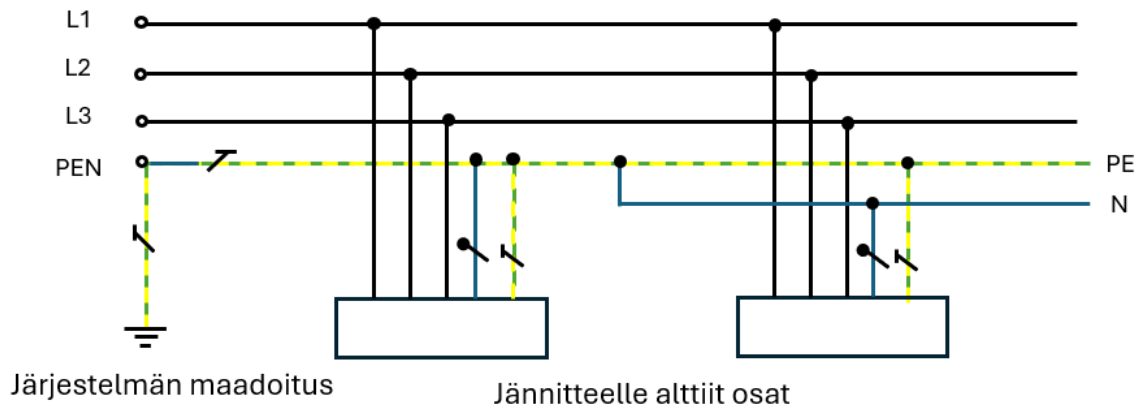
Kirjaintunnuksen ensimmäinen kirjain kertoo koko järjestelmän maadoitustavan:

- T: yksi piste on yhdistetty suoraan maahan
- I: kaikki jännitteiset osat maasta erotettu tai kytketty impedanssin kautta

Toinen kirjain kertoo jännitteelle alltiiden osien maadoitustavan:

- T: jännitteelle alltiit osat yhdistetty suoraan maahan järjestelmän maadoitustavasta riippumatta
- N: jännitteelle alltiit osat yhdistetty jakelujärjestelmän maadoitettuun pisteeseen. [6, s. 40]

TN-järjestelmät jaotellaan suojajohtimen käytön perusteella TN-C-, TN-S- tai TN-C-S-järjestelmiksi. TN-C-järjestelmässä on nolla- ja suojamaadoitusjohdin yhdistetty yhteen johtimeen eli yhdistettyyn nolla- ja suojamaadoitusjohtimeen (PEN) koko järjestelmässä. TN-S-järjestelmässä on erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet koko järjestelmässä. TN-C-S-järjestelmä on yhdistelmä edellisistä, eli erilliset suojamaadoitus- ja nollajohtimet (PE ja N) ovat yhdistetty yhteen johtimeen osassa järjestelmää. [6, s.31] Kuvassa 3 on esitetty havainnollistava kuva TN-C-S-järjestelmästä.



Kuva 3. TN-C-S maadoitusjärjestelmä. Muokattu [6, s. 31]

Muita maadoitusjärjestelmiä ovat TT- ja IT-järjestelmät. TT-maadoitusjärjestelmässä ei ole yhteistä maadoituspistettä ja jännitteelle alttiit osat on yhdistetty käyttöpaikalla suoraan maadoituselektrodiin, joka ei muodosta galvaanista yhteyttä jakeluverkon maadoitukseen. Suomessa TT-järjestelmää ei ole käytössä muun muassa huonojen maadoitusolosuhteiden takia, kun taas Keski- ja Etelä-Euroopassa TT-järjestelmä on yleinen. [6, s. 39]

IT-järjestelmässä eli maasta erotetussa verkossa jännitteisiä osia ei ole yhdistetty maahan tai ne ovat yhdistetty impedanssin kautta. Jännitteelle alttiit osat ovat yhdistetty suoraan maahan. IT-järjestelmän hyötyjä ovat käyttövarmuus sitä vaativissa kohteissa kuten sairaaloiden leikkaussaleissa, joissakin teollisuuden prosesseissa ja Suomessa kj-jakeluverkoissa. [6, s. 39–40]

Suomessa uudisrakennusten maadoitusjärjestelmä on TN-S-järjestelmä, mutta vanhemmat rakennukset ovat rakennettu TN-C-järjestelmäksi. Pienjänniteverkot ovat TN-C-järjestelmäisiä, jolloin uudisrakennukset muodostavat jakeluverkon kanssa yhdistetyn TN-C-S-järjestelmän. Jakeluverkon PEN-johdin on maadoitettava jakelumuntamon syötössä tai 200 m:n päässä muuntamosta. Jokainen yli 200 m pitkä johto tai johtohaara on maadoitettava sen päästä tai enintään 200 m:n päässä siitä. AMKA-johdoille suositellaan myös johdon maadoittamista 500 m välein ylijännitesuojauksen toimivuuden varmistamiseksi. [5, s. 199]

TN-järjestelmässä nollajohtimen katkeaminen tarkoittaa sitä, ettei kuormituksen paluuvirroille ole tarkoitettu reittiä takaisin syötölle. Tällaista vikaa kutsutaan nollaviaksi. Matalaimpedanssisen paluureitin puuttuessa osa paluuvirroista kulkee vaihejohtimia pitkin aiheuttaen vaihejännitteiden vinoutumista. Nollavika aiheuttaa vikapaikan takana oleville käyttöpaikoille tähtipisteen referenssin siirtymistä. Tämä aiheuttaa voi aiheuttaa vaarallisen kosketusjännitteen jännitteelle alttiille osille, jotka ovat yhdistettynä päämaadoituskiskoon. Nollavikaa käsitellään tarkemmin luvussa 3.3.

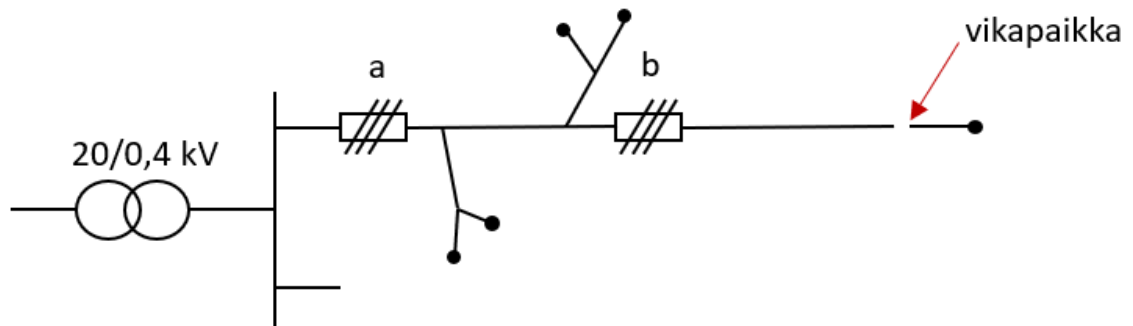
2.2 Pienjänniteverkon suojaus

Jakeluverkkojen suunnitteluvaiheessa otetaan huomioon verkossa tapahtuvat mahdolliset vikatilanteet. Pienjänniteverkon suojausten suunnittelussa keskeistä on verkkokomponenttien suojaus ja sähköturvallisuuden varmistaminen, ettei sähkölaitteisto aiheuta vaaraa hengelle, terveydelle tai omaisuudelle [7]. Pienjänniteverkossa tämä tarkoittaa käytännössä varokesuojausta ja riittävän hyviä maadoituksia.

Pj-verkon suojaustapa on tyypillisesti toteutettu sulakesuojauksella. Sulakkeet on sijoitettu ainakin jakelumuuntamoille kunkin lähdön kaikkiin vaihejohtimiin. Sulakkeet mitoitetaan siten, että ne kestävät kuormitusvirran, mutta pystyvät riittävän nopeasti katkaisemaan syötön johdon loppupäässä tapahtuvassa yksivaiheisessa oikosulussa. Yleisesti pidetään riittävän nopeana yksivaiheisen oikosulkuvirran syötön automaattisen katkaisujan olevan enintään 5 s. Verkonhaltijan harkinnan mukaan tämä voi olla pidempi, kuitenkin enintään 15 s. Jos näihin vaatimuksiin ei päästä, verkkoa joudutaan joko vahvistamaan tai asettamaan johdolle välivarokkeita. [4][5, s. 163]

Mikäli välivarokkeita käytetään, on niiden nimelliskoko valittava siten, että johtolähdön selektiivisyys säilyy. Välivarokkeiden on oltava nimellisvirroiltaan pienemmät, kuin mitä johtolähdön aikaisemmat varokkeet ovat. Tällöin esimerkiksi johdon loppupäässä tapahtuva vika ei aiheuta johdon alkupään varokkeiden palamista ja siten koko lähdön keskeytystä.

Kuvassa 4 on esitetty tyypillinen säteittäisen pienjänniteverkon sulakesuojauksella toteutettu suojausjärjestelmä. Kuvan 4 mukaisessa tapauksessa pieni-impedanssinen vika tapahtuu johdon loppupäässä. Välivarokkeiden b avulla vian vaikutusalue rajautuu välivarokkeiden b takaiselle johto-osuudelle. Sulakesuojaus on yksinkertainen tapa suojata verkkoa edullisesti ja tehokkaasti. Sulakepalot näkyvät lähdöllä kyseisen vaiheen jännitteettömyytenä. Aikaisemmin sulakepalot tulivat tietoon asiakkaiden tekemien vikailmoitusten kautta. Yksittäisellä vikailmoituksella ei kuitenkaan saada varmaa tietoa vian vaikutusalueesta.



Kuva 4. Tavallinen pienjänniteverkon suojausjärjestelmä. Muokattu [5, s. 163]

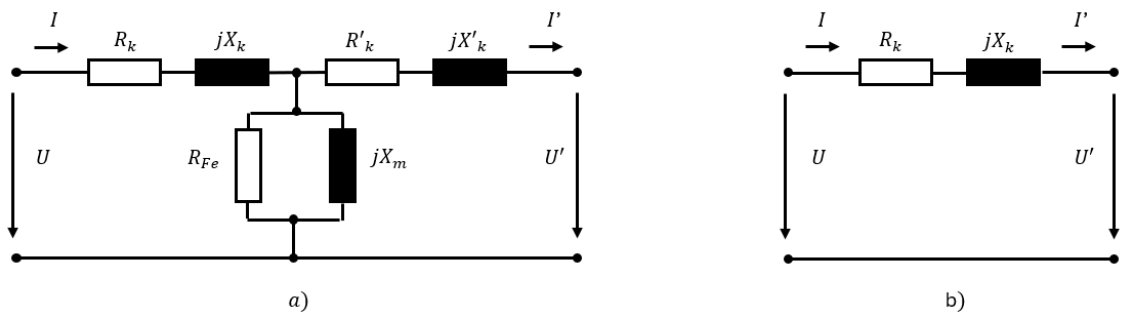
2000-luvun alussa etäluettavien mittareiden asennukset yleistyivät ja vuonna 2009 valtioneuvoston asetuksen myötä etäluettavat mittarit tulivat kaikille verkonhaltijoille pakolliseksi asennuttaa oman alueen käyttöpaikoille vuoden 2013 loppuun mennessä. [8] Älykkäiden sähkömittareiden myötä pj-vikojen tunnistamisesta on tullut tarkempaa ja nopeampaa. Verkko-yhtiön määrittämien lisätoiminnallisuuksien avulla verkon tilasta voidaan tuoda tietoa käyttötukijärjestelmään. Mittareiden tiedon kerääminen on lähes reaaliaikaista, joten tiedon suodatus on välttämätöntä datatulvan estämiseksi, jolloin ainoastaan määritellyt hälytykset tuodaan käyttötukijärjestelmään asti. Elenialla hälytyksiä tulee käyttötukijärjestelmään siihen saakka, kunnes hälytykseen on reagoitu. Hälytyksiä ei ilmesty käyttötukijärjestelmään, kun käyttötukijärjestelmässä hälyttävän mittarin käyttöpaikka on dokumentoitu keskeytyksen piiriin. Käyttötukijärjestelmään perustettu keskeytys ei välttämättä tarkoita sähkön täyskeskeytystä reaali-aikaisessa maailmassa, vaan jakelu (pj-verkossa lähes aina) jatkuu osittain, kunnes asentaja on erottanut lähdön esimerkiksi muuntamolta.

2.3 Jakelumuuntajat

Muuntajat ovat sähköverkossa keskeisiä komponentteja, joilla tarkoituksenmukaisesti muunnetaan jakeluverkon jännite toiselle jännitetasolle. [4, 10–1] Yleisimmät jakelumuuntajat keskijänniteverkossa ovat 20/0,4 kV jakelumuuntajia. Yleisimpiä jakelumuuntajia jakeluverkossa ovat pylväs- ja puistomuuntamot, mutta myös muita ratkaisuja on olemassa, kuten kiinteistöjen sisälle rakennettavat muuntamot. Tyypillisesti pylväsmuuntamoita käytetään ilmajohtoverkkojen yhteydessä harvaan asutuilla alueilla, joissa kuormitusta ei ole paljoa. Usein tällaisella alueella pylväsmuuntamon nimellisteho on alle 100 kVA. Puistomuuntamoita rakennetaan pääsääntöisesti maakaapeliverkon yhteyteen esimerkiksi taajama-alueelle, missä asukastiheys ja siten kuormitus on suurempaa. [5, s. 157]

Jakelumuuntamo on suojattava siten, etteivät ulkopuoliset pääse tahattomasti kosketuksiin jännitteisiin osiin. Tämän takia puistomuuntamot ovat suljettuja ja muuntamon komponentteihin pääsee käsiksi vain avaimilla tai työkaluilla. Pylväsmuuntamossa jännitteiset osat ovat yli 4 m korkeudella maasta, jolloin ulkopuolinen ei joudu tahattomasti kosketuksiin jännitteisten osien kanssa.

Jakelumuuntajat ovat pääsääntöisesti kaksikämmimuuntajia. Tehonjako- ja vikavirtalaskelmissa kaksikämmimuuntaja usein kuvataan pelkästään oikosulkuimpedanssillaan, jolloin laskelmat yksinkertaistuvat. Näin voidaan tehdä, koska tyhjäkäyntivirran suuruus suhteessa ensiöpuolen redusoituun kuormitusvirtaan on alle 1 %. Tyhjäkäyntihaara, kuten kuvan 5 a) -kohdassa kuvastaa muuntajan rautahäviöitä ja magnetointihäviöitä [4, 10–12]. Kytkeäntäsvirtalaskelmissa myös tyhjäkäyntivirta täytyy huomioida. [9, s. 130]



Kuva 5. a) Yksivaiheisen muuntajan sijaiskytkentä, tyhjäkäyntihaara huomioiden
b) muuntajan yksinkertaistettu sijaiskytkentä, tyhjäkäyntihaaraa ei huomioida.
Muokattu [4, 10–12]

Kuvan 5 b) -kohdassa yksinkertaistetusta sijaiskytkennästä on hyvä huomioida, että sijaiskytkennän oikosulkuresistanssin- ja reaktanssin arvot riippuvat onko sijaiskytkentä laadittu ensiö- vai toisiopuolelle. Oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi muodostavat oikosulkuimpedanssin, joka on esitetty yhtälön 2.1 avulla.

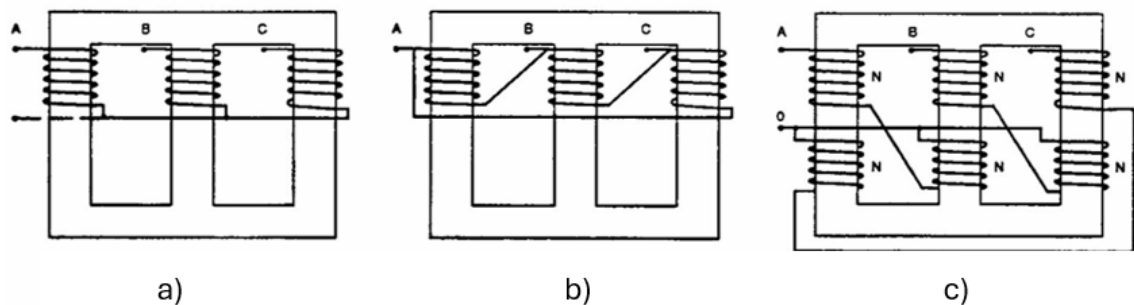
$$\underline{Z}_k = \underline{R}_k + j\underline{X}_k \quad (2.1)$$

Kuva 5 esittää yksivaiheisen muuntajan kytkentää, mutta kolmivaihemuuntajalle voidaan muodostaa vastaava yksivaiheinen sijaiskytkentä symmetrisessä tilanteessa. Tällöin yhtälön 2.1 mukainen oikosulkuimpedanssin määrittäminen voidaan laskea muuntajalle annetuista kilpiarvoista tai vaihtoehtoisesti määrittää ne oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeen tuloksista.

2.4 Jakelumuuntajan kytkentäryhmät

Jakelumuuntaja toimii keskijänniteverkon ja pienjänniteverkon rajapisteinä, joka erottaa ne galvaanisesti toisistaan. Jakelumuuntajan kytkentäryhmän valinnalla on vaikutusta siihen, kuinka kj-verkossa tapahtuva vika näkyy pienjänniteverkossa jännitteiden epäsymmetriana. Kytkeäryhmän valinnalla pyritään estämään pienjänniteverkon vian vikavirran pääsy keskijänniteverkkoon, mikä voi mahdollisesti aiheuttaa johtolähdön suo-
jauksen ei-halutun toiminnan.

Kolmivaihejärjestelmissä kuormat kytketään kolmioon tai tähteen. Sama pätee myös kolmivaihemuuntajien ensiö-, toisio- tai muiden käämitysten kytkemiseen. Muuntajissa toisipuolen kolmiokytkentään viittaa pieni kirjain d ja ensiöpuolen kolmiokytkentään vastaavasti iso kirjain D. Vastaavasti tähtikytkennälle käytetään kirjaimia y ja Y. Muuntajissa käytetään myös z-kytkentään eli niin sanottua hakatähtikytkentää. Hakatähtikytkennässä kullakin pylväällä olevat käämitykset puolitetään ja kunkin vaiheen käämitys koostuu kahdesta eri pylväällä olevasta käämin puolikkaasta. Hakatähtikytkentä vastaa tähtikytkentää, mutta etuna tähtikytkentään verrattuna on parempi epäsymmetrisen kuormituksen kestävyys muuntajalla ilman, että jännitteet alkavat vinoutua epäsymmetriseksi. [4, 10–15] [10] Kuvassa 6 on esitetty kolmivaihemuuntajan a) tähti- b) kolmio- ja c) hakatähtikytkennät.



Kuva 6. Kolmivaihemuuntajan peruskytkennät. a) tähti, b) kolmio ja c) hakatähti [4, 10–15]

Kolmio-, tähti- ja hakatähtikytkennän tunnuskirjaimien lisäksi N tai n kirjaimella ilmaistaan se, onko käämityksen nollapiste käytettävissä muuntajan kannella. Kirjain N tarkoittaa, että ensiökäämityksen nollapiste on tuotu kannelle ja vastaavasti kirjain n tarkoittaa, että toisiokäämityksen nollapiste on tuotu kannelle. Jakelumuuntajan kytkentäryhmä ilmaistaan kokonaisuudessaan esimerkiksi Yzn11.

Kytkeäryhmän tunnuksessa esiintyy kirjantunnusten lisäksi myös numero, joka kuvaa, mitä numeroa kellotaulussa toisiojänniteosoitin osoittaa. Peruskytkennöille (Dy, Yd tai

Yz) on ominaista, että vaihesiirtoa muodostuu ensiön ja toisiojännitteiden välille. Vaihesiirrot ovat 30 asteen kerrannaisia, eli vaihesiirto voi olla esimerkiksi 30, 60, 120, 150 jne. KytKentäryhmän numero on analogiaa kellotaulusta, joissa myös tuntien välinen ero on 30 astetta. Esimerkiksi kytKentäryhmässä Yzn11 toisiojänniteosoitin osoittaa kohti kello 11:sta, kun vastaavan vaiheen jännitteen ensiöjänniteosoitin osoittaa kello 12:sta. [10] Taulukkoon 1 on koottu kolmivaihemuuntajien standardoidut kytKennät

Taulukko 1. Kolmivaihemuuntajien standardoidut kytKennät. Muokattu [11]

Tunnusku	KytKentä	Osoitinkuvat		KytKennät	
		Ensiö	Toisio	Ensiö	Toisio
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Yleisimmät Suomessa käytetyt jakelumuuntajat ovat Dyn11- tai Yzn11-kytKentäisiä. Dyn11-kytKentäistä muuntajaa käytetään tyypillisesti, kun alueen kuormitus on yli 100 kVA, kuten esimerkiksi taajama-alueella. Yzn11-kytKentäistä muuntajaa on tyypillisesti käytetty alle 100 kVA:n kuormituksen alueilla, kuten haja-asutusalueilla. [4, 10–16] Elenian verkossa yleisimpiä jakelumuuntajia ovat Dyn11, Yzn11 ja ZNzn0. Dyn11-kytKentäisiä muuntajia on 74,7 %, Yzn11-kytKentäisiä muuntajia on 14,8 % ja ZNzn0-kytKentäisiä muuntajia on 10,5 % kaikista Elenian verkon jakelumuuntajista. [12] ZNzn0-kytKentäisiä muuntajia on asennettu kaapeliverkon yhteyteen. ZNzn0-kytKentäisen muuntajan ensiöpuolella on tähtipiste, johon voidaan tähtipisteen ja maan väliin asentaa sammutuskuristin kompensoimaan kaapeliverkon synnyttämää kapasitiivista maasulkuvirtaa. Maasulkuvirran kompensoinnista kerrotaan tarkemmin luvussa 3.2.2.

3. JAKELUVERKON EPÄSYMMETRISET VIAT

Verkon vikatilanteiden analysointi on oleellinen osa jakelujärjestelmän suunnittelua. Tavallisimpia vikoja ovat oiko- ja maasulut, mutta toisinaan esiintyy myös vaihekatkoksia. Vian symmetrisyydellä tarkoitetaan sitä, että ilmeneekö vika kaikissa vaiheissa ja vaikuttaako se niihin samalla tavoin. Epäsymmetrisiä vikoja ovat sellaiset viat, joissa vikojen vaikutukset näkyvät eri vaiheilla eri tavalla. [9, s. 166–167]

Tässä luvussa käsitellään epäsymmetrisiä vikoja sekä niiden vaikutusta pienjänniteverkkoon. Jakelumuuntaja toimii galvaanisena erottajana keskijänniteverkon ja pienjänniteverkon välillä. Suojauksen tarpeettoman toiminnan ehkäisemiseksi vikavirtojen kulkeminen muuntajan puolelta toiselle pyritään estämään. Jakelumuuntajien ja niiden käämitysten kytkennät vaikuttavat vikavirtojen siirtymiseen ja keskijänniteverkon jännite-epäsymmetrian siirtymiseen pienjänniteverkkoon. Usein vian aikainen vikavirta on suurta, jonka ansiosta sähköaseman suojaus havahtuu ja erottaa vikaantuneen lähdön muusta verkosta. Kuitenkin kj-vaihekatkoksen kaltaiset viat, joissa vikavirta jää pieneksi, jäävät usein verkkoon mahdollisesti pitkäksi aikaa. Kj-vaihekatkos jää verkkoon pitkäksi aikaa usein siitä syystä, ettei vikavirralla ole riittävän matalaimpedanssista reittiä takaisin syötölle. Koska kj-vaihekatkosta ei välttämättä saada erotettua automaattisesti, vaikuttaa vika vikapaikan takaiselle johto-osuudelle. Älykkäiden sähkömittareiden mahdollistaman pienjänniteverkon valvonnan myötä kj-vaihekatkosten aiheuttama jännite-epäsymmetria havaitaan mittarihälytysten avulla.

Luvussa 3.1 käsitellään lyhyesti symmetristen komponenttien teoriaa, joka mahdollistaa epäsymmetristen vikojen laskennan ja verkon kuvaamisen yksivaiheisena sijaiskytkentänä symmetristen komponenttien avulla. Luvussa 3.1.1 käsitellään kuinka muuntajan käämitysten kytkentä vaikuttaa nollajärjestelmän muodostumiseen ja siihen, kuinka nolavirta kulkee järjestelmässä. Luvussa 3.1.2 esitetään laskentapa, kuinka pienjänniteverkon jännite-epäsymmetria voidaan laskea, kun tiedossa on kj-verkon epäsymmetriset vaihejännitteet. Luvun 3.1 ja siihen kuuluvien alalukujen avulla ymmärretään paremmin epäsymmetrisiä tilanteita sekä tekijät, jotka vaikuttavat jännite-epäsymmetrian siirtymiseen jakelumuuntajan läpi.

Luvussa 3.2 esitetään tyypillisimpiä verkon symmetrisiä sekä epäsymmetrisiä vikatilanteita. Luvussa 3.2.2 käsitellään maasulkua sammutetussa verkossa ja siihen liittyviä maasulkuvirran kompensointitapoja. Luku 3.2.3 käsittelee keskijänniteverkossa tapahtu-

vaa vaihekatkosta ja sen aiheuttaman jännite-epäsymmetrian siirtymistä pienjänniteverkkoon yleisempien Elenian verkossa käytössä olevien jakelumuuntajien läpi. Luvussa hyödynnetään symmetristen komponenttien teoriaa kuvaamaan epäsymmetristä vaihekatkosta.

Luvussa 3.3. käsitellään nollavikoja, jotka ovat mahdollisia vain pienjänniteverkossa. Nollavian aikana ilmenee tyypillisesti vaihejännitteiden epäsymmetriaa. Epäsymmetrian suuruus riippuu kuormituksen epäsymmetrisyydestä, nollajohtimen jatkuvuudesta sekä käyttöpaikan maadoitusolosuhteista. Älymittareiden kyky tunnistaa nollavika tehostaa varsinaisen vikapaikan löytämistä. Älymittareiden ominaisuus automaattisesta käyttöpaikan eroon kytkennästä parantaa asiakasturvallisuutta nollavian aikana ja vähentää laiterikkoja.

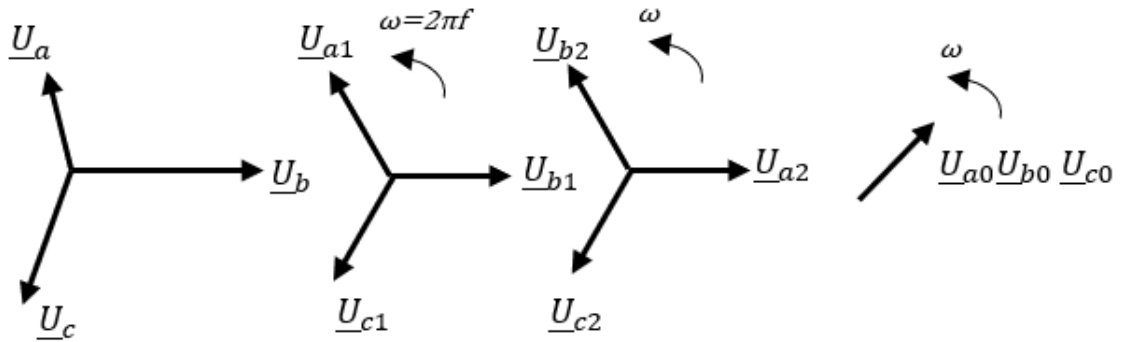
3.1 Symmetriset komponentit

Normaalissa käyttötilanteessa kolmivaiheista symmetrisesti käyttäytyvää sähköjärjestelmää voidaan kuvata yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Myös symmetrisissä vikatilanteissa, kuten kolmivaiheisessa oikosulussa, voidaan vikatilanne kuvata yksivaiheisena sijaiskytkentänä. Useat vikatilanteet ovat epäsymmetrisiä, jolloin yksivaiheista sijaiskytkentää ei voida muodostaa, koska vaihejännitteet eivät ole suuruudeltaan yhtä suuria ja vaihe-erot jännitteiden välillä eivät ole identtiset.

Epäsymmetristen vikojen laskemisen yksinkertaistamiseksi voidaan hyödyntää symmetristen komponenttien teoriaa. Symmetriset komponentit ovat matemaattinen menetelmä, jolla voidaan käsitellä erityisesti epäsymmetrisiä vikatilanteita kolmivaihejärjestelmässä. Epäsymmetriset sinimuotoiset kolmivaihesuureet voidaan esittää matemaattisesti kolmen symmetrisesti käyttäytyvän kolmivaiheisen vektorikomponentin summana. Symmetriset komponentit ovat myötä-, vasta- ja nollajärjestelmä. Kolmivaiheisen sähköjärjestelmän vaihejännitteet \underline{U}_a , \underline{U}_b ja \underline{U}_c voidaan esittää kyseisen vaiheen symmetristen komponenttien summana kaavan 3.1 mukaisesti. [13][14, s. 382]

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} + \underline{U}_{b0} \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} + \underline{U}_{c0}\end{aligned}\tag{3.1}$$

Kaavassa 3.1 alaindeksit 1 viittaa myötäjärjestelmän, 2 viittaa vastajärjestelmän ja 0 viittaa nollajärjestelmän komponentteihin. Kuvassa 7 on havainnollistettu, kuinka epäsymmetrinen järjestelmä esitetään sen myötä-, vasta- ja nollajärjestelminä.



Kuva 7. Epäsymmetrinen kolmivaihejärjestelmä sekä sen myötä-, vasta- ja nolla-järjestelmät. Muokattu [13, s. 57][15, s. 20]

Kuvan 7 mukaisesti epäsymmetrisen kolmivaihejärjestelmän jännitteet jaetaan kolmeen osaan siten, että myötäjärjestelmässä vaihejärjestys on a-b-c ja vastajärjestelmässä vaihejärjestys on a-c-b. Myötä- ja vastajärjestelmissä vektoreiden välinen kulma on 120 astetta. Nollajärjestelmässä kaikki vaihejännitteet ovat samansuuntaisia ja yhtä suuria. Koska nämä kolme järjestelmää itsessään ovat symmetrisiä, riittää, että tarkastellaan yhtä vaihetta kerrallaan, kuten a-vaihetta. A-vaiheen arvoista saadaan määriteltyä b- ja c-vaiheen jännitteiden arvot hyödyntämällä vaihesiirto-operaattoria $\underline{\alpha}$, joka on määritelty yhtälön 3.2 mukaisesti.

$$\underline{\alpha} = 1 \angle 120^\circ = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.2)$$

Vaihesiirto-operaattorilla $\underline{\alpha}$ kertominen merkitsee vektoriosoittimen kääntymistä 120 asteen verran vektorin pituuden säilyessä samana. Tätä hyödyntämällä voidaan a-vaiheen jännitteestä saada b- ja c-vaiheen jännitteiden osoittimet kertomalla a-vaiheen jännitteen osoitinta α^2 :lla tai α :lla. Vaihejännitteet b ja c voidaan tällöin esittää a-vaiheen symmetrisillä jännitekomponenteilla matriisiyhtälön 3.3 mukaisesti.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Matriisiyhtälöstä 3.3 huomataan, että symmetriset komponentit voidaan lausua sähköjärjestelmän vaihejännitteistä seuraavasti matriisiyhtälön 3.4 mukaisesti.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Vastaavalla tavalla kuin jännitteille, voidaan epäsymmetriset virrat lausua symmetristen virtakomponenttien avulla seuraavasti matriisiyhtälön 3.5 mukaisesti.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

missä \underline{I}_a , \underline{I}_b ja \underline{I}_c kuvaavat kolmivaiheisen järjestelmän vaihevirtoja a, b ja c, ja vastavasti virtojen symmetriset komponentit voidaan lausua epäsymmetrisen järjestelmän vaihevirroista matriisiyhtälön 3.6 mukaisesti.

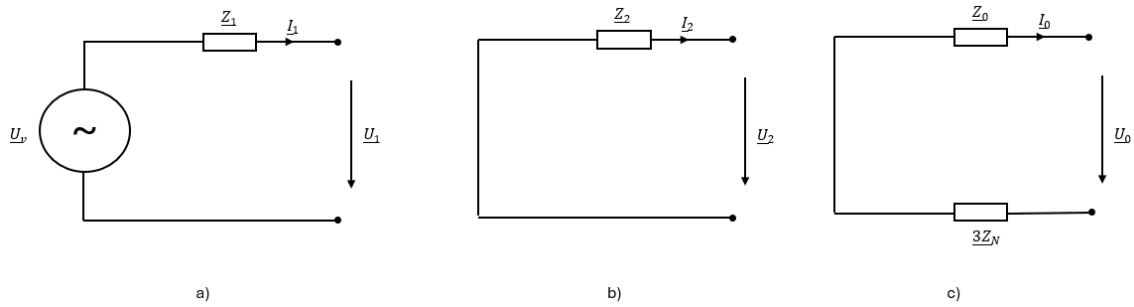
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Kun tarkastellaan matriisiyhtälöä 3.6 huomataan nollavirran yhtälöstä $\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c)$, että nollavirtaa muodostuu, kun vaihevirtojen summa poikkeaa nolasta. Vaihevirtojen summa poikkeaa nolasta, kun vaihejännitteet ovat epäsymmetriset. Tämä havainto osaltaan selittää miksi epäsymmetristen vikatilanteiden osalta mahdollisilla tähtipisteen maadoituksilla on keskeinen merkitys. [16, s. 154] Jos järjestelmässä ei ole nollajohdinta tai tähtipistettä ei ole maadoitettu ei nollavirtaa voi tällöin esiintyä, sillä nollavirralla ei ole kulkureittiä takaisin syötölle [9, s. 180]. [14, s. 382–400]

Jos komponenttiverkkojen impedanssit on tunnettu, voidaan symmetriset vaihekomponentit esittää impedanssi- ja virtakomponenttien avulla:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_v - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 \\ \underline{U}_2 &= -\underline{I}_2 \underline{Z}_2 \\ \underline{U}_0 &= -\underline{I}_0 \underline{Z}_0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

missä \underline{U}_v kuvaa verkon vaihejännitettä ennen vikaa, \underline{Z}_1 kuvaa myötäjärjestelmän impedanssia, \underline{Z}_2 kuvaa vastajärjestelmän impedanssia ja \underline{Z}_0 nollajärjestelmän impedanssia. \underline{I}_1 , \underline{I}_2 ja \underline{I}_0 kuvaavat myötä-, vasta- ja nollajärjestelmän virtoja. [9, s. 182][14, s. 382–400] Kuvassa 8 on esitetty Thevenin ekvivalentit yhtälölle 3.7. Thevenin ekvivalentti on matemaattinen menetelmä, jota voidaan hyödyntää kuvaamaan monimutkainen sähköjärjestelmä yksivaiheisena sijaiskytkentänä Thevenin jännitelähteen ja Thevenin impedanssin avulla.



Kuva 8. Yksivaiheiset sijaiskytkennät a) myötäjärjestelmälle b) vastajärjestelmälle c) nollajärjestelmälle. Muokattu [9, s. 184]

Kukin komponenttivirta kohtaa oman verkkoimpedanssinsa, kuten yhtälöistä 3.7 huomataan ja havainnollistettu kuvassa 8. Myötä- ja vastajärjestelmien impedanssit ovat yhtä suuret symmetrisessä järjestelmässä. Nollajärjestelmän impedanssi poikkeaa selvästi myötä- ja vastajärjestelmästä. Yhtälössä 3.8 on esitetty kunkin järjestelmän kohtaamat verkkoimpedanssit yksinkertaistetussa muodossa.

$$\begin{aligned}\underline{Z}_1 &= \underline{Z}_2 = \underline{Z} \\ \underline{Z}_0 &= \underline{Z} + 3\underline{Z}_N\end{aligned}\quad (3.8)$$

missä \underline{Z}_N on tähtipisteen ja maan väliin kytketty impedanssi. Tähtipisteen ja maan väliin kytketty impedanssi kuvataan nollajärjestelmässä kolminkertaisena, koska kaikkien kolmen vaiheen nollavirta kulkee impedanssin läpi. [9, s. 182]

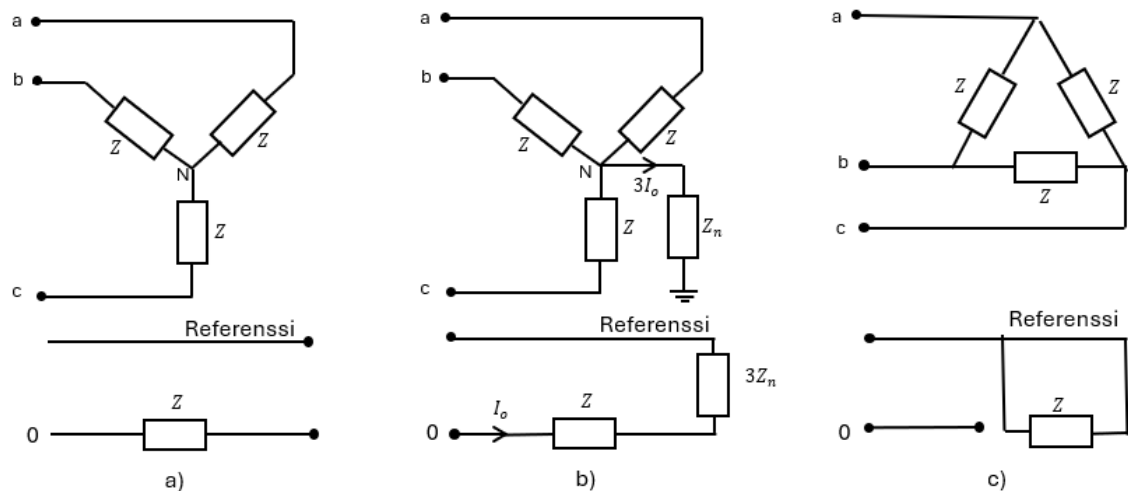
Epäsymmetristen vikatilanteiden tarkastelussa symmetristen komponenttien menetelmä osoittaa tehokkuutensa, kun verkossa on yksi epäsymmetrinen vika ja syöttölähteen jännite on symmetrinen ja oletus yksisuuntaisesta syötöstä. Epäsymmetrisestä viasta voidaan muodostaa symmetriset myötä-, vasta- ja nollajärjestelmät, jotka tilanteen hahmottamiseksi ja laskentojen yksinkertaistamiseksi, kytketään toisiinsa epäsymmetristä vikatilannetta vastaavaksi. [9, s. 166–189]

3.1.1 Kytkentäryhmän vaikutus nollaimpedanssiin

Muuntajien myötä- ja vastaimpedanssit ovat yleensä hyvin lähellä toisiaan. Nollaimpedanssin osalta keskeistä on, onko muuntajan käämien mahdollista tähtipistettä maadoitettu ja mikä on muuntajan kytkentäryhmä. Kuten aikaisemmin todettu luvussa 2.3, kolmivaihejärjestelmän kuormat ovat kolmio- tai tähtikytkentäisiä. Jakelumuuntajien käämitusten kytkennät voivat olla kolmio- ja tähtikytkennän lisäksi myös hakatähtikytkentäisiä. Hakatähtikytkentää voidaan kytkentätavan osalta käsitellä tähtikytkentäisenä. [9, s. 190]

Tähtikytkennän tähtipiste voidaan kytkeä maahan impedanssin kautta tai jättää kokonaan maadoittamatta. Maadoittamattomana nollajärjestelmään ei pysty muodostumaan virtaa, koska tähtipisteestä ei ole paluuyhteyttä takaisin syöttöön. Tämän takia maasta erotetun verkon nollajärjestelmän impedanssi on teoriassa ääretön. Jos tähtipiste on maadoitettu tai tähtipisteeseen on kytketty virran paluujohdin, saa nollajärjestelmän impedanssi tällöin äärellisen arvon, joka voidaan esittää yhtälön 3.8 mukaisesti. [9, s. 190]

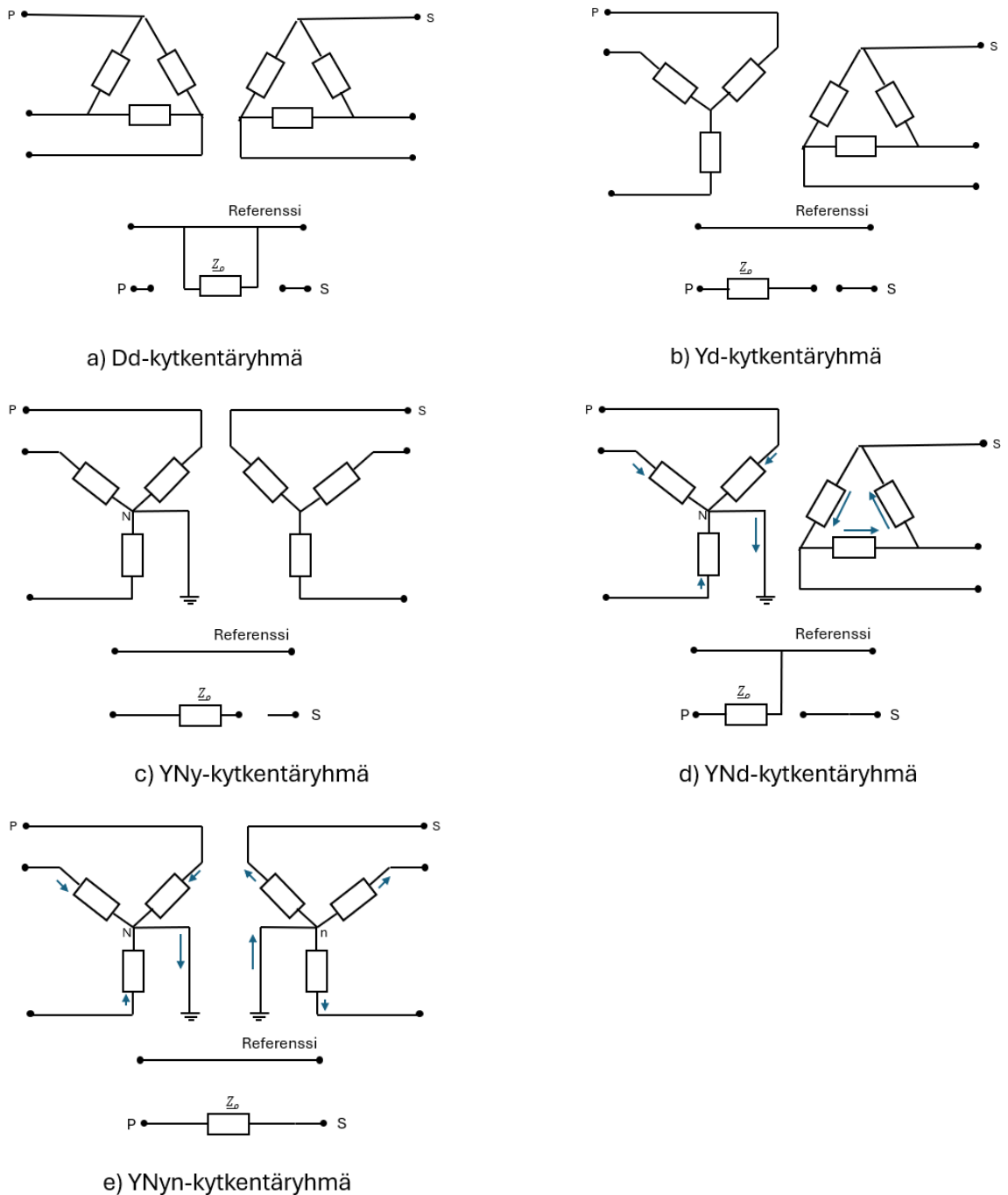
Kolmioon kytketystä järjestelmästä puuttuu paluujohdin, jolloin nollavirta ei pääse kiertämään järjestelmässä. Tästä voidaan päätellä myös, että nollajärjestelmän impedanssi on ääretön. Nollavuoroista virtaa voi indusoida kolmiokytkennän sisälle, mutta nollavirtaa ei voida kolmiokytkentään syöttää nollajohtimen puuttuessa. Indusoitumalla muodostunut nollavuoroinen virta kiertää kolmion sisällä. [9, s. 190] Kuvassa 9 on esitetty tähteen ja kolmioon kytkettyjen järjestelmien kytketyminen nollajärjestelmässä.



Kuva 9. Tähteen (a ja b) ja kolmioon (c) kytkettyjen kuormien kytketyminen nollajärjestelmässä. Muokattu [9, s. 191]

Yksinkertaistettu kaksikämmimuuntaja koostuu kahdesta käämityksestä; ensiö- ja toisiokäämityksestä. Tähtipisteen käsittelyssä muuntajilla pätee erikoisominaisuus nollavirran kulkemiselle. Nollavuoroista virtaa voi kulkea ensiössä ainoastaan siinä tapauksessa, mikäli toisiokäämityksessä tai jossakin toisessa käämityksessä kulkee nollavuoroista virtaa. Tämä pätee myös toisinpäin. Nollaimpedanssin suuruuden osalta on ratkaisevaa, onko käämejä maadoitettu ja mikä on muuntajan kytkentäryhmä. Lisäksi nollaimpedanssin suuruuteen vaikuttaa kuinka nollavuo pääsee magneettipiirissä kulkemaan muuntajan sisällä. Näiden tekijöiden mukaan nollaimpedanssin suuruus voi poiketa paljon myötäjärjestelmän impedanssista. [16, s. 157] Magneettipiirin rakenne määrää missä ja kuinka nollavuoroinen magneettivuo muuntajan sisällä pystyy kulkemaan. Jos magneettivuo on hyvin pieni tai sitä ei ole, ei muuntajan toisioon indusoidu nollavuoroista virtaa,

jolloin muuntaja katkaisee nollavuoroisen virran kulkureitin ensiöstä toisioon. [9, s. 195]
 Kuvan 10 avulla on havainnollistettu kytkentäryhmän vaikutus järjestelmän nollaimpe-
 danssiin ja sinisillä nuolilla on kuvattu nollavirran kulkua muuntajan käämien läpi, jos
 kulku on mahdollista.



Kuva 10. Kaksikämmimuuntajan kytkentäryhmien vaikutus nollavirran kulkuun.
 Muokattu [9, s. 197]

Koska nollaimpedanssin arvo riippuu monesta tekijästä, on taulukkoon 2 koottu ohjeellisia arvoja eri kytkentäryhmien nollaimpedansseille.

Taulukko 2. Muuntajien suhteellisia nollaimpedanssien ohjearvoja. Muokattu [16]

Muuntajasydän	Yy	Dy	Yz	Zz
Kolmipylväsmuuntaja	3..10	0,65..0,9	0,10..0,15	0,10..0,15
Viisipylväsmuuntaja	10..100	1	0,10..0,15	0,10..0,15
Kolmesta yksivaiheisesta muuntajasta koottu kolmivaihemuuntaja	10..100	1	0,10..0,15	0,10..0,15

Taulukon 2 nollaimpedanssien arvot ovat suhteellisia arvoja muuntajan myötäimpedanssien suuruuteen. Erisuuruiset arvot kolmipylväs- ja viisipylväsmuuntajan välillä johtuvat osittain siitä, kuinka nollavuoroinen magneettivuo pääsee muuntajassa kulkemaan epäsymmetrian aikana. Viisipylväsmuuntajissa nollavuonon kulkua varten on erillinen pylväs, kun kolmipylväsmuuntajissa nollavuoroinen vuo kulkee muuntajan kotelo pitkin tertiäärikäämityksen vaikutuksesta. Dy-kytkentäisissä muuntajissa kotelo toimii ikään kuin toisena kolmiokäämityksenä, minkä takia nollaimpedanssi on pienempi kuin myötäimpedanssi. [9, s. 195–200]

Muuntaja, jossa on toisiokäämityksenä hakatähtikytkentä, kuten Dz- tai Yz-kytkentäiset muuntajat, nollaimpedanssi määräytyy ainoastaan hakatähtipuolelta. Tämä voidaan johtaa siitä, että nollavirtojen eri vaiheiden välillä suuruudet ja kulmat ovat identtiset yhtälön 3.9 mukaisesti.

$$\underline{i}_{a0} = \underline{i}_{b0} = \underline{i}_{c0} \quad (3.9)$$

Hakatähtikytketyn muuntajan vaihekäämit puolitetaan kahdelle eri pylväällä ja kytketään toisen vaiheen käämin, jonka napaisuus on vastakkainen. Tällaisella kytkennällä kummankin vaiheen nollavirtakomponenttien luomat hajavuot, jotka niin ikään ovat samassa vaiheessa yhtälön 3.9 mukaisesti, kumoavat toisiaan. Koska vaiheiden nollahajavuot kumoutuvat tai jäännöshajavuo on hyvin pieni, on nollareaktanssi myös hyvin pieni. Nollavuoroinen hajavuon on ollessa hyvin pieni tai jos sitä ei ole, ei nollavirtaa pysty indusoimaan toiselle käämille. [17]

3.1.2 Kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen

Muuntajien kytkentäryhmät aiheuttavat vaihesiirtoa virtoihin ja jännitteisiin toisiopuolelle, mikä on huomioitava epäsymmetristen vikojen laskennassa. Vaihesiirron suuruuteen vaikuttaa kuinka muuntajan toisiokäämien navat ovat kytketty ja mihin pylvääseen ne ovat kytketty suhteessa ensiökäämien napoihin. Esimerkiksi jakeluverkoissa yleisin muuntajan kytkentäryhmä on Dyn11, jolloin toision vaihejännitteet ovat 30 astetta edellä kuin saman pylvään ensiön pääjännite. Myötäjärjestelmän vaihesiirto muuntajan lävitse on myös 30 astetta edellä. Vastajärjestelmän vastakkainen pyörimissuunta myötäjärjestelmään verrattuna pätee myös muuntajiin. Blackburn on todennut kaikille vaihesiirtoa aiheuttaville muuntajien kytkentäryhmille, että vastajännitteiden vaihesiirto on vastakkaismerkkinen myötäjärjestelmän vaihesiirrolle. [18, s. 59–63] Esimerkiksi kytkentäryhmän Dyn11 tapauksessa vastajärjestelmän vaihesiirto muuntajan läpi on 30 astetta jäljessä, koska myötäjärjestelmän vaihesiirto on muuntajan läpi 30 astetta edellä.

Koska muuntajien käämitysten eri kytkennöillä on merkitystä epäsymmetrian siirtymiseen muuntajan läpi ja erityisesti nollajärjestelmän muodostumiseen, voidaan muuntajat jakaa kolmeen eri tyyppiin käämien kytkentätavan perusteella:

1. Muuntajat, joissa ei tapahdu muutosta jännitteisiin muuntajan läpi suhteellisarvoissa. Suhteellisarvoiltaan jännitteet ja kulmat ovat yhtä suuret ylä- ja alajännitepuolella. Tämä toteutuu ainoastaan Y-y kytkentäryhmällä, jossa ensiö- ja toisiokäämien tähtipisteet ovat molemmat maadoitettu eli YNyn-kytkentäisellä muuntajalla
2. Muuntajat, joissa nollavirralla ei ole kulkureittiä muuntajan läpi, mutta jännitteet ja kulmat ovat yhtä suuret suhteellisarvoiltaan. Tällaisia muuntajia ovat Yy-kytkentäiset muuntajat, joista yhtä tai kahta tähtipistettä ei ole maadoitettu, Dd-kytkentäiset muuntajat sekä Dz-kytkentäinen muuntaja. Tähän kuuluu myös Zz-kytkentäinen muuntaja, koska nollapiiri katkeaa z-kytkennän läpi mentäessä riippumatta tähtipisteiden maadoituksista, kuten kappaleessa 3.1.1 todettiin
3. Muuntajat, joiden käämijännitteet muodostuvat ensiöpuolen pääjännitteistä, jolloin vaihekulma muuttuu. Muuntaja katkaisee nollavuoroisen virran kulun ensiön ja toision välillä. Tällaisia muuntajia ovat Dy-, Yd- tai Yz-kytketyt muuntajat. [19, s. 190]

Jännitteen siirtyminen käämitysten välillä voidaan matemaattisesti esittää matriisiyhtälönä 3.10.

$$\mathbf{u}_v = \mathbf{T}\mathbf{U}_v, \quad (3.10)$$

missä \mathbf{u}_v on alajännitepuolen vaihejännitteiden suhteellisarvot, \mathbf{T} on muuntajan kytkennästä riippuvainen matriisi ja \mathbf{U}_v on yläjännitepuolen vaihejännitteiden suhteellisarvot. Edellä listatut kolme muuntajatyyppeä voidaan esittää matemaattisesti seuraavien matriisien avulla:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_2 &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_3 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

\mathbf{T}_1 on yksikkömatriisi, \mathbf{T}_2 on matriisi, jossa nollavirtapiirin kulkureitti katkeaa muuntajan lävitse ja \mathbf{T}_3 on matriisi, joka on johdettu kolmio-tähti-kytkennän jännitteiden suuruksien ja kulmien muutoksesta. Muuntaja kategorian 3 matriisista \mathbf{T}_3 huomataan, että $\mathbf{T}_3^2 = \mathbf{T}_2$. Tämä tarkoittaa matemaattisesti, että sarjaan kytketty kategorian 3 muuntaja vastaa kategorian 2 muuntajaa jännitteen epäsymmetrian siirtymisessä muuntajan lävitse. [19, s. 188–191]

Elenian verkossa 89,5 % jakelumuuntajista kuuluvat muuntajatyyppeihin 3. Nämä jakelumuuntajat ovat Dyn11- ja Yzn11-kytkentäiset jakelumuuntajat. Muuntajatyyppeihin 2 kuuluvat loput 10,5 % jakelumuuntajista. Hyödyntämällä tässä luvussa esitettyä teoriaa, voidaan tyyppiin 2 kuuluva ZNzn0-kytkentäinen muuntaja mallintaa luvussa 7 simuloineissa samaan muuntajatyyppeihin kuuluvan Yyn0-kytkentäisen muuntajan avulla.

3.2 Kj-verkon epäsymmetriset viat ja niiden vaikutus pj-verkoon

Suurin osa keskijänniteverkoissa tapahtuvista vioista ovat epäsymmetrisiä vikoja. Epäsymmetriset viat aiheuttavat jännite-epäsymmetriaa jakeluverkkoon. Keskijänniteverkon vikojen tunnistamiseen käytetään sähköasemalla suojaireleitä, joille on määritelty tietyt ehdot, milloin rele lähettää käskyn katkaisijalle vikaantuneen johtolähdön laukaisua varten.

Perinteisiä keinoja tunnistaa vika on mitata vikavirtaa. Verkossa tapahtuvat oikosulut aiheuttavat suuren vikavirran, joka on riippuvainen verkon rakenteesta ja oikosulun sijainnista verkossa. Verkon suojaussuunnittelu edellyttää vikojen aikaisten virtojen tietämistä. Suurimpien ja matalimpien vikavirtojen perusteella valitaan kustannustehokkaasti verkon komponentit suojausta varten. Releillä ja sulakkeilla toteutettu verkon suojaus ei toimi, jos niiden toiminta-asettelu on korkeampi kuin matalin vikavirta. Toiminta-asettelu ei saa olla niin pieni, että normaali kuormitusvirta aiheuttaisi ei-halutun suojauksen toiminnan. [5, s. 176–181]

Verkon viat eivät aina aiheuta suurta vikavirtaa. Tällaisia vikoja ovat esimerkiksi suuriresistanssiset maasulut sekä kj-vaihekatkokset, joihin mahdollisesti sisältyy johtimen suuriresistanssinen maakosketus. Vikavirran tai muiden suojauksessa käytettyjen suureiden jäädessä suojausasettelujen alapuolelle, ei rele tunnista tällöin vikaa.

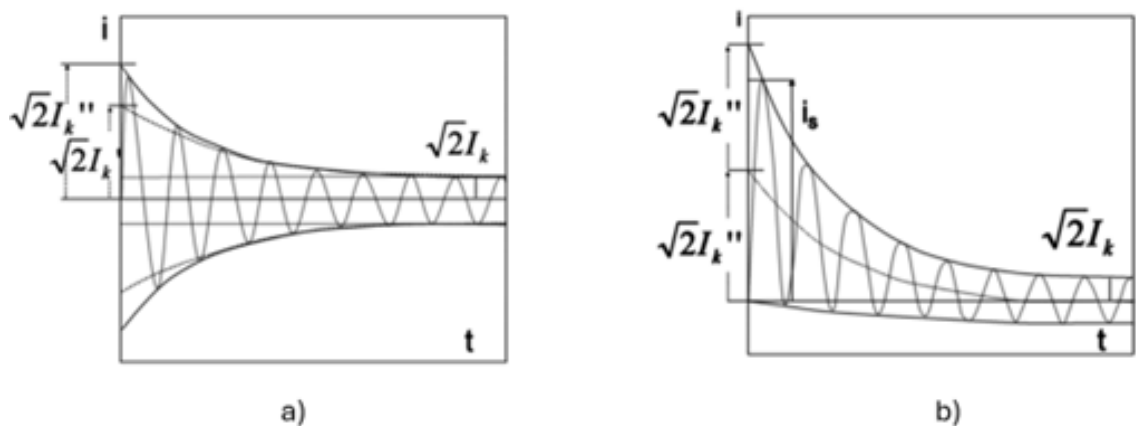
3.2.1 Kolmi- ja kaksivaiheinen oikosulku

Oikosulku on vika, jossa sähköverkon virtapiiri on sulkeutunut suoraan, valokaaren tai vikaimpedanssin kautta. Oikosulku voi muodostua kahden tai kolmen johtimen välille, ja sille on ominaista normaalia kuormitusvirtaa moninkertaisempi virta. Oikosulku voi muodostua myös johtimien ja maan välille, tällöin puhutaan maasulusta. Maasulun aikainen vikavirta riippuu verkon rakenteesta, maadoitustavasta ja maasulun vikaimpedanssista. [5, s. 28] Keskijänniteverkon maasulkuä käsitellään omassa alaluvussa 3.2.2.

Kolmivaiheinen oikosulku voi olla symmetrinen tai epäsymmetrinen vika. Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen, mikäli oikosulku tapahtuu hetkellä, jolloin jokin vaihejännite on huippuarvossa juuri vian alkamisaikana, jolloin vaimentava tasavirtakomponentti $I_{DC} = 0$. Epäsymmetrisessä oikosulussa tasavirtakomponentilla on äärellinen arvo. Tasavirtakomponentti sekä alkuoikosulku- ja muutosoikosulkuvirtakomponentit vaimenevat, kunnes vikavirta saavuttaa jatkuvan tilan. Jatkuvan tilan kolmivaiheinen oikosulku-

virta käyttäytyy symmetrisesti. Alkuvaihe oikosulku ja muutosvaihe oikosulku ovat erittäin nopeita ilmiöitä, joiden kesto on yhteensä muutama jakso. [9, s. 171] Tässä työssä ei käsitellä transientti-ilmiöitä, koska niillä ei ole vaikutusta sähkömittareiden muodostamiin häilytyksiin. Häilytysten muodostamiseen käytetään 3 s ja 30 s keskiarvollisia aikoja, jotka ovat huomattavasti pidempikestoisia kuin transientti-ilmiöiden kesto aika. Mittarihäilytysten muodostuminen esitellään tarkemmin luvussa 4.3.

Kuvassa 11 on havainnollistettu induktiivisen oikosulkuvirran kehitys sekä symmetrisessä että epäsymmetrisessä oikosulussa. Molemmissa tapauksissa oikosulkuvirran kehitys johtaa oikosulkuvirran kerrostumiseen verkon kuormitusvirtaan. [9, s. 171]



Kuva 11. Induktiivisen oikosulkuvirran kehitys a) symmetrisessä b) epäsymmetrisessä oikosulussa [9, s. 171]

Kolmivaiheisen oikosulun jatkuvan tilan vikavirran suuruus voidaan laskea Thevenin yksivaiheisesta sijaiskytkennästä, joka on esitetty yhtälössä 3.12

$$I_{k3} = \frac{U_v}{Z_{th} + Z_f} \quad (3.12)$$

missä I_{k3} on kolmivaiheisen oikosulun vikavirran suuruus, U_v on ennen vikaa vaikuttanut vaihejännite, Z_{th} on verkolle muodostettu Thevenin impedanssi vikapaikasta katsottuna ja Z_f on vikaimpedanssi. Yhtälön 3.12 mukaisesti oikosulkuvirran suuruus riippuu eniten vikapaikalta nähdystä Thevenin impedanssista. Suurin vikavirta aiheutuu johdon syöttökohdan välittömässä läheisyydessä, kun taas matalin vikavirta syntyy lähdon loppupäässä. [5, s. 29]

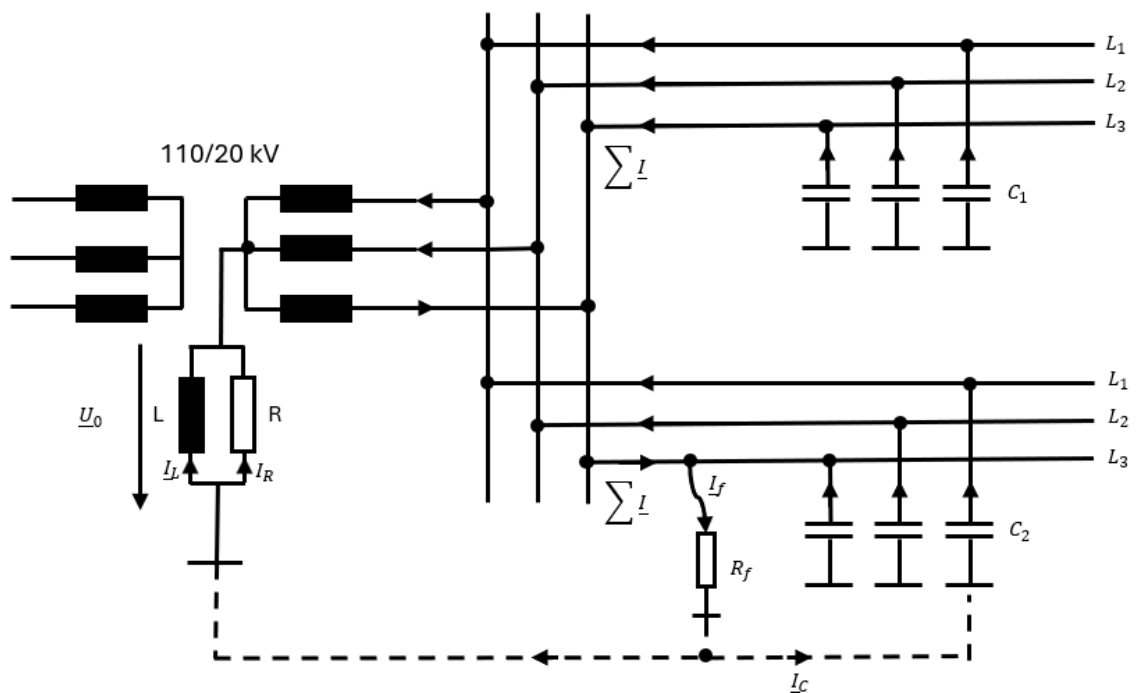
Kaksivaiheinen oikosulku tapahtuu kahden vaihejohtimen välillä. Joissakin tapauksissa kaksivaiheoikosulussa on yhteys maahan. Kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vika, joten sen tarkastelussa on hyödynnettävä symmetristen komponenttien teoriaa. Siinä, missä kolmivaiheinen oikosulku lähellä syöttöä aiheuttaa suurimman vikavirran, niin pienin oikosulkuvirta aiheutuu kaksivaiheisesta oikosulusta johdon loppupäässä. Jos

riittää tieto johdon pienimmästä oikosulkuvirrasta, vikavirran suuruus saadaan laskettua Thevenin menetelmää hyödyntäen. Kaksivaiheisen oikosulun vikavirran suuruus on arviolta $\frac{\sqrt{3}}{2}$ -kertainen kolmivaiheisen oikosulkuvirtaan nähden. [5, s. 29]

Oikosuluissa vikavirrat ovat hyvin suuret, jonka takia oikosulut aiheuttavat jännitekuopan koko sähköaseman kiskoon, näkyen terveiden johtolähtöjen asiakkaille jännitekuopana. Jännitekuopan kestoaika on yhtä suuri kuin oikosulun kestoaika. Oikosulun kesto-aika jää lyhyeksi, mikäli suojausasettelut ovat oikein määritellyt. [5, s. 31–33, s. 176–181]

3.2.2 Maasulku ja maasulkuvirran kompensointi

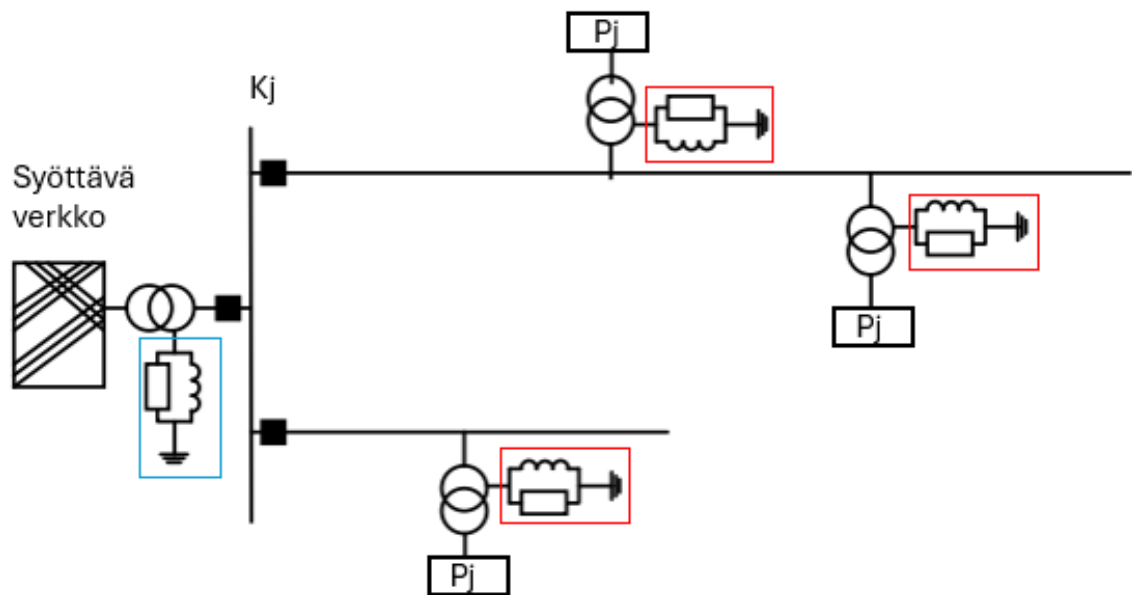
Maasulkuvika tarkoittaa verkon virtapiiriin sulkeutumista jännitteisen osan ja maan välille. Virtapiiri voi sulkeutua joko suoraan tai johtavan väliaineen kautta maahan. Suomessa keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmä on joko maasta erotettu tai sen yleisempi erikoismuoto, sammutettu verkko. Erotetussa verkossa tai sammutetussa verkossa maasulun aikana ei ole galvaanista reittiä maasulkuvirralle, vaan maasulkutilanteessa vikavirtapiiri kytkeytyy verkon vaiheiden ja maan välisen kapasitanssien eli maakapasitanssien kautta. Kuvassa 12 on esitetty maasulku sammutetussa verkossa.



Kuva 12. Vikavirran kulku sammutetun verkon yhden vaiheen maasulussa. Muokattu. [5 s. 185]

Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteet ovat maadoitettu sammutuskuristimien kautta. Sammutuskuristimen eli Petersénin kelan tehtävä on kompensoida maasulun aikana verkon synnyttämää kapasitiivista maasulkuvirtaa syöttämällä verkkoon puhtaasti induktiivista virtaa. Kompensoinnin seurauksena maasulun aikainen vikavirran suuruus laskee ja samalla maasulun aikaiset maadoitusjännitteet pysyvät hyväksyttävällä tasolla, eikä vikapaikassa sallitut kosketusjänniterajat ylitä. Sammutuskuristimen rinnalle on usein kytketty tai on mahdollista kytkeä lisävastus. Lisävastuksen tehtävä on kasvattaa maasulkuvirran resistiivisen virran suuruutta, jotta sähköaseman lähdön suojaire tunnistaa maasulkutilanteen helpommin. [5, s. 189][20, s. 13–22]

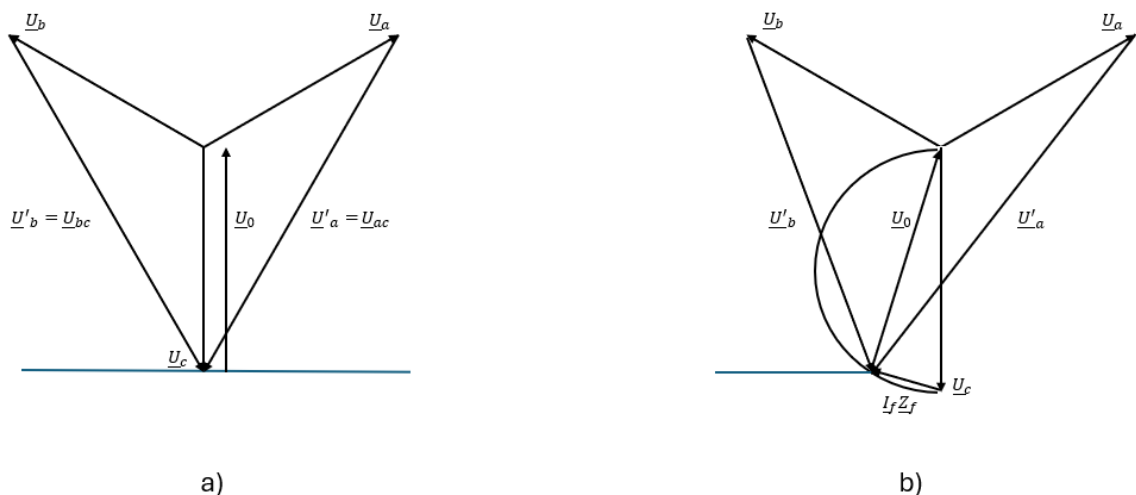
Maasulkuvirran kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti, jolloin kompensointikela on kytketty 110/20 kV päämuuntajan tähtipisteeseen ja maan väliin. Elenian verkossa päämuuntajat ovat YNd-kytkentäisiä, jolloin tähtipistettä ei ole saatavilla suoraan päämuuntajan toisiopuolelta. Tähtipiste muodostetaan erillisen ZNyn-kytkentäisen maadoitusmuuntajan avulla. Petersénin kela kytketään maadoitusmuuntajan ja maan väliin. [20] Maasulkuvirran kompensointi voidaan toteuttaa myös hajautetusti. Tällöin Petersénin ke- loja on asennettu verkon varrelle kompensoimaan tietyn johto-osuuden paikallisesti tuot- tamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa. [20, s. 13–22] Kuvassa 13 on esitetty sekä keski- tetty (sinisellä) että hajautettu (punaisella) maasulkuvirran kompensointiratkaisu ver- kossa.



Kuva 13. Keskitetty ja hajautettu maasulkuvirran kompensointi. [21]

Elenian verkossa hajautetun maasulkuvirran kompensointilaitteisto on asennettu ZNzn0-kytkentäisten muuntajien avulla. Tämä luo tähtipisteen verkon keskijännitepuolelle, jolloin tähtipisteen ja maan väliin voidaan kytkeä sammutuskuristin. Samalla ZNzn0-kytkentäinen muuntaja toimii jakelumuuntajana. Luvussa 3.1.2 todettiin, että ZNzn0-kytkentäiselle muuntajalle on ominaista hakatähtikytkennän ansiosta, ettei maasulun aikainen nollavuoroinen virta pääse indusoitumaan ensiön ja toision välillä. Jos nollavuoroinen virta pääsee indusoitumaan jakelumuuntajassa ensiön ja toision välillä, on mahdollista kohdata virheellisiä suojauslaukaisuja yläjännitepuolen suojauksessa pienjänniteverkossa tapahtuvan maasulun takia. [20, s. 55]

Maasulun aikana verkon terveiden vaiheiden ja maan välinen jännite saattaa kohota jopa suuremmaksi kuin normaalitilassa vaiheiden välinen pääjännite, kuten kuvassa 14 on havainnollistettu. Ylijännitteen suuruus riippuu vahvasti vikapaikalla vaikuttavasta vikaimpedanssista. Syntyvien ylijännitteiden suuruus ilmoitetaan maasulkukertoimen k avulla. Maasta erotetun tai sammutetun verkon maasulkukerroin on yleisesti $k \approx 1,8$. [22, s. 15]



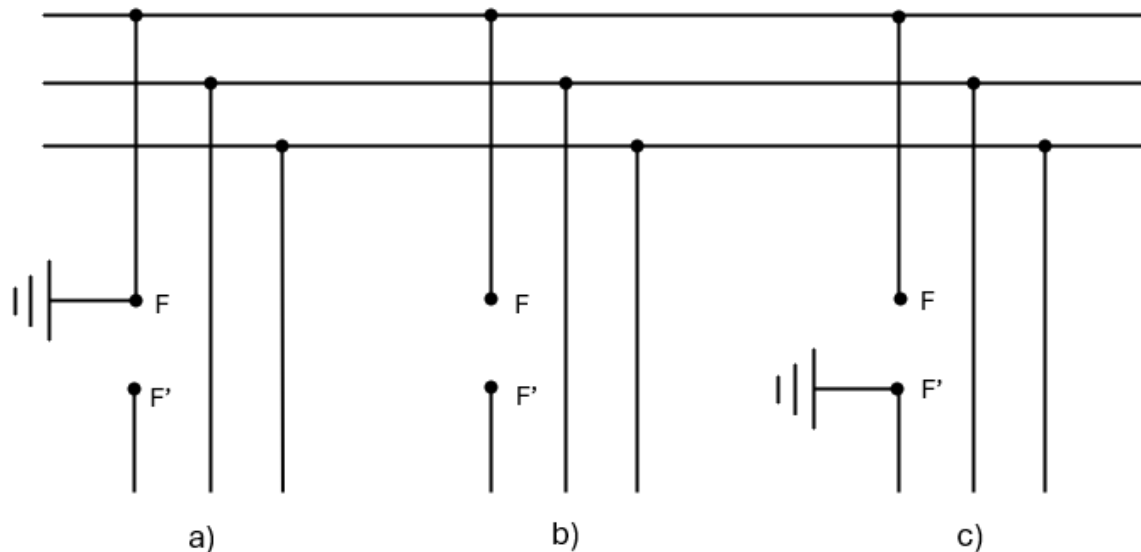
Kuva 14. Jännitteet yksivaiheisen maasulun aikana a) $Z_f = 0$ b) $Z_f \neq 0$. Muokattu [5, s. 187]

Maasulun aikana esiintyvistä voimakkaasta keskijänniteverkon epäsymmetriasta huolimatta jännitteet jakelumuuntajan toisiopuolella ovat verkossa lähes normaalit, kun jakelumuuntajan ensiöpuoli on kytketty kolmioon. Tällöin vikatilanteessa käämien yli vaikuttava jännite on pääjännitteen suuruinen. Tällaisessa tapauksessa verkon käyttö maasulun aikana olisi periaatteessa mahdollista, mutta rajoittavaksi tekijäksi nousee kosketusjännitteiden hallinta sallituissa rajoissa maasulkupaikalla. Tämän takia Suomen olosuhteissa verkkoa ei pääsääntöisesti käytetä maasulun aikana. [5, s. 189]

3.2.3 Vaihekatkos ja sen aiheuttama jännite-epäsymmetria

Kolmivaihejärjestelmässä vaihekatkoksella tarkoitetaan yhden tai useamman vaihejännitteen katoamista tai huomattavaa alijännitettä. Vaihekatkos on pitkittäisvika, joka johtuu usein sulakkeen palamisesta, katkaisijan tai erottimen napojen osittaisesta jatkuvuudesta tai johtimen katkeamisesta. Vaihekatkos aiheuttaa voimakasta jännitteiden epäsymmetriaa sähköjärjestelmässä vikapaikan takana olevalle osuudelle. [23] Tässä luvussa käsitellään yksivaiheisen kj-vaihekatkoksen aiheuttamaa jännite-epäsymmetrian siirtymistä kj-verkosta pj-verkkoon eri muuntajien tapauksissa. Elenian verkossa yleisimmät jakelumuuntajat ovat Dyn11-, Yzn11- ja ZNzn0-kytkentäisiä.

Kuvassa 15 on esitelty erilaisia vaihekatkostilanteita. A) tapauksessa sähköaseman automaatio usein havaitsee tällaisessa tapauksessa syntyvän vikavirran ja pystyy katkaisemaan jännitteen lähdöltä. A) -tapaus vastaa maasulkutilannetta. B) ja c) -tapauksissa vikavirtaa ei välttämättä muodostu riittävästi, jotta lähdön suojausautomaatio pystyisi tunnistamaan vian ja erottamaan vikaantuneen lähdön. [23]



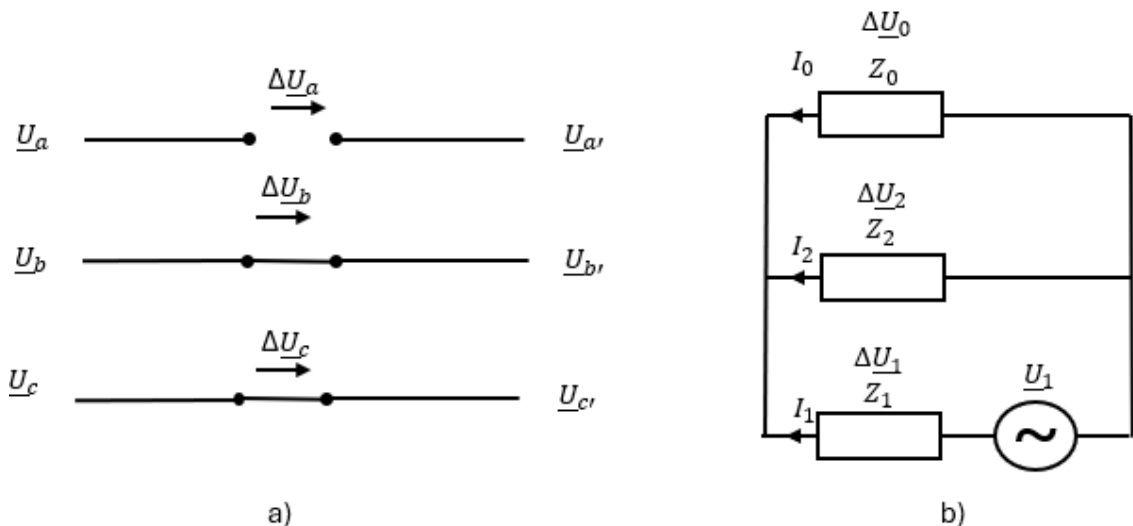
Kuva 15. Syöttösuunta ylhäältä alas. Erilaisia vaihekatkos -tilanteita a) maaskeetus syötön puolelta b) ei maaskeetusta c) maaskeetus kuorman puolelta. Muokattu [23]

Todellisessa kj-vaihekatkosvikojen yhteydessä katkennut johdin harvemmin jää molemmiin puolin ilmaan roikkumaan, kuten on kuvassa 15 b) esitetty. Tyypillisesti kuvan 15 b) tilanne tapahtuu lyhyiden johtimien katkeamisen seurauksena. Kj-vaihekatkoksen yhteydessä esiintyy usein maaskeetus, joka voi olla kuvan 15 a) tai c) tapainen. Maaskeetus

voi tapahtua esimerkiksi katkenneen johtimen osuessa verkon rakenteisiin tai johtimen osuessa maan pinnalle.

Tässä luvussa käsitellään kj-vaihekatkoksen yksinkertaisinta tapausta eli kuvassa 15 b) esitettyä tapausta, jossa vikapaikassa ei ole maayhteyttä. Epäsymmetristen vaihekatkosten laskennan helpottamiseksi hyödynnetään symmetristen komponenttien teoriaa, jota esiteltiin luvussa 3.1. Muodostamalla komponenttiverkot voidaan vaihekatkos esittää yksivaiheisena kytkentänä.

Kuvassa 16 havainnollistetaan yksivaiheista vaihekatkosta vaiheessa a. Vaiheen a alkupään ja loppupään vaihekatkoksen väliin muodostuu potentiaaliero ΔU_a . Oletetaan, että johtimet ovat ideaalisia, jolloin $\Delta U_b = \Delta U_c = 0$. Koska a-vaiheen virtapiiri on poikki, ei siinä voi kulkea virtaa, jolloin $I_a = 0$. Näillä lähtötiedoilla voidaan muodostaa vaihekatkokseksi yksivaiheinen sijaiskytkentä verkkokomponenteista.



Kuva 16. Yksivaiheisen vaihekatkos a) havainnoiva tilannekuva b) komponenttijärjestelmistä muodostettu yksivaiheinen sijaiskytkentä. Muokattu [24, s. 42]

Vaihekatkoksen aiheuttama epäsymmetria näkyy sähköjärjestelmän laitteissa eri tavoin. Muuntajissa suurin ongelma on epäsymmetristen jännitteiden indusoituminen toisiopuolelle eri tavoin riippuen muuntajasta. Kj-vaihekatkoksen aikaiset epäsymmetriset kj-vaihejännitteet riippuvat verkon rakenteesta, vikapaikan takana olevasta kuormituksesta sekä vikapaikan sijainnista. [24, s. 47] Paikallisesti yksittäisen muuntajan toisiopuolelle indusoituneet epäsymmetriset jännitteet ja vaihekulmat riippuvat kj-verkon epäsymmetrisestä jännitteestä, muuntajan kytkentäryhmästä, muuntajan rakenteesta ja tähtipisteen maadoittamisesta sekä muuntajan kuormituksesta. [15, s. 27][25] Tämän luvun laskelmissa verkko on oletettu olevan ideaalinen eikä kuormitus ole epäsymmetristä.

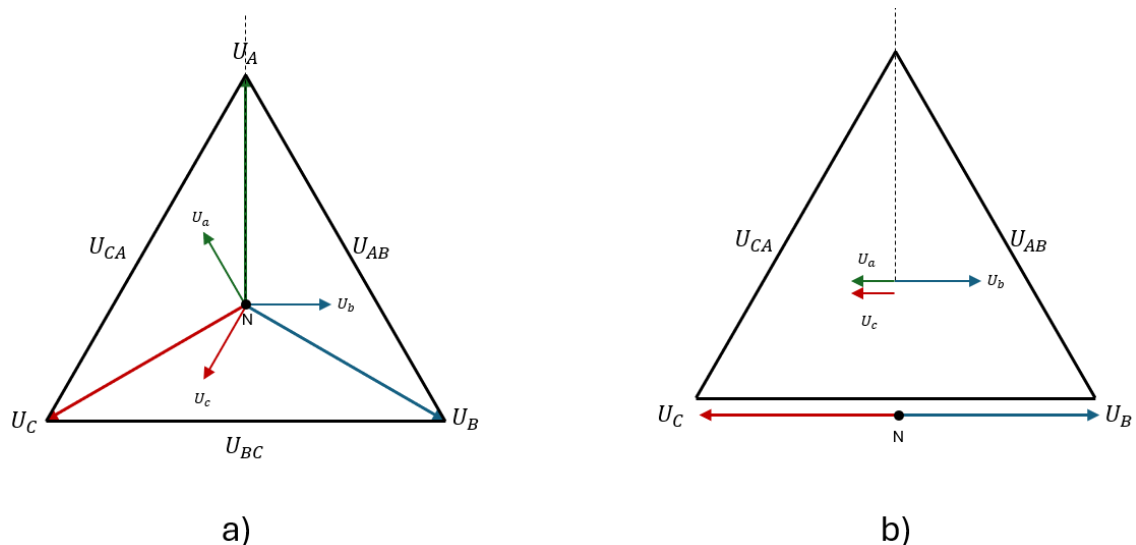
Yzn11-kytkentäisen muuntajan tapauksessa vaiheen menetyksen jälkeen kyseisen vaiheen ensiökäämin jännite on 0 V. Ensiöpuoli kytkettynä maadoittamattomaan tähteen muuntajan kahden ehjän vaiheen käämijännitteet jakautuvat niiden välisestä terveestä pääjännitteestä. Esimerkiksi tapauksessa, jossa A-vaihe katkeaa, vaiheiden B ja C jännitteet muodostuvat jakautumalla niiden välisestä terveestä pääjännitteestä U_{BC} . [23]

$$\underline{U}_A = 0$$

$$\underline{U}_B = -\underline{U}_C = \frac{1}{2}\underline{U}_{BC}$$

$$\underline{I}_A = 0; \underline{I}_B = -\underline{I}_C \quad (3.13)$$

Tällöin ensiöpuolelle muodostuneet vaihejännitteet ovat suhteellisarvoiltaan $\underline{U}_A = 0, \underline{U}_B = \frac{\sqrt{3}}{2}$ ja $\underline{U}_C = -\frac{\sqrt{3}}{2}$. Toisiopuolen vaihejännitteet saadaan syöttämällä ensiöpuolen vikatilanteessa muodostuneet jännitteet yhtälöön 3.10, jonka lisäksi yhtälöstä 3.11 valitaan Yz-muuntajan muunnosmatriisi T_3 ja syötetään se myös yhtälöön 3.10. Tällöin toisiopuolen jännitteiksi saadaan $\underline{U}_a = -\frac{1}{2}$, $\underline{U}_b = 1$ ja $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}$. Kuvassa 17 on esitetty Yzn11-kytkentäisen muuntajan jännitteet, jotka johdettiin yhtälöstä 3.13.



Kuva 17. Yzn11-muuntajan ensiön ja toision jännitteet a) ennen kj-vaihekatkosta b) A-vaihekatkoksen jälkeen. Muokattu [23]

Kuvan 17 a) ja b) tapauksissa esiintyy sekä ensiöpuolen että toisiopuolen jännitteet, jotka ovat eroteltu toisistaan alaindekseisin. Isot kirjaimet viittaavat ensiöpuolen jännitteisiin ja pienet kirjaimet toisiopuolen jännitteisiin. Kuvassa 17 a) on ensiö- ja toisiopuolen jännitteet normaalissa tilanteessa. Kuvassa 17 b) on esitetty kj-vaihekatkoksen aikaiset jännitteet ensiö- ja toisiopuolella. Kj-vaihekatkoksen aikana yksi vaihejännite pysyy nimellisenä, mutta kaksi muuta vaihejännitettä putoaa 50 %:iin nimellisestä. [23][25]

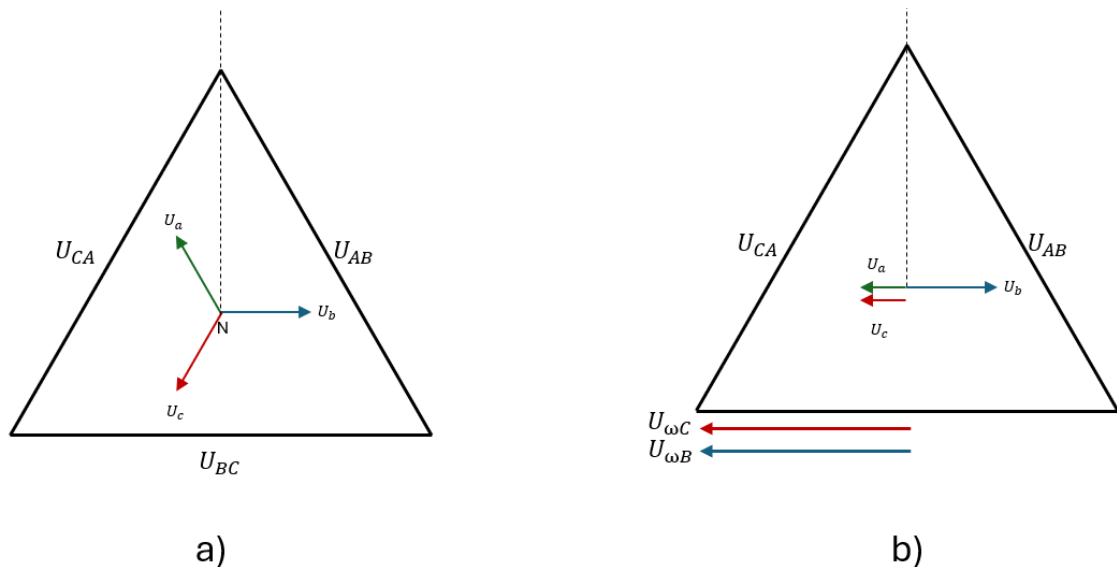
Dyn11-kytkentäisen muuntajan tapauksessa kj-vaihekatkoksen jälkeen kahden ehjän vaiheen välinen pääjännite pysyy muuttumattomana. Tässä tapauksessa A-vaiheen katkoksen aikana B- ja C-vaiheiden välinen pääjännite U_{BC} pysyy muuttumattomana. Ehjien vaiheiden ensiön käämijännitteet ovat puolet niiden välisestä pääjännitteestä ja niiden vaihekulmat ovat samat. Yhtälössä 3.14 on esitetty jännitteet kj-vaihekatkoksen aikana. [23]

$$\underline{U}_A = 0$$

$$\underline{U}_{\omega b} = \underline{U}_{\omega c} = \frac{1}{2} \underline{U}_{BC} \angle 180^\circ$$

$$\underline{I}_A = 0; \underline{I}_B = -\underline{I}_C \quad (3.14)$$

Tällöin ensiöpuolelle vikatilanteessa muodostuneet käämijännitteet ovat suhteellisarvoiltaan $\underline{U}_A = 0, \underline{U}_{\omega B} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ ja $\underline{U}_{\omega C} = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Toisiopuolen jännitteiksi saadaan yhtälön 3.10 mukaisesti $\underline{U}_a = -\frac{1}{2}, \underline{U}_b = 1$ ja $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}$. Kuvassa 18 esitetty Dyn11-kytkentäiselle muuntajalle ensiö- ja toisiopuolen jännitteet a) normaalissa tilanteessa ja b) kj-vaihekatkoksen aikana

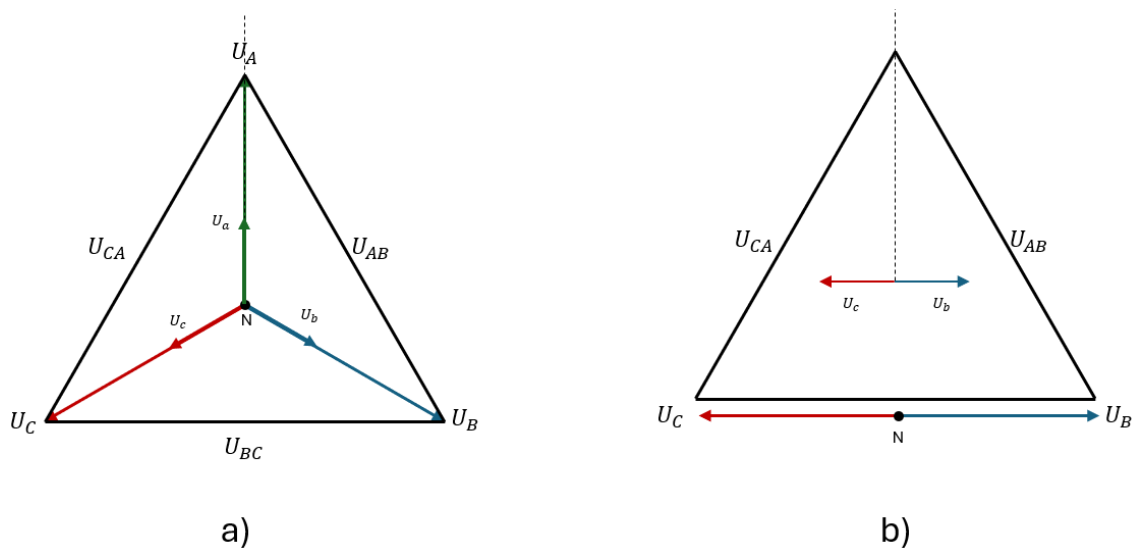


Kuva 18. Dyn11-muuntajan ensiön ja toision jännitteet a) ennen kj-vaihekatkosta b) A-vaihekatkoksen jälkeen. Muokattu [23]

Kuva 18 b) on johdettu yhtälöstä 3.14. Kj-vaihekatkoksen aikana pienjännitetason vaihejännitteet käyttäytyvät samanlailla kuin aikaisemmin Yzn11-kytkentäisen muuntajan tapauksessa. Yksi vaihejännite pysyy nimellisenä ja kahden muun vaiheen jännite puoltaa 50 %:iin nimellisestä. [23][25]

ZNzn0-kytkentäisessä muuntajassa ensiöpuolen hakatähtikytkentä voidaan käsitellä kuin tähtipisteestä maadoittamattomana tähtikytkentänä [9, s. 190]. Vaihekatkoksen aikana jännitteet muodostuvat ensiöpuolelle samalla tavalla kuten muodostui aikaisemmin Yz-muuntajan tapauksessa. A-vaiheen katkoksesta B- ja C-vaiheiden vaihejännitteet jakautuvat niiden välisestä pääjännitteestä U_{BC} , ja matemaattisesti pätee samat ehdot kuin yhtälössä 3.13. Tällöin ensiöpuolelle muodostuneet jännitteet ovat suhteellisarvoiltaan $\underline{U}_A = 0, \underline{U}_B = \frac{\sqrt{3}}{2}$ ja $\underline{U}_C = -\frac{\sqrt{3}}{2}$. [23] [24, s. 180]

ZNzn0 kytkentäryhmä vastaa muuntajakategorian 2 muuntajaa, jolloin yhtälössä 3.10 käytettävä muunnosmatriisi on T_2 . Toisiopuolen jännitteiksi saadaan yhtälön 3.10 mukaisesti $0, \frac{\sqrt{3}}{2}$ ja $-\frac{\sqrt{3}}{2}$. Todellisista kj-vaihekatkoksista, joita käsitellään luvussa 5 saadaan vastaavanlaiset jatkuvan tilan jännitteiden arvot mittareilta, joita syötetään ZNzn0-kytkentäisen muuntajalla. Simuloinneissa kappaleessa 7 saadaan niin ikään vastaavanlaiset tulokset. Näiden tietojen avulla voidaan piirtää havainnollistava kuva 19 kj-vaihekatkoksen vaikutuksesta ZNzn0-kytkentäryhmän toisiopuolelle.



Kuva 19. ZNzn0-muuntajan ensiön ja toision jännitteet a) ennen kj-vaihekatkosta b) A-vaihekatkoksen jälkeen. Mukailten [23]

Kuvassa 19 on esitetty ZNzn0-kytkentäisen muuntajan ensiö- ja toisiojännitteet ennen a) kj-vaihekatkosta ja b) kj-vaihekatkoksen aikana. Kuten huomataan, tämän tyyppisellä muuntajalla jännite-epäsymmetria vaihekatkoksen aikana siirtyy eri tavalla kuin Dyn11- tai Yzn11-kytkentäisen muuntajan tapauksessa. Toisiopuolella yhdelle vaiheelle ei indusoidu ollenkaan jännitettä ja kahden muun vaiheen vaihejännite tippuu 86,6 %:iin nimellisestä vaihejännitteestä.

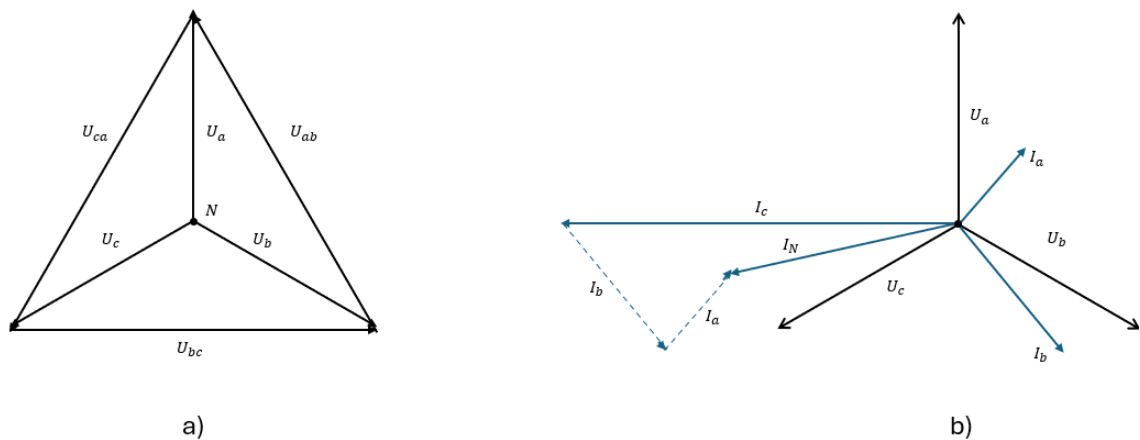
3.3 Nollavika

Normaalissa käyttötilanteessa TN- ja TT-järjestelmien nollapiiri toimii virran matalaimpe-
danssisena paluureittinä jakelujärjestelmän syötön maadoitusjärjestelmään. TT-järjes-
telmässä maa toimii virran paluureittinä ja TN-järjestelmässä paluureittinä toimii erillinen
paluuvirtoja varten tarkoitettu johdin eli nollajohdin. Kuten aikaisemmin todettu luvussa
2.1 Suomessa pienjänniteverkon maadoitusjärjestelmänä on TN-C-järjestelmä, jolloin
paluujohdin on yhdistetty suojamaadoitus- ja nollajohdin. Nollajohtimessa kulkeva virta
saadaan laskettua kaavalla

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c \quad (3.15)$$

missä \underline{I}_N on nollajohtimessa kulkeva virta ja \underline{I}_a , \underline{I}_b ja \underline{I}_c ovat vaihevirrat. [26]

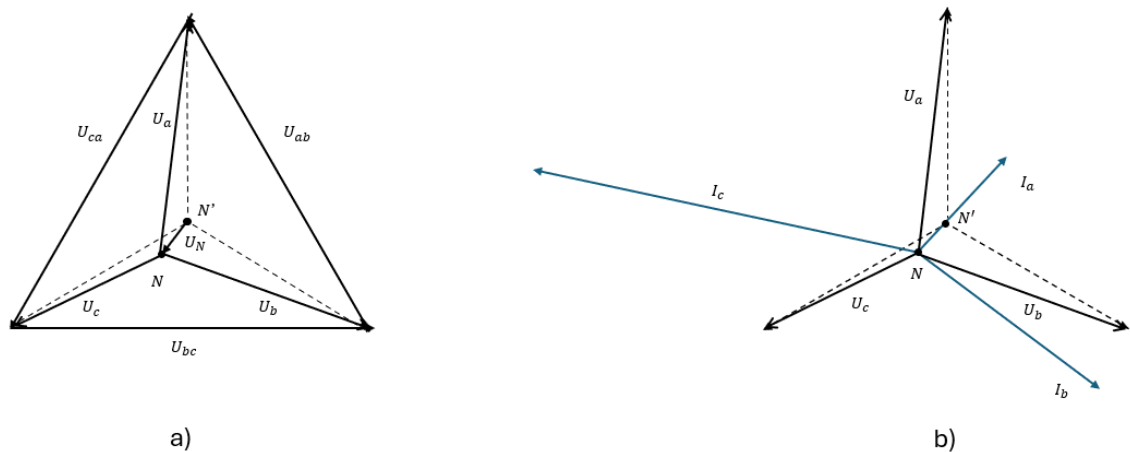
Kuvassa 20 on havainnollistettu, kuinka epäsymmetrisessä kuormituksessa nollajohti-
messa kulkeva virta muodostuu nollajohtimen ollessa ehjä. Epäsymmetrisessä kuormi-
tuksessa summavirta poikkeaa nolasta, jolloin summavirta kulkee nollajohdinta pitkin.
[27]



Kuva 20. Normaalitilan (ehjä nollajohdin) vektoridiagrammit a) Jännitevektoreiden diagrammi b) Jännite- ja virtavektoreiden diagrammi. Muokattu [27]

Nollavika on TN-maadoitusjärjestelmässä mahdollinen vika, jossa nollapiirin impedanssi kasvaa nollajohtimen katkeamisen tai reitin varrella huonosti johtavien liitosten takia. Muuntajalla maadoitukset toimivat referenssimaana nollapiirille, jolloin nollajohtimen katkeamisen takia, sähkönkäyttöpaikalla referenssimaata ei enää ole, minkä takia käyttöpaikan tähtipiste saa potentiaalin eli siirtyy. Tähtipisteen siirtyminen ennen vikaa olleesta referenssipisteestä riippuu kuormituksen epäsymmetriasta sekä asiakkaan kiinteistön maadoituksista. [26][28]

Kuvasta 21 nähdään, että tähtipisteen referenssin katoaminen voi aiheuttaa jännitteiden vinoutumista. Vinoutuminen näkyy tyypillisesti kahden vaiheen ylijännitteenä ja yhden vaiheen alijännitteenä. Epäsymmetrisen kuorman virrat palaavat syötölle vaihejohtimia pitkin, mikäli nollajohdin puuttuu ja käyttöpaikan maadoitukset sekä maadoitusolosuhteet ovat huonot. Tämä aiheuttaa vaihejännitteiden kasvamisen tai pienemisen nimellisestä vaihejännitteestä. Nollavian aikana eniten kuormitetun vaiheen jännite putoaa, kun taas samaan aikaan muut vaihejännitteet voivat kasvaa jopa pääjännitteen suuruisiksi. Toisaalta, jos nollavian aikana kuormitus on jakautunut tasaisesti vaiheiden välille, eivät jännitteet vinoudu. [26]



Kuva 21. Tähtipisteen potentiaalin muutos nollavian aikana epäsymmetrisessä kuormituksessa. Matalaimpedanssista paluureittiä syötölle ei ole. a) Jännite-diagrammi b) Tehodiagrammi. Muokattu [27]

Siirtyvän tähtipisteen ja maan välinen potentiaali voi nousta yli vaihejännitteen suuruisiksi. Tähtipisteen siirtyminen riippuu käyttöpaikan kuormituksesta, käyttöpaikan maadoituksista sekä minkä tyyppinen nollavika on. Nollajohdin voi olla kokonaan poikki tai nollajohtimen impedanssi on voinut kasvaa huonon liitoksen takia. [26]

Nollavian aikaisia vaihejännitteitä on vaikea tietää etukäteen, sillä ne riippuvat käyttöpaikkakohtaisesta vaiheiden kuormitusten epäsymmetrisyydestä sekä nollavikapaikan takaisista maadoituksista. Nollavian aikana epäsymmetrisen kuorman suuruudella on suuri merkitys tähtipisteen siirtymisessä. Täysin symmetrinen kuormitus tai täysin symmetristen kolmivaihelaitteiden käyttö ei aiheuta tähtipisteen siirtymistä, jolloin nollavikaa ei välttämättä pysty huomaamaan käyttöpaikalla jännitteitä mittaamalla. Epäsymmetrisessä kuormituksessa tähtipiste siirtyy referenssistä, jolloin tähtipisteen ja maan välinen potentiaali kasvaa. [26]

Täysin impedanssittomalla tähtipisteen yhteydellä maahan, nollavikaa ei havaita jännitteitä mittaamalla. Todellisuudessa kiinteistön maadoituksilla on jokin impedanssi, joka

käyttöpaikoilla riippuu rakentamisajankohdan standardin vaatimuksista maadoittamisesta, ja kuinka maadoitukset on rakennettu sekä käyttöpaikkakohtaisesta maan resistiivisyydestä. Nykyisessä standardissa SFS 6000-5-54 on määritetty maadoituselektrodien tyypit, materiaalit ja mitoitus. [29]

Nollavika on terveydelle ja omaisuudelle vaarallinen vika. Nollavian vaarallisuuden takia on tärkeää, että AMR-mittareilla pystyttäisiin mahdollisimman luotettavasti tunnistamaan nollaviat. Yksivaiheiset sähkölaitteet eivät välttämättä kestä pitkäaikaista ylijännitettä aiheuttaen laiterikkoja. Nollavian aikainen ylijännite voi pahimmillaan aiheuttaa tulipalon kuumentuneen sähkölaitteen tai johtimen takia. Tulipalon lisäksi, vaarallisen ihmisten terveydelle nollaviasta tekee jännitteelle alttiiden osien potentiaalinen nousu. Nollavian aikana sähkölaitteiden koteloihin ja muihin päämaadoituskiskoon yhdistettyihin johtaviin pintoihin muodostuu kosketusjännitettä. Mittarin katkoreleen automaattinen avautuminen nollaviassa pienentää nollavian vaikutusaikaa käyttöpaikalla. Vaikutusajan lyhentäminen parantaa asiakasturvallisuutta ja vähentää asiakkaiden laiterikkoja.

4. AMR-MITTAREIDEN HYÖDYNTÄMINEN KÄYTTÖTOIMINNASSA

Verkon käyttötoiminnan tavoitteena on ylläpitää sähkön laatua, sähköturvallisuutta, asiakaspalvelua ja lyhyellä aikavälillä taloudellisuutta. Käyttötoiminnassa korostuu vastuu turvallisuudesta ja käyttövarmuudesta. Taloudelliset vaatimukset asettavat reunaehdot resursoinnille ja tuleville investoinneille. Käyttötoiminnan päätoimintoja ovat verkon käytön suunnittelu, verkon tilan seuranta ja ohjaus, häiriötilanteiden hallinta sekä verkon komponenttien kunnossapidon käytännön toteutus. [5, s. 231]

Käyttötoimintaa ohjataan valvomossa, jossa verkkoyhtiöllä on käytössä käytönvalvontajärjestelmä SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ja käytöntukijärjestelmä DMS, joiden avulla toteutetaan verkon tilan seuranta ja ohjausta sekä häiriötilanteiden hallinta. SCADA on sähkönjakelun reaaliaikaisena tietojärjestelmä, jonka avulla saadaan lähes reaaliaikaista tietoa sähkönjakeluprosessista ja jolla suoritetaan verkon ohjausta. SCADAn kautta saadaan reaaliaikainen tieto tapahtumista, mittauksista ja kytkinlaitteiden tiloista, mutta SCADAssa itsessään on vähän päättely- ja analyysiominaisuuksia. [5, s. 235–238]

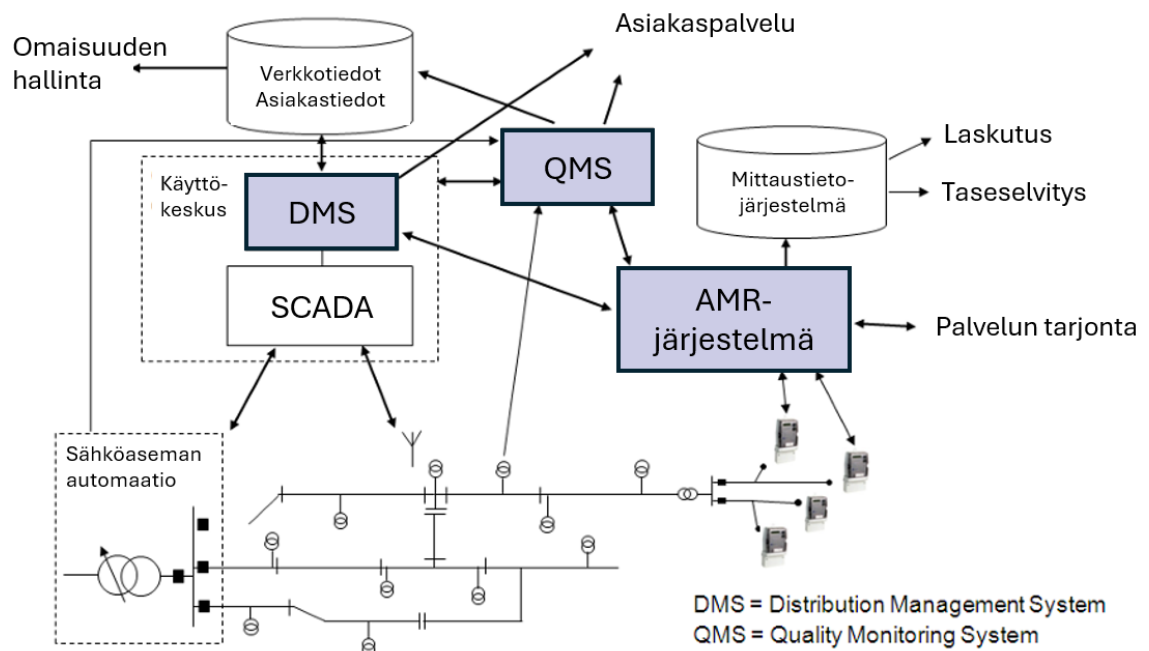
Käytöntukijärjestelmä on ohjelmistokokonaisuus, joka sisältää monipuolisia sovelluksia käyttötoiminnan päätöksenteon tukemiseksi. Käytöntukijärjestelmä hyödyntää verkkoyhtiön muita tietojärjestelmiä, kuten käytönvalvonta-, verkkotieto-, asiakastieto-, kartta- ja mittaustietojärjestelmiä. Käytöntukijärjestelmän pääsovellukset ovat verkkotopologian ylläpito, verkon tehonjako- ja vikavirtalaskenta sekä työryhmien sijaintitietojen hallinta. Häiriötilanteiden hallinnan sovelluksia ovat vikojen paikantaminen, tapahtuma-analyysi, raportointi ja häiriötilanteen aikainen asiakaspalvelu. [5, s. 236–237]

Sähkömittareiden ja mittaustietojärjestelmien merkitys kasvaa sähkömarkkinoiden ohella myös verkon käyttötoiminnassa. Kaksisuuntainen tiedonsiirto mittaustietojärjestelmän ja mittarin välillä ja tiedon välittäminen käytöntukijärjestelmään mahdollistaa lähes reaaliaikaisen valvonnan pienjänniteverkkoon. Tässä luvussa käsitellään, kuinka mittaustietojärjestelmästä (MDMS, Meter Data Management System) saatavaa tietoa hyödynnetään verkkoyhtiön käyttötoiminnassa.

4.1 Mittareiden etäluentajärjestelmä

Sähkölaitteiden tärkein tehtävä on energiankulutuksen tiedon keruu tarkkaa laskutusta ja taseselvitystä varten. Ensimmäiset mittauslaitteet eivät lähettäneet tietoa verkkoyhtiölle, jolloin mittarilta oli käytävä keräämässä tieto laskutusta varten. Nykyisin tieto siirtyy automaattisesti mittareilta mittausjärjestelmään, josta edelleen tietoa välitetään muille tietojärjestelmille, kuten asiakastietojärjestelmään (ATJ) laskutusta varten. Tällaista sähkömittaria kutsutaan etäluettavaksi sähkömittariksi eli AMR-mittariksi. Aikaisemmin luentajärjestelmä ja käyttökijärjestelmä olivat erillisiä tietojärjestelmiä ilman järjestelmien välistä tiedonvaihtoa, jolloin mittausjärjestelmästä saatavaa tietoa ei hyödynnetty käyttöömissä. Tällaisessa järjestelmässä operoitiin pääasiassa keskijänniteverkkoa. [30]

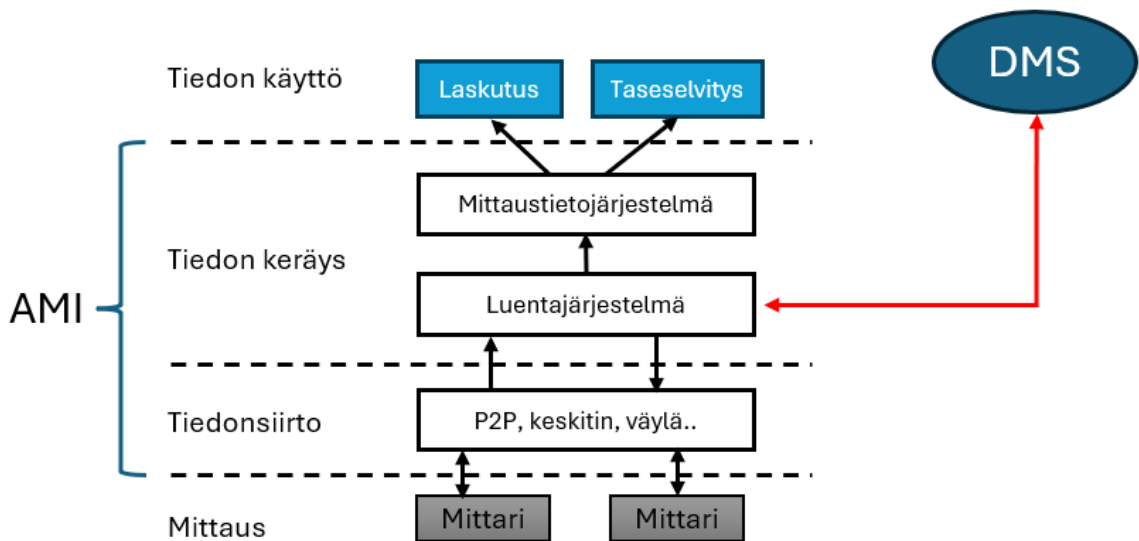
Nykyaikainen AMI-järjestelmä (Advanced Metering Infrastructure) mahdollistaa kaksisuuntaisen tiedonvaihdon käyttöpäikan ja verkkoyhtiön välillä. AMR-luentajärjestelmän integrointi käyttökijärjestelmään mahdollistaa käyttökijärjestelmän ja AMR-mittarin välisen kommunikoinnin. AMR-DMS-integraation myötä mittareita hyödynnetään monissa verkkoyhtiön eri toiminnoissa pienjänniteverkon valvonnassa. [30] Kuvassa 22 on esitelty verkonhallinnassa hyödynnetyt järjestelmät sekä eri tietojärjestelmien väliset kommunikointiyhteydet.



Kuva 22. Etäluentajärjestelmän hyödyntäminen verkonhallinnassa. Muokattu [30]

Nykyaikainen AMR-mittari toimii älykkään verkon lähes reaaliaikaisena valvontalaitteena pienjänniteverkossa. AMR-DMS integraation oleelliset toiminnallisuudet verkon valvonnan ja hallinnan kannalta ovat mittareille tehtävät tilakyselyt sekä mittareilta saatavat automaattiset hälytykset. [31]

AMR-mittarit kuuluvat AMI-järjestelmään. Muita AMI-järjestelmän osa-alueita ovat tiedonsiirtojärjestelmä ja mittaustiedon hallintajärjestelmä. AMR-mittareiden keräämää dataa säilytetään ja käsitellään mittaustiedon hallintajärjestelmässä. [31] Kuvassa 23 on havainnollistettu yksinkertainen AMI-järjestelmän arkkitehtuuri.



Kuva 23. AMI-järjestelmän rakenne. Mukaillen [32]

Etäluentajärjestelmä voidaan ajatella jakautuvan kolmeen toiminnalliseen kerrokseen. Mittauskerroksessa tapahtuu kaikki mittarilla paikallisesti tapahtuvat toiminnot, kuten energian mittaus ja ohjaukset. Tiedonsiirtokerroksessa viestit ja tieto välittyvät kaksisuuntaisesti mittareiden ja luentajärjestelmän välillä. Varsinainen tiedonsiirto voidaan toteuttaa useammalla eri tavalla, mutta tässä työssä siihen ei perehdytä. Mittareilta saadut tiedot tallennetaan mittaustietojärjestelmään, josta ne ovat muiden tietojärjestelmien hyödynnettävissä. [32] Elenialla kommunikaatio AMR-mittarin ja käytöntukijärjestelmän välillä tapahtuu oman rajapinnan kautta, eikä tieto kulje mittaustietojärjestelmän kautta. [31]

4.2 Mittareiden hyödyntäminen verkon valvonnassa

Mittareilta saatava tieto mahdollistaa pienjänniteverkon valvonnan tehostamisen ja siten parantaa sähkönjakelun toimitusvarmuutta. Pienjänniteverkon viat tulevat verkkoyhtiön tietoon joko automaattisen käytöntukijärjestelmään tulevan mittaritiedon (hälytykset ja

tilakyselyt) tai asiakkaiden tekemien vikailmoitusten kautta. Asiakkaiden tekemien vikailmoitusten selvitys voi olla haastavaa. Usein vikailmoitusten kuvaukset ovat epämääräisiä ja terminologialtaan harhaanjohtavia, minkä takia käytönvalvoja ei välttämättä tiedä vian kohdetta tai laajuutta. Käytönvalvojan täytyy usein selvittää tarkentavilla kysymyksillä asiakkaalta mahdollinen vikapaikka ja siten hahmottaa todellinen tilannekuva ja vian vaikutusalue. Tarkentavien lisäkysymysten myötä selviää usein, johtuuko vika asiakkaan omista laitteista vai onko vika jakeluverkon puolella.

AMR-järjestelmä osana käytöntukijärjestelmää tehostaa pienjänniteverkon vikojen havaitsemista ja korjausta. Kun AMR-mittari tunnistaa vian, mittari lähettää automaattisesti hälytyksen käytöntukijärjestelmään. Käytöntukijärjestelmästä voidaan lähettää mittarille tai useammalle mittarille samanaikaisesti tilakyselyitä, joiden avulla arvioidaan verkkotopologiaa hyödyntäen vikapaikan sijainti. Esimerkiksi yhden mittarin hälyttäessä todennäköisesti vika koskee vain yhtä käyttöpaikkaa. Mikäli muuntajan tai jakokaapin lähdössä on useita viasta hälyttäviä mittareita, voidaan vika rajata kyseiseen lähtöön. Mikäli muuntopiiriin useassa lähdössä on hälyttäviä mittareita, voidaan olettaa vian olevan muuntajalla tai keskijänniteverkossa. [33] Taulukkoon 3 on koottu käytöntukijärjestelmään tulevat automaattiset hälytykset sekä mittareille tehtävien tilakyselyiden mahdollisia vastauksia.

Taulukko 3. Käytöntukijärjestelmään automaattisesti lähetetyt mittarihälytykset sekä tilakyselyiden mahdollisia vastauksia. [34] [35, s. 40–43]

Mittarihälytys	Käytöntukijärjestelmän tilakysely
Nollavikalaukaisu	Ok
Nollavika	Perintäkatkotila päällä
Vaihe puuttuu	Mahdollinen pääkytkinkohde
Jännite-epäsymmetria	Mitätöity
Ylijännite	Pääkytkin auki
Alijännite	Ei AMR-mittari
Kiertosuunta muuttunut	Mittari ei vastaa

Hälytyksistä muodostuu käytöntukijärjestelmän hälytyslistalle rivejä, kun uusi hälytys mittarilta vastaanotetaan. Osa tilakyselyiden tuloksista näkyvät myös hälytyslistalla. Näitä ovat ”Pääkytkin auki”, ”Ei AMR-mittari” ja ”Mittari ei vastaa”. Muut tilakyselyiden vastaukset näkyvät omalla listallaan tai piirtyvät käytöntukijärjestelmän karttapohjalle kyseltävän käyttöpaikan päälle. [35, s. 40–43]

Käytäntökijärjestelmässä hälytykset ja tilakyselyiden vastaukset näkyvät hälytyslistalla tai tilakyselylistalla. Näiden lisäksi käytöntukijärjestelmän verkkokarttapohjalle piirtyy hälytykset ja tilakyselyiden vastaukset käyttöpaikkakohtaisesti. Jokaisella hälytyksellä on oma symboli, joka piirtyy käytöntukijärjestelmän karttapohjalle sille käyttöpaikalle, jolle kyseinen mittari on dokumentoitu. Mittareiden tilakyselyt osoitetaan karttapohjalla eri värein; vihreällä kuvataan verkon olevan kunnossa, punaisella kuvataan mittarin jännitteettömyyttä tai siihen ei saada yhteyttä ja keltaisella kuvataan tilakyselyn olevan yhä kesken. [35, s. 40–43]

Tietotulvan välttämiseksi ja käytönvalvojan työn helpottamiseksi ei ole tarpeen saada samalta mittarilta useaa eri hälytystä samanaikaisesti. Hälytyksiä priorisoidaan jo sähkömittarilla, mutta tarvittaessa priorisointia, suodattamista tai logiikan muodostamista tehdään myös käytöntukijärjestelmässä. Elenialla asennettavien toisen sukupolven sähkömittareiden hälytyksien priorisointijärjestys:

1. Vaihe puuttuu
2. Nollavikalaukaisu / nollavikahälytys
3. Jännite-epäsymmetria

Priorisoimalla estetään alemman prioriteetin hälytyksiä muodostumista mittarilla. Esimerkiksi jos mittari tunnistaa nollavian käyttöpaikalla ja lähettää nollavikahälytyksen, mittari ei samanaikaisesti lähetä jännite-epäsymmetriahälytystä. Edellä luetellut hälytykset ovat keskenään priorisoituja. Kuitenkin muita hälytyksiä, kuten alijännite- tai ylijännitehälytyksiä voi tulla edellä lueteltujen hälytysten kanssa, mikäli niiden ehdot täyttyvät samanaikaisesti. [34]

Käytönvalvojan kokonaistilannekuvan hahmottamiseksi ja tietotulvan välttämiseksi käytöntukijärjestelmään on tarpeetonta saada hälytyksiä niiltä mittareilta, jotka ovat käytöntukijärjestelmään dokumentoidun keskeytyksen piirissä. Tällöin vika on käytönvalvojalla tiedossa, eikä viasta sen takia ole syytä saada uusia mittarihälytyksiä. Käytöntukijärjestelmään dokumentoitu pj-verkon keskeytys ei välttämättä tarkoita, että keskeytyksen piirissä olevat käyttöpaikat olisivat täysin sähköittä. Osa vaiheista voi vielä toimia normaalisti, jolloin mittari on yhä päällä ja siten mittari voi lähettää jatkuvasti hälytyksiä. Elenialla on määritelty, että käytöntukijärjestelmässä suodatetaan pois näkyvistä hälytykset mittareilta, jotka ovat käytöntukijärjestelmään dokumentoidun keskeytyksen piirissä. Tähän kuitenkin on poikkeus nollavikatapauksissa. Nollavikahälytykset tulevat hälytyslistalle, vaikka hälyttävä mittari olisi jo dokumentoitu käytöntukijärjestelmässä keskeytyksen piiriin.

Sähkönsyötön katkettua kokonaan, mittarin sisällä olevan kondensaattorin ansiosta saadaan mittarilta tieto mittaustietojärjestelmään sähkönsyötön jännitteettömyydestä ennen kuin mittari sammuu. Mittarin lähettämä Last Gasp -hälytystä ei kuitenkaan tuoda tällä hetkellä käytöntukijärjestelmään. Suurin osa tapauksista, joissa sähkönsyöttö on kokonaan poikki, johtuu meneillään olevasta kj- tai sj-verkon keskeytyksestä. Kj- ja sj-verkon keskeytykset ovat tiedossa käytönvalvojalla käytönvalvontajärjestelmästä käytöntukijärjestelmään saadun tiedon perusteella, eikä näin ollen ole tarve saada näistä keskeytyksistä tietoa mittareilta. Kj- tai sj-verkon keskeytyksistä voi vaikuttaa tuhansiin mittareihin, jolloin jännitteettömyydestä hälyttävät mittarit antaisivat tarpeetonta tietoa, mikä hankaloitaisi vianhoitoa.

Tieto mittarin jännitteettömyydestä Last Gasp -hälytyksen myötä parantaisi pj-verkon valvontaa. Tällä hetkellä tieto sähkönsyötön täydellisestä katkeamisesta voidaan usein päätellä epäsuorasti tilakyselyiden avulla. Jos tilakyselyn vastaus on ”mittari ei vastaa”, on mahdollisena syynä mittarin sähkönsyötön katko. [35, s. 36–37]. Automaattinen tieto jännitteettömyydestä vaatii käytöntukijärjestelmässä tehtäviin AMR-mittareiden hälytyksien suodatukseen muutoksia. Käytöntukijärjestelmän olisi suodatettava pois ne Last Gasp -hälytykset, jotka johtuvat kj- tai sj-verkon keskeytyksestä.

4.3 Mittarihälytysten kuvaus ja hälytysten muodostuminen

Taulukossa 4 on Elenialla käytössä olevat asetellut mittarihälytyksille. Taulukon 4 vasemmassa sarakkeessa on hälytystyyppin nimi sellaisena kuin se esitetään käytöntukijärjestelmässä. Keskimmäisessä sarakkeessa on kyseisen hälytyksen jännite-ehdot ja oikeassa sarakkeessa hälytyksen havainnointiaika. Jännite-ehdot verrataan mittarin lukemiin jännitteisiin, jotka ovat 30 sekunnin ajalta keskiarvollaistettu. Poikkeuksena on nollavikalaukaisu, jossa jännitteet ovat 3 sekunnin ajalta keskiarvollaistettu. [36]

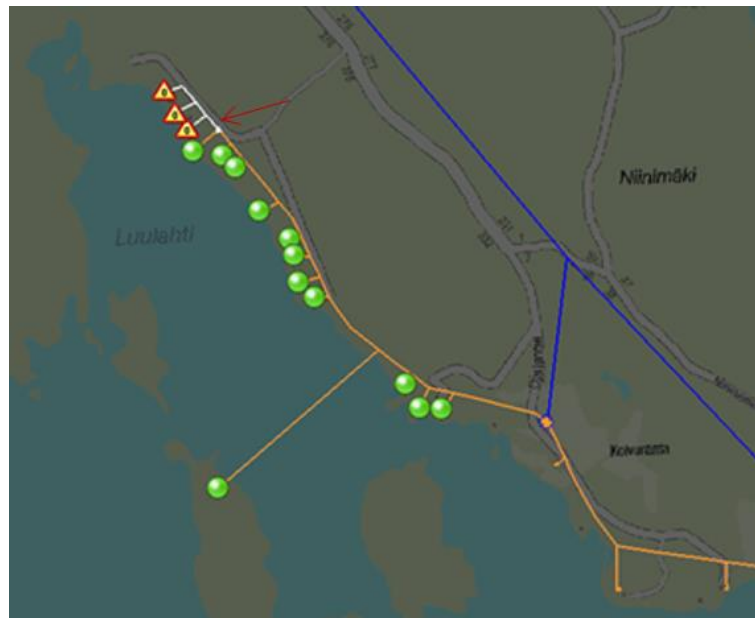
Taulukko 4. Hälytyksille asetetut aika- ja jänniteparametrit.

Hälytystyyppi	Hälytyksen aktivoitumisen jännite-rajat	Havainnointiaika
Vaihe puuttuu	Yksi vaihe alle 100 V	30 s
Nollavika	Yksi vaihe yli 260 V ja yksi vaihe alle 210 V	30 s
Nollavikalaukaisu	Yksi vaihe yli 260 V ja yksi vaihe alle 210 V	9 s
Jännite-epäsymmetria	Kaksi vaihetta välillä 100–170 V	30 s
Ylijännite	Yksi vaihe yli 253 V	1 min keskiarvo
Alijännite	Yksi vaihe alle 207 V	1 min keskiarvo
Kiertosuunta muuttunut	Vain muutos	30 s
Pääkytkin auki	Vain kysely	-

Havainnointiaikaa käytetään suurimmassa osassa hälytyksiä. Havainnointiajan tarkoitus on varmentaa hälytyksen oikeellisuus jo mittarilla. Tämä tarkoittaa sitä, että mittarin havautuessa poikkeaviin jännitteisiin käynnistyy havainnointiaika. Havainnointiajan aikana hälytykset ehdot on täytyttävä, jotta mittari muodostaa hälytyksen ja lähettää tiedon käyttökijärjestelmään. Alijännite- ja ylijännitehälytyksistä mittari lähettää hälytyksen, mikäli 1 minuutin mittausjakson keskiarvo täyttää hälytykselle määritetyn jännite-ehdon. Jännite-epäsymmetria- ja nollavikahälytys eroavat muista hälytyksistä. Nämä hälytykset vaativat kahden vaihejännitteen riittävän suurta poikkeamaa nimellisistä vaihejännitteistä. [34]

4.3.1 Nollavika

Nollavikahälytys tai nollavikalaukaisusta kertova hälytys muodostaa käyttökijärjestelmän karttapohjalle hälyttävälle käyttöpaikoille kuvan 24 mukaiset symbolit. Kuvan 24 tapauksessa lähdön kolme viimeistä mittaria hälyttivät nollaviasta. Manuaalisesti tehtävän tilakyselyn avulla voidaan varmentaa hälytykset ja hahmottaa mahdollista vikapaikkaa. Kuvan 24 johdon loppupäähän suoritettun kyselyn avulla huomataan, että lähdön aikaisemmat mittarit eivät huomaa jännitteissä poikkeavuutta. Käyttökijärjestelmässä näiden käyttöpaikkojen päälle muodostuu vihreä pallo visuaalisesti indikoimaan jännitteiden olevan kunnossa kyseisillä käyttöpaikoilla. [31]



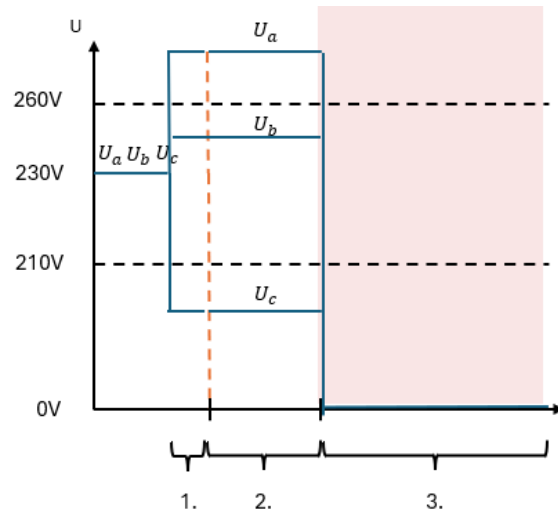
Kuva 24. Nollaviasta hälyttävät mittarit käyttökijärjestelmän karttapohjalla. [31]

Kuvan 24 tapauksessa punaisella nuolella on osoitettu todennäköinen vikapaikka, johon asentajat lähetetään korjaamaan vikaa. Käyttötukijärjestelmässä sähköjakelun keskeytys on dokumentoitu hälytysten perusteella kolmelle viimeiselle käyttöpaikalle. Käyttötukijärjestelmässä dokumentoitu keskeytys kuvataan karttapohjalle valkoisilla komponenteilla. [31]

Aikaisemmin mittarilla ei ole ollut käytössä ominaisuutta, joka automaattisesti katkaisee sähkönsyötön mittarin katkoreleellä nollavian takia. Tällöin käytönvalvoja on täytynyt yrittää ottaa yhteyttä käyttöpaikan asiakkaaseen ja opastamaan häntä turvallisesti kääntämään pääkytkin auki asentoon sähkönsyötön katkaisemiseksi. Katkaisemalla sähkönsyöttö estetään lisävahinkojen syntyminen käyttöpaikalla sekä estetään jännitteelle alttiiden osien kosketusjännite. Mikäli käyttöpaikan asiakasta ei tavoiteta, lähetetään hänelle käyttötukijärjestelmässä tekstiviesti tai sähköposti havaitusta nollaviasta ja kirjallinen ohje pääkytkimen kääntämisestä auki asentoon. Käyttöpaikka voi jäädä sähköihin esimerkiksi siitä syystä, että asiakas ei ole ollut paikalla hälyttävällä käyttöpaikalla. [35, s. 32–35] Mittareilla automaattinen katkoreleen avautuminen nollavikatilanteessa parantaa asiakasturvallisuutta. Käyttöpaikka saadaan automaattisesti eroon kytkettyä verkosta ja siten nollavika ei vaikuta käyttöpaikkaan. Käyttöpaikan erottaminen verkosta ei ole tällöin riippuvainen pääkytkimen manuaalisesta avaamisesta.

Nollavikalaukaisun jälkeen käyttötukijärjestelmään muodostuu kuvan 24 mukaisesti symbolit ja hälytyslistalle rivi tapahtumasta, jossa on tarkemmat tiedot muun muassa tapahtuma-ajasta, hetkellisarvot jännitteistä ja virroista sekä sijaintitieto. Katkoreleen avaamisen jälkeen käyttöpaikka on erotettuna jakeluverkosta, mutta mittarille asti sähkönsyöttö jatkuu, jolloin mittari jää sähköihin. Tämä mahdollistaa sen, että mittarilla on kommunikointiyhteys tietojärjestelmien välillä esimerkiksi katkoreleen kiinni ohjaamista varten.

Nollavian tunnistaminen etäluettavilla sähkömittareilla perustuu riittävän suuren jänniteepäsymmetrian tunnistamiseen. Suurimmassa osassa hälytyksistä käytetään 30 sekunnin keskiarvottamisaikaa, mutta nollavikalaukaisussa käytetään 3 sekunnin keskiarvottamisaikaa jännitteiden mittaamiseen. Nykyisen nollavian hälytyksen ja automaattisen katkaisun rajat ovat: yksi vaihe yli 260 V ja toinen vaihe alle 210 V, havainnointiaika 9 sekuntia. Kuvassa 25 on yksinkertainen esimerkki, kuinka automaattisen nollavikalaukaisun toiminta on toteutettu nollavian aikana. Havainnointiajan jälkeen mittarin katkorele aukeaa, jolloin käyttöpaikka jää jännitteettömäksi. Nollavian korjaamisen jälkeen mittarin katkorele on ohjattava kiinni sähköntoimituksen palauttamiseksi. [36][34]



Kuva 25. Esimerkki nollavian aikaisista vaihejännitteistä käyttöpaikalla sekä nollavikalaukaisun toiminta. Mustalla katkoviivalla hälytysrajat. Oranssilla katkoviivalla kuvataan havainnointiajan alkamisajankohtaa.

Kuvassa 25 on esitetty hälytyksen muodostumista. 1. kohdassa mittarin ensimmäisen keskiarvottamisajanjakson jännitteet ovat hälytyksen ehtojen ylittävät. Tämän jälkeen alkaa havainnointiaika 2. kohdassa. Havainnointiajan pituus on 9 s, jonka aikana kolmen 3 s keskiarvottamisajanjaksojen jännitteiden täytyy ylittää hälytyksen ehdot. Jos havainnointiajalla jännitteet ylittävät hälytyksen ehdot, muodostuu 3. kohdassa hälytys ja automaattinen sähköjen katkaisu.

Eleniällä käytössä oleva nollavian tunnistaminen perustuu riittävän suuren jännite-epäsymmetrian mittaamiseen. Kuitenkaan kaikissa nollavikatapauksissa jännitteet eivät vinoudu siten, että nollavikalaukaisun rajat ylittyisivät. Tällaisia tapauksia ovat tyypillisesti löysät liitokset nollapiirissä. Nämä eivät aiheuta välttämättä hälytystä, mutta jännitteet voivat olla normaalista jakelujännitteestä poikkeavat, näkyen mahdollisesti sähkölaitteiden käytössä. Myös tämän tyyppiset nollaviat olisi hyvä tunnistaa myös. [28] Lisäksi on hyvä tiedostaa, että osa sähkönkäyttöpaikoista ovat yksivaiheisia. Yksivaiheisella mittarilla tai kolmivaiheisella mittarilla yksivaiheisessa käyttöpaikassa nollavika on mahdoton tunnistaa epäsymmetrisiin jännitteisiin perustuvalla hälytyslogiikalla. [34]

4.3.2 Jännite-epäsymmetria

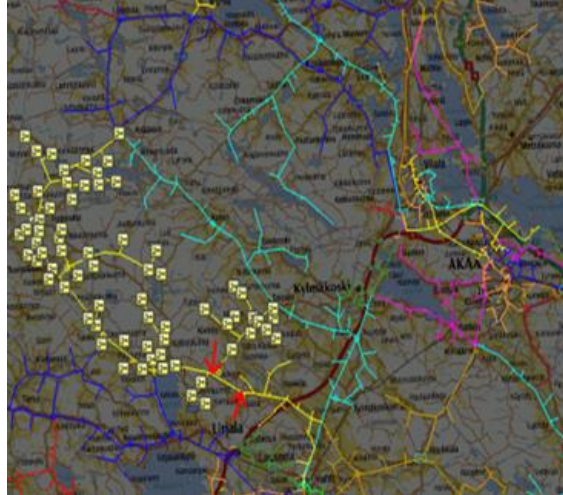
Kj-vaihekatkoksen tunnistamisessa hyödynnetään etäluettavia sähkömittareita. Kj-vaihekatkosvika aiheuttaa voimakkaan jännite-epäsymmetrian sähköjärjestelmään vikapaikan jälkeiselle osuudelle. [18] Elenialla käytössä olevan kj-vaihekatkoksen tunnistamiseen käytetyn hälytyksen ehdot ovat seuraavat: kahden vaiheen jännitteiden on oltava välillä 100–170 V, 30 sekunnin havainnointiajalla.

Yksittäisiin jännite-epäsymmetriahälytyksiin täytyy suhtautua epäilevästi siitä, johtuvatko ne jakeluverkon viasta. Pj-verkossa monet asiat voivat aiheuttaa jännitteiden vinoutumista. Jännitteiden vinoutumista aiheuttaa esimerkiksi kuormitusten epäsymmetrisyys tai erilaiset viat asiakkaan verkossa tai sähkölaitteissa. Yksittäisiin hälytyksiin harvoin reagoidaan erityisesti, jos samalla lähdöllä tai samalla muuntopiirillä on muita mittareita, joista tilakyselyn avulla saadaan normaalitilanteen vastauksia. [35, s. 37–38]

Kj-vaihekatkos aiheuttaa voimakasta jännite-epäsymmetriaa vikapaikan takana olevalle kj- ja pj-verkko-osuudelle, kuten todettiin aikaisemmin luvussa 3.2.3. Elenian jakeluverkon muuntajista 89,5 %:ia on tyyppin 3 muuntajia, joko Dyn11- tai Yzn11- kytkentäisiä. [12] Kappaleessa 3.2.3 esitetyn Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisten muuntajien läpi siirtyvä jännite-epäsymmetria muodostaa toisiopuolelle teorian mukaisesti vaihejännitteet 230 V, 115 V ja 115 V. Näiden muuntajien toisiopuolella jännitteet ovat kahden vaiheen osalta 115 V. Jännite-epäsymmetriahälytyksen vaaditaan kahden vaihejännitteen olevan välillä 100–170 V. Koska jännitteet ovat kahden alijännitteisen vaiheen osalta ehdot täyttävä, muodostaa mittari jännite-epäsymmetriahälytyksen.

Elenian verkossa 10,5 % jakelumuuntajista ovat tyyppin 2 muuntajiin kuuluvia ZNzn0-kytkentäisiä muuntajia. [12] Kj-vaihekatkoksen aikainen jännite-epäsymmetria siirtyy tyyppin 2 muuntajien läpi eri tavalla kuin tyyppin 3 muuntajien läpi. Kappaleessa 3.2.3 on esitetty kj-vaihekatkoksen aikana ZNzn0-kytkentäisen muuntajan toisiopuolelle muodostuneet teoreettiset vaihejännitteet, jotka ovat 0 V, 199 V ja 199 V. Mittarilla kj-vaihekatkoksen tunnistamiseen käytetyt jännite-epäsymmetrian ehdot eivät täyty tässä tapauksessa, eivätkä ZNzn0-kytkentäisellä muuntajalla syötetyt mittarit muodosta jännite-epäsymmetriahälytystä nykyisillä hälytysrajoilla. Jännite-epäsymmetriahälytyksen sijaan mittarit muodostavat vaihe puuttuu -hälytyksen, jonka ehto on: vaihejännitteen on oltava alle 100 V.

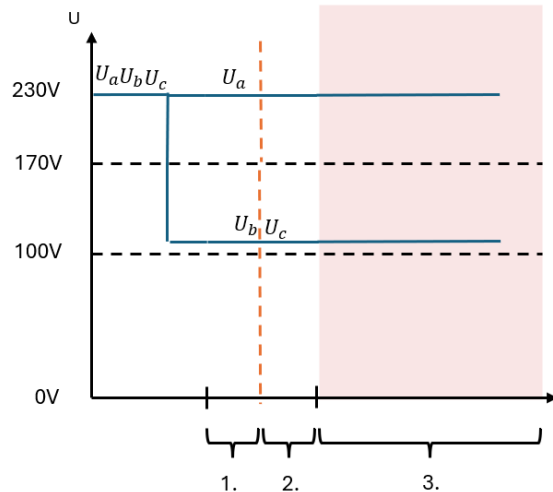
Kuvassa 26 on esitetty tilanne, jossa kj-verkossa on tapahtunut yhden vaiheen vaihekatkos. Dyn11- tai Yzn11-kytkentäisillä muuntajilla syötetyt mittarit hälyttävät jännite-epäsymmetriaa, jotka piirtyvät symbolein kuvan 26 mukaisesti käytöntukijärjestelmän karttapohjalle.



Kuva 26. Jännite-epäsymmetriahälytysten avulla kj-vaihekatkoksen tunnistaminen käytöntukijärjestelmässä. [31]

Kuvan 26 tapauksessa kj-vaihekatkoksen sijainti voidaan paikantaa hälyttävien mittareiden perusteella. Ennen vikaa olevilla mittareilla jännitteet ovat normaalit ja vikapaikan takaiset mittarit mittaavat jännite-epäsymmetriaa. Punaisilla nuolilla on paikannettu mahdollinen kj-vaihekatkoksen sijainti, joka välitetään asentajille tiedoksi. [31]

Kuvassa 27 on esitetty jännite-epäsymmetriahälytyksen muodostuminen mittareilla, jotka ovat muuntajatyypin 3 syötössä. Kun ensimmäisellä 30 s keskiarvottamisjaksolla jännitteet ovat hälytyksen ehdot täyttävä, alkaa tämän jälkeen 30 s havainnointiaika. Havainnointiajalla jännitteiden täytyy olla hälytyksen ehdot täyttävä hälytyksen muodostumista varten.



Kuva 27. *Kj-vaihekatkoksen aiheuttama jännite-epäsymmetria mittareilla nähtynä Dyn11- ja Yzn11-muuntopiireissä.*

Yksivaiheisilta käyttöpaikoilta ei voi muodostua jännite-epäsymmetriahälytystä. Yksivaiheiselta käyttöpaikalta on mahdoton saada sellaista hälytystä, jonka muodostamiseen käytetään kahden vaihejännitteen jännite-ehtoja. [34]

4.3.3 Vaihe puuttuu

Pj-verkon yhden tai kahden vaiheen katkokseen hyödynnetään vaihe puuttuu -hälytystä. Mittari lähettää Vaihe puuttuu -hälytyksen, kun ensimmäisen 30 s keskiarvotamajakson sekä 30 s havainnointiajan aikana yhden vaihejännitteen keskiarvo on alle 100 V. Kun mittari havaitsee yhden tai kahden vaiheen katkoksen, muodostuu käyttötukijärjestelmään kuvan 28 mukaiset hälytyssymbolit.

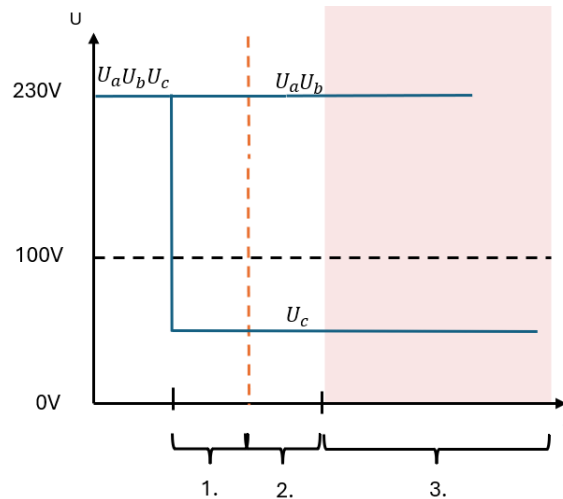
Kuvassa 28 on esimerkki kaapelivian aiheuttamasta vaihekatkoksesta. Usean mittarin hälyttäessä vaihekatkoksesta samalla lähdöllä, on verkossa vika todennäköisesti syöttävän lähdön kaapelissa, liitoksissa tai sulake on palanut. Kyseessä voi olla myös edellä mainittujen yhdistelmä. Käyttötukijärjestelmään tulleen tiedon perusteella käytönvalvoja saa tällaisessa tapauksessa kattavan tilannekuvan mahdollisesta vian sijainnista, minne asentaja ohjeistetaan menemään.



Kuva 28. Vaihe puuttuu -hälytyksiä johtuen kaapeliviasta. Hälytyksen mukana tulee lisätietoa jännitteistä ja virroista sekä mahdollisista huomautuksista.

Yksittäisiin vaihe puuttuu -hälytyksiin täytyy suhtautua epäilevästi sen suhteen, johtuuko hälytys jakeluverkon viasta. Etenkin, jos samalla lähdöllä olevat muut mittarit eivät hälytä samanaikaisesti. Erityisen haastavaa tilanteen selvittämisestä tekevät johtolähdöt, jotka syöttävät yhtä käyttöpaikkaa. Usein vaihe puuttuu -hälytyksiä tulee käyttöpaikan palaneista pääsulakkeista. Vanhojen kiinteistöjen tapauksissa kiinteistön pääsulakkeet sijaitsevat ennen sähkömittaria, jolloin asiakkaan vastuulla olevat pääsulakkeiden palamiset aiheuttavat hälytyksiä mittareille. Yksittäisiin vaihe puuttuu -hälytyksiin lähetetään asentaja niissä tapauksissa, jos on selvää, että pj-vaihekatkos johtuu jakeluverkon viasta. Tarvittava lisätieto tulee tyypillisesti asiakkaan tekemän vikailmoituksen kautta.

Kuvassa 29 havainnollistetaan, kuinka vaihe puuttuu -hälytys muodostuu. Hälytyksiä muodostuu mittarilla siihen saakka, kunnes vaihe puuttuu -hälytyksen ehdot eivät enää täyty. Käytöntukijärjestelmässä muodostuu hälytyksiä, kunnes hälyttävä mittari on dokumentoitu keskeytyksen piiriin.



Kuva 29. Vaihe puuttuu -häilytyksen muodostuminen. Havainnointiajalla jonkin jännitteen keskiarvon ollessa alle 100 V muodostuu häilytys.

Tällä hetkellä erillistä kahden vaiheen puuttumisesta indikoivaa häilytystä ei ole käytössä, vaan vaihe puuttuu -häilytyksen häilytysehto pätee myös kahden vaiheen puuttumisen tapauksessa. Käytönvalvoja pystyy erottamaan, onko kyseessä yhden vaiheen puuttuminen. Kuvasta 28 nähdään, että häilytyksen lisätiedoissa tulevat mukana vaihejännitteet. Jännitteiden perusteella nähdään, onko kyseessä yhden vaiheen katkos. Kuvan 28 tapauksessa on kyseessä yhden vaiheen katkos, sillä yksi vaihejännite poikkeaa normaalista jakelujännitteestä.

4.3.4 Kiertosuunta muuttunut

Vaihejärjestys on otettava huomioon, jotta kolmivaiheiset pyörivät sähkökoneet toimivat suunnitellusti. [34] Kiertosuunta muuttunut -häilytys muodostuu, kun mittari havaitsee vaihejärjestyksen muuttuneen alkuperäisestä asennuksesta. Ensiasennuksen yhteydessä mittari ottaa muistiinsa tiedon vaihejärjestyksestä. Mittarin ensiasennuksen yhteydessä asentajan on syytä varmistaa, että kiertosuunta on oikein. Mikäli syöttävässä verkossa tapahtuu myöhemmin vaihejärjestyksen muutos esimerkiksi vian korjauksen yhteydessä, hälyttävät syötetyn lähdön mittarit kiertosuunnan muutoksesta käyttökäyttäjärjestelmään. Tällöin käytönvalvojan on syytä epäillä korjauksessa tapahtuneen virheen ja ottaa yhteyttä vikapaikalla olevaan asentajaan.

Kiertosuunta muuttunut -häilytyksiin reagoidaan, kun on epäily juuri tapahtuneesta asennusvirheestä. Yksittäisiin häilytyksiin harvemmin reagoidaan, sillä on epätodennäköistä, että tilanne, joka on johtanut häilytykseen, johtuisi syöttävästä verkosta. Jos useampi kiertosuunta muuttunut -häilytys ilmestyy samalta muuntopiiriltä, on tilanne arvioitava tapauskohtaisesti käytönvalvojan toimesta. Jotkin pj-jakeluverkossa tapahtuvat viat

voivat aiheuttaa kiertosuunta muuttunut -häilytyksiä ilman muita samanaikaisesti muodostuvia häilytyksiä. Esimerkkinä kaksivaiheinen oikosulku, jossa vain toinen syöttävän vaiheen johtimia syöttävästä sulakkeista palaa. Tämän lisäksi johtimet jäävät kosketuksiin toisiensa kanssa vian alkamisen jälkeen. Käyttöpaikan näkökulmasta tämä vastaa tilannetta, jossa kahden vaiheen tehollisarvo sekä kulma ovat samat.

4.3.5 Alijännite ja ylijännite

Alijännitehäilytyksen muodostuminen poikkeaa muista aikaisemmin esitellyistä häilytyksistä. Alijännitehäilytyksellä ei ole erillistä havainnointiaikaa. Häilytys muodostuu, mikäli jonkin vaiheen yhden minuutin keskiarvo jännitteelle on alle 207 V. [34]

Ylijännitehäilytyksen muodostuminen toimii samankaltaisesti kuin alijännitehäilytyksen muodostuminen. Ylijännitehäilytys muodostuu, mikäli jonkin vaiheen yhden minuutin keskiarvo jännitteelle on yli 253 V. Erillistä havainnointiaikaa ei ole, minkä aikana keskiarvo täytyisi olla myös häilytyssehtojen ulkopuolella. [34]

Alijännite- ja ylijännite häilytyksiä ei suodateta pois mittarilla missään tilanteessa. Tämä tarkoittaa, että edellä esiteltyjen häilytysten lisäksi mittarit lähettävät alijännitehäilytyksiä. Nollavikatilanteissa mittarit lähettävät nollavikalaukaisun lisäksi myös sekä alijänniteettä ylijännitehäilytyksen. Kiertosuunta muuttunut -häilytyksen yhteydessä ei tule alijännite- tai ylijännitehäilytyksiä. [34]

4.4 Kj-verkon vikojen tunnistaminen etäluettavien mittareiden avulla

Keskijänniteverkossa tapahtuvien vikojen ensisijainen suojaus hoidetaan sähköaseman suojausautomaatiikan avulla. Oikosulkujen aiheuttaman jännitekuopan kesto aika riippuu siitä, kuinka nopeasti vikaantunut lähtö saadaan erotettua muusta verkosta. Oikosulkuihin ja matalaimpedanssiin maasulkuihin sähköaseman suojausautomaatiikka havahtuu nopeasti ja erottaa vikaantuneen lähdön muusta verkosta. Vikaantunut lähtö jää joko kokonaan jännitteettömäksi tai lähdölle suoritetaan ennalta määritetty jälleenkytkentäsekvenssi. Näissä tapauksissa vian vaikutusaika ja siten myös jännitekuopan kesto aika jäävät lyhyiksi.

Työ- ja elinkeinoministeriön älyverkkotyöryhmän AMR 2.0 loppuraportin mukaan yli 0,3 sekuntia kestävät keskeytykset olisi uuden sähkömittarin kyettävät havaitsemaan [37]. Elenian verkossa pikajälleenkytkennän jännitteettömän aikavälin kesto on yleisesti välillä

0,3 s – 1,0 s. Elenian verkossa pikajälleenkytkennän aiheuttama lyhyt keskeytys tunnistetaan käytössä olevilla uuden sukupolven mittareilla. [36]

Oikosulku- tai maasulkuvian poistossa onnistuneet pikajälleenkytkennät aiheuttavat verkossa lyhyitä jännitekatkoja. Onnistuneet pikajälleenkytkennät on otettava huomioon mittareiden hälytysten ehtoja ja havainnointiaikaa määriteltäessä. 30 sekunnin keskiarvotamisjaksoilla pikajälleenkytkennän aiheuttama jännitteettömyys näkyy alentuneena keskiarvon tuloksena ensimmäisellä keskiarvotamisjaksolla. Havainnointiajalla hälytystä ei muodostu, koska vian poistossa onnistuneen jälleenkytkennän jälkeen jännitteet ovat palautuneet normaaleiksi. [36][34]

Jos pikajälleenkytkentä ei onnistu poistamaan vikaa, sähköaseman katkaisija aukeaa ja tästä seuraa n. 1–2 minuutin jännitteetön aika ennen mahdollista aikajälleenkytkentää. Sähkömittari pystyy olemaan käynnissä jännitteettömässä verkossa vain muutaman sekunnin ajan, jonka aikana mittari rekisteröi jännitteettömyyden ja lähettää mittaustietojärjestelmään tiedon. [36][34]

5. AMR-HÄLYTYSDATAN TILASTOLLINEN TUTKIMUS

Nykyiset jänniterajoihin perustuvat hälytykset ovat yksinkertaisia, mutta tehokkaita tunnistamaan poikkeamia jakeluverkossa. Mittareilta saatavien hälytysten avulla saadaan kattava tilannekuva vian laajuudesta visuaalisten indikaatioiden avulla käytöntukijärjestelmässä. Väärät, saamatta jääneet tai muusta syystä poikkeavat hälytykset voivat aiheuttaa hämmennystä ja pahimmillaan pidentävät vian korjaamisaikaa.

Elenialla asennettavat toisen sukupolven sähkömittarit mahdollistavat käyttöpaikkakohtaisesti jännitteiden ja virtojen lukemisen. Mittaustietojärjestelmään tallentuvat hälytyksen aikaiset jännitteiden ja virtojen hetkellisarvot sekä mittausjakson jännitteiden ja virtojen keskiarvot. Mittaustietojärjestelmään tallentuneiden vian aikaisten jännitteiden ja virtojen avulla päästään tarkastelemaan menneiden vikojen aikaisia suureita.

Tässä luvussa on hyödynnetty mittaustietojärjestelmään tallentuneita hälytyksiä ja hälytysten mukana tulleita jännitteitä ja virtoja. Luvussa 5.1 selvitetään kytkentäryhmän vaikutusta pj-vaihejännitteisiin kj-vaihekatkoksen aikana. Luvussa 5.2 tutkitaan jännite-epäsymmetriahälytyksen nykyisten rajojen sopivuutta. Tämä tehdään tutkimalla, onko ollut tilanteita, missä kj-vaihekatkoksen aikana pienjänniteverkossa mitatut vaihejännitteet eivät ole täyttäneet jännite-epäsymmetriahälytyksen ehtoja. Luvussa 5.3 käsitellään mittausten rekisteröimiä jännitteitä ja virtoja kahden erityyppisen nollavian aikana.

5.1 KytKentäryhmän vaikutuksen tutkiminen hälytysdatasta

Tässä luvussa käsitellään jakelumuntajan kytkentäryhmän vaikutusta pienjänniteverkon vaihejännitteisiin kj-vaihekatkoksen aikana. Tätä selvitettiin hyödyntämällä kj-vaihekatkoksen aikaisia mittaustietojärjestelmään tallentuneita hälytyksiä ja niiden yhteydessä tallentuneita vaihejännitteitä. Luvussa 3.1.2 esitetyn teorian mukaan muuntajat voidaan jakaa matemaattisesti kolmeen eri tyyppiin kytkentäryhmän perusteella. Tässä osiossa haetaan varmennusta siitä, että ZNzn0-kytkentäinen muuntajan toisiopuolelle jännite-epäsymmetria on erilaista verrattuna Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisiin muuntajiin verrattuna.

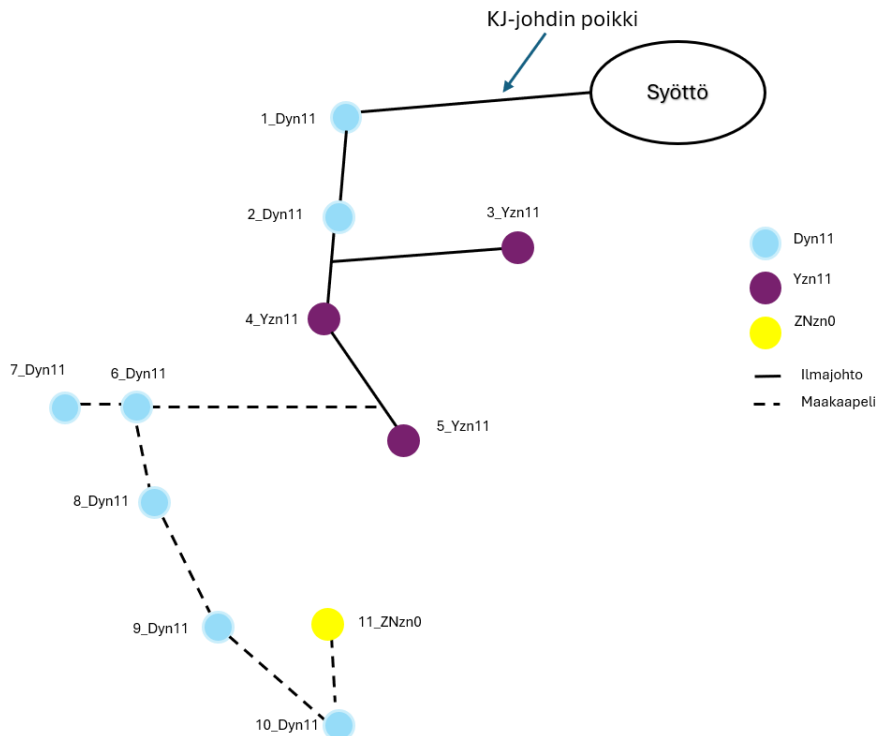
Luvussa 5.1.1 on esitetty kaksi todellista kj-vaihekatkosta, joiden yhteydessä on ollut eri kytkentäryhmäisiä muuntajia. Luvussa 5.1.2 on esitetty johtopäätökset ja mahdollisia korjaavia toimenpiteitä, kuinka huomioida kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetriahälytyksessä.

5.1.1 KytKentäryhmän vaikutus kj-vaihekatkoksesssa

Tässä luvussa tutkitaan mittarihälytysten yhteydessä rekisteröityneiden jännitteiden perusteella, kuinka jakelumuuntajan kytkentäryhmä vaikuttaa jännite-epäsymmetrian siirtymiseen pj-puolelle. Tässä luvussa on esitetty kaksi Elenian verkossa tapahtunutta kj-katkosta, joista on kerätty mittareilta tiedot vian aikaisista jännitteistä Dyn11-, Yzn11- ja ZNzn0-kytkentäisiltä muuntajilta.

Kj-vaihekatkos tapaus 1

Kuvassa 30 on esitelty vianaikainen keskijänniteverkon topologia vikaantuneen lähdön osalta. Kuvassa 30 on vikapaikka osoitettu nuolella, missä kj-johtimen katkeaminen tapahtui. Vikapaikassa oli samaan aikaan toisella vaiheella aiheutunut maasulku. Sähköaseman suojaus oli huomannut vian ja katkaisija erotti vikaantuneen lähdön. Käytönvalvoja rajatessa ja palauttaessa sähköjä syöttösuunnasta päin, lähdön suojaus ei enää erottanut lähtöä irti verkosta, koska jäykempi maayhteys oli poistunut. Vikapaikkaa rajatessa johtolähdöllä vikapaikan takana olevien muuntopiirin mittarit alkoivat hälyttämään jännite-epäsymmetria- ja vaihe puuttuu -hälytyksiä.

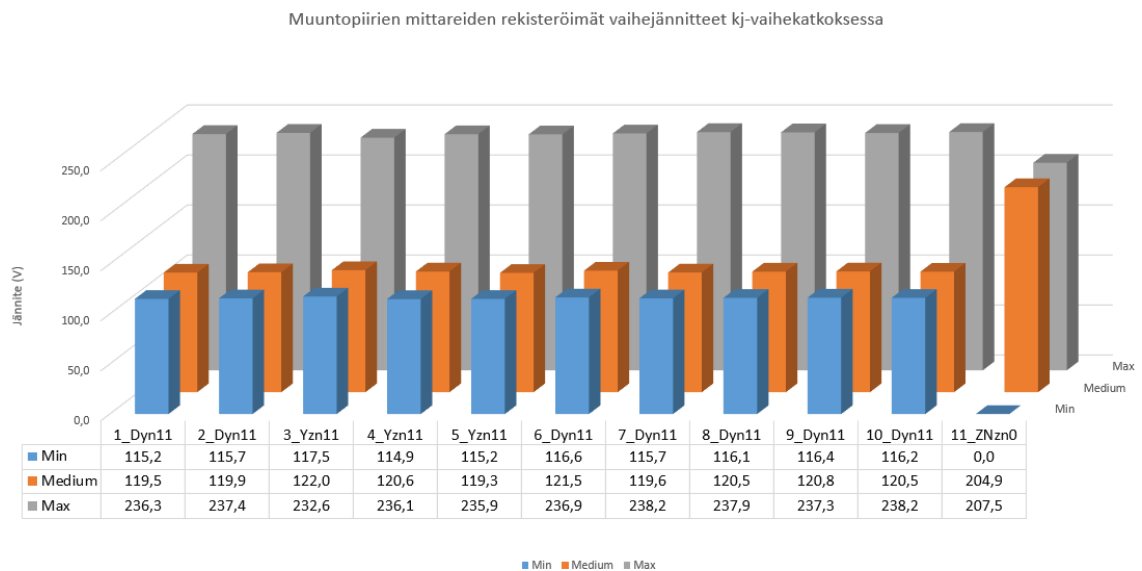


Kuva 30. Tapaus 1 verkkotopologia kj-vaihekatkoksen aikana.

Mittaustietojärjestelmästä on haettu muuntopiirikohtaisesti mittareiden lähettämät hälytykset ja niiden mukana tallentuneet vian aikaiset jännitteet. Yksittäiset mittarit lähettivät joko vaihe puuttuu- tai jännite-epäsymmetriahälytyksiä. Näiden lisäksi tuli samanaikaisia alijännitehälytyksiä jokaiselta mittarilta. Mittareiden hälytysten keskiarvottamisjakson vaihejännitteistä laskettiin muuntopiirikohtaisesti vaihejännitteiden keskiarvot, jotka kuvaavat muuntopiirin keskimääräisiä vaihejännitteitä.

Muuntopiirien mittareilta tulleet hälytykset ovat jaoteltu jännitteiden perusteella pienimpään (min), toiseksi pienimpään (medium) ja suurimpiin (max) jännitteisiin ja näistä on otettu muuntopiireittäin keskiarvolliset jännitteet. Tekemällä näin, saadaan muuntopiirille keskiarvolliset pj-jännitteet vaihekatkoksen aikana, jotka ovat koottuna taulukkoon 5 ja 6.

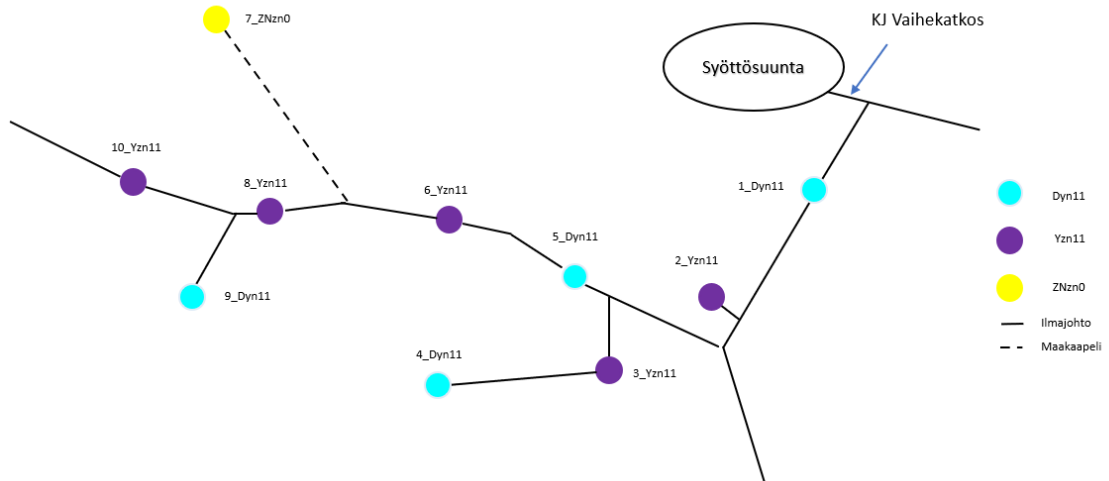
Taulukko 5. Muuntopiirien jännitetaso (keskiarvo käyttöpaikkojen jännitteistä) erään kj-vaihekatkoksen aikana.



Taulukkoon 5 on koottu kuvan 30 tapauksen muuntopiirien vian aikaiset vaihejännitteet. Jännitteet ovat saatu mittaustietojärjestelmään tallentuneista hälytyksistä. Verkkotietojärjestelmään on dokumentoitu tieto, millä muuntajalla syötetään tiettyä mittaria.

Kj-vaihekatkos tapaus 2

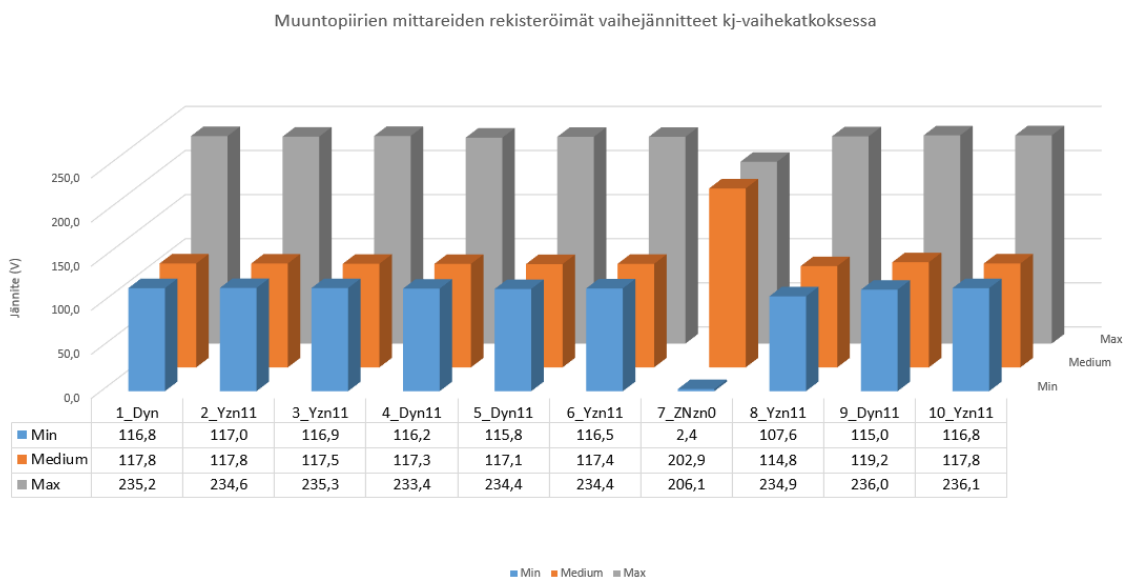
Kuvassa 31 on esitetty vianaikainen verkkotopologia toisessa kj-vaihekatkoksessa, joka tapahtui keväällä 2024. Tässä tapauksessa kj-vaihekatkos ei aiheuttanut katkaisijan avautumista. AMR-hälytysten avulla vikapaikka pystyttiin tunnistamaan.



Kuva 31. Tapaus 2 verkkotopologia kj-vaihekatkoksen aikana.

Vika vaikutti kuvasta 31 poiketen laajemmalle alueelle, mutta tämän työn kannalta kiinnostavin verkon haara on se, missä on ZNzn0-kytkentäinen muuntaja. Taulukkoon 6 on koottu kuvan 31 muuntopiirien vian aikaiset keskiarvolliset vaihejännitteet.

Taulukko 6. Muuntopiirien jännitetaso (keskiarvo käyttöpaikkojen jännitteistä) toisen kj-vaihekatkoksen aikana.



Kuten taulukoista 5 ja 6 huomataan Dyn11- ja Yzn11-muuntopiireissä jännitteet käyttäytyvät samankaltaisesti. Tämä tukee teoriaa, jota on esitetty luvussa 3.2.3 muuntajatyypin

3 jännitteiden käyttäytymisestä jännite-epäsymmetrian siirtymisessä. Keskinäistä eroa on pienimmän ja toiseksi pienimmän jännitteen välillä. Tämä selittyy sillä, että teorian mukaisesti alijännitteiset vaiheet ovat yhtä suuret ideaalisessa tapauksessa eikä kuormituksen tai verkkokomponenttien epäsymmetrian vaikutusta ole huomioitu. Näissä tapauksissa Dyn11- ja Yzn11-muuntopiirien pj-vaihejännitteet ovat olleet kahden pienimmän vaihejännitteen osalta välillä 100–170 V, jolloin jännite-epäsymmetriahälytys on muodostunut.

ZNzn0-kytkentäisen muuntajan läpi siirtyvä jännite-epäsymmetria poikkeaa selvästi Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisiin muuntajiin verrattuna. Tämä tulos vahvisti teorialuvussa 3.1.2 väitettä ZNzn0-kytkentäisen muuntajan kuuluvan muuntajatyypin 2. Edellä käsiteltyjen tapausten ja simuloinnista saadun tuloksen avulla on luotu lukuun 3.2.3 havainnollistava kuva 19 ZNzn0-kytkentäisen muuntajan toisiopuolen jännitteistä.

Kj-vaihekatkokuksessa ZNzn0-kytkentäisen muuntajan pj-puolella yksi vaihejännite putoaa 0 V tai lähelle sitä. Tällä hetkellä käytössä olevilla hälytysrajoilla ei muodostu jännite-epäsymmetriahälytystä niiltä mittareilta, joita syötetään ZNzn0-kytkentäisellä jakelu-muuntajalla. Näiltä mittareilta tämänhetkisen hälytyslogiikan mukaan muodostuu vaihe puuttuu -hälytyksiä, koska yksi vaihejännite putoaa alle 100 V.

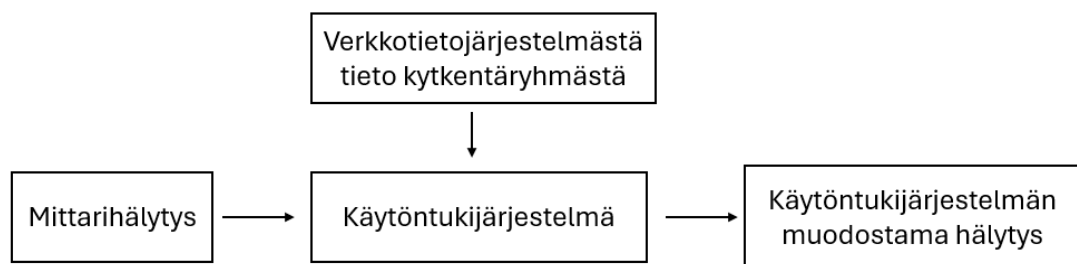
5.1.2 Kytkentäryhmän huomioiminen jännite-epäsymmetriahälytyksessä

Kj-vaihekatkoksen tunnistamiseen käytetty jännite-epäsymmetriahälytys on nykyisillä hälytysrajoilla tehokas tapa tunnistaa kj-vaihekatkos mittareiden avulla, mikäli sähkömittarit ovat muuntajatyypin 3 perässä. Mikäli sähkömittarit ovat tyypin 2 muuntajan syötössä, kuten ZNzn0-kytkentäisen muuntajan, ei mittareilla muodostu jännite-epäsymmetriasta hälytystä, vaan vaihe puuttuu -hälytys.

ZNzn0-kytkentäisessä muuntopiirissä olevat mittarit eivät hälytä jännite-epäsymmetriasta. Tämä jakaantuu kahteen ongelmaan. Ensimmäinen ongelma on, että nykyisillä rajoilla jännite-epäsymmetriahälytyksen ehdot eivät täyty ZNzn0-kytkentäisen muuntajan pj-puolella kj-vaihekatkokuksessa. Toinen ongelma liittyy mittareilla tapahtuvasta hälytyksen priorisoinnista. Käytännössä jännite-epäsymmetriahälytyksen rajoja muuttamalla hälytystä ei muodostu ZNzn0-kytkentäisessä muuntopiirissä olevalla mittarilla, ellei vaihe puuttuu -hälytyksen ja jännite-epäsymmetriahälytyksen keskinäistä priorisointijärjestystä muuteta. Nykyisellään vaihe puuttuu -hälytyksen ehto täyttyy, jos jokin vaihejännite on alle 100 V. Kj-vaihekatkoksen aikana ZNzn0-kytkentäisen muuntajan toisiopuolella yksi

vaihejännite putoaa 0 V tai hyvin lähelle tätä. Käytännössä tämä tarkoittaa aina vaihe puuttuu -hälytystä, vaikka jännite-epäsymmetriahälytyksen rajaa muuttaisi.

Mikäli halutaan saada kuvaavampi hälytys kj-vaihekatkoksesta ZNzn0-kytkentäisessä muuntopiirissä olevalta mittarilta käytöntukijärjestelmään, on siihen lähestyttävien tapa tehdä logiikka käytöntukijärjestelmään. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että käytöntukijärjestelmä tekee lopullisen päätöksen hälytyksestä perustuen verkkotietojärjestelmästä saatavaan tietoon, minkä kytkentäisen muuntajan syötössä kyseinen mittari on. Kuvassa 32 on esitetty yksinkertainen logiikka.



Kuva 32. Logiikka käytöntukijärjestelmän tekemään päätökseen mittarihälytyksestä

Toinen mahdollinen tapa saada kuvaavampi hälytys kj-vaihekatkoksesta ZNzn0-kytkentäisiltä muuntajilta, on luoda näitä mittareita varten erilaisilla jännite-ehdoilla jännite-epäsymmetriahälytys. Hälytykseen käytetyt jänniterajat on määritettävä kolmivaiheisesti, koska ZNzn0-kytkentäisen muuntajan toisipuolelle kj-vaihekatkos aiheuttaa kolmivaiheisesti alijännitettä. Vaikka kj-vaihekatkos aiheuttaa kolmivaiheisesti alijännitettä, ei alijännite ole symmetrisestä vaiheiden välillä. Tämän hälytyksen täytyy olla priorisoitu korkeampi arvoiseksi kuin vaihe puuttuu -hälytys, sillä kj-vaihekatkoksen aikana täytyy myös vaihe puuttuu -hälytyksen ehdot.

5.2 Jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajojen soveltuvuus

Tässä luvussa käsitellään tilastollisin menetelmin, kuinka soveltuvia nykyisen jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajat ovat Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisille muuntajille. Luvussa 5.2.1 on selvitetty hälytysten perusteella, ovatko kj-vaihekatkoksen aikana pienjänniteverkon vaihejännitteet olleet sellaiset, etteivät jännite-epäsymmetriahälytyksen ehdot ole täyttyneet.

Luvussa 5.2.2 on esitetty johtopäätökset ja korjaavat toimenpiteet, kuinka parantaa kj-vaihekatkoksen tunnistamista sähkömittareilla. Samalla on esitetty, mitä korjaavan toimenpiteen toimeenpanossa on huomioitava.

5.2.1 Kj-vaihekatkoksen aiheuttamia muita hälytyksiä

Luvussa 3.2.3 tutustuttiin kj-vaihekatkoksen aiheuttamaan teoreettiseen jännite-epäsymmetriaan kj- ja pj-verkoissa. Teoriassa tehtiin oletuksia, ettei kuormalla ja verkon epäsymmetrisillä ominaisuuksilla ole vaikutusta jännitteisiin. Lisäksi teoriassa tehtiin oletus, ettei vikapaikassa ole vuotovirtaa maahan eli maakosketusta. Todellisissa vikatilanteissa kuormituksella, verkon ominaisuuksilla sekä vikaimpedanssilla on vaikutusta jännitteiden muodostumiseen vikatilanteessa.

Elenialla käytössä olevan jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajat pohjautuvat historiasta eikä varsinaisia testejä ole teetetty muille kuin Dyn11-kytkentäiselle muuntajalle. [36] Tässä osiossa tarkastellaan nykyisen jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajojen soveltuvuutta Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisissä muuntopiireissä oleville mittareille.

Tässä luvussa jännite-epäsymmetrian hälytysrajojen soveltuvuutta on lähestytty tutkimalla uuden sukupolven mittareiden lähettämiä alijännitehälytyksiä. Tarkoitus on tutkia aiheuttavatko todelliset kj-vaihekatkokset vikapaikan takana oleville mittareille muita hälytyksiä kuin jännite-epäsymmetriahälytystä. Alijännitehälytysten avulla saadaan tieto kj-vaihekatkoksen aikaisista jännitteistä ilman jännite-epäsymmetria- tai vaihe puuttuu -hälytystä. Alijännitehälytyksiä on haettu 9.1.2024 – 23.1.2024 väliseltä ajalta, koska tällä aikavälillä oli 11 kpl kj-vaihekatkosvikaa. Oletettavasti suhteellisen suuri joukko alijännitehälytyksistä johtui kj-vaihekatkoksista.

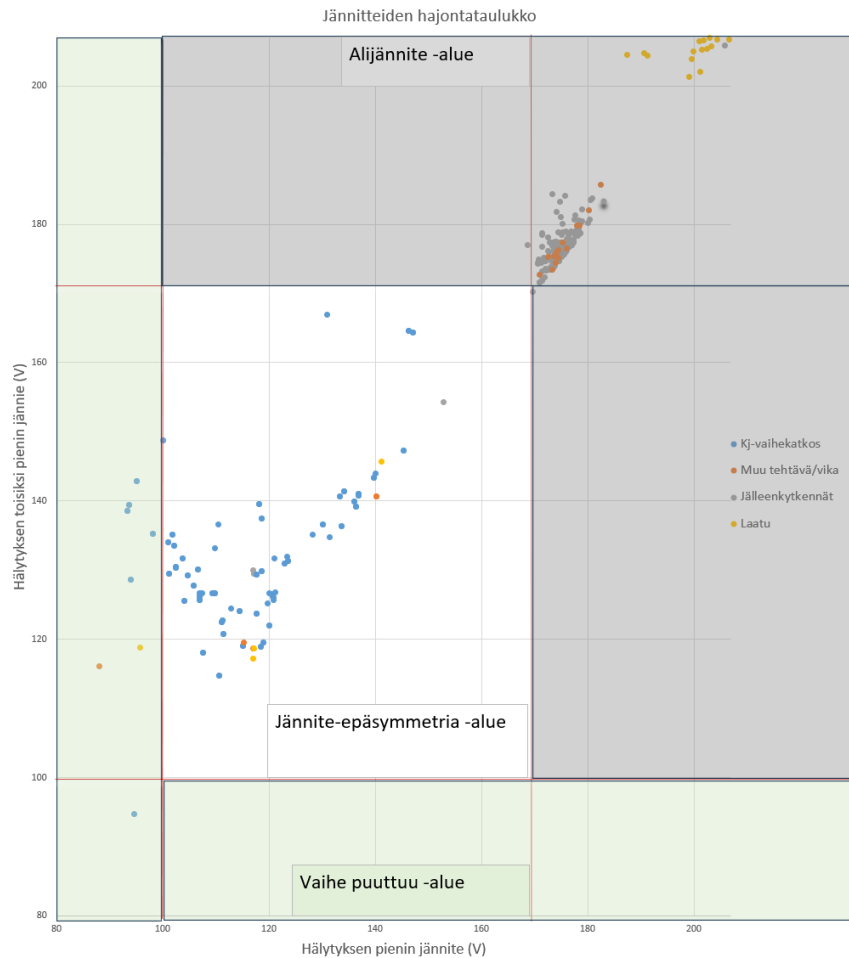
Alijännitehälytyksiä on 9.1.2024 – 23.1.2024 väliseltä ajalta yhteensä 1218 kappaletta. Vain osa alijännitehälytyksistä on kj-vaihekatkoksen aiheuttamia, jonka takia poimitulle datalle on tehtävä suodattamista. Hälytyksistä on suodatettu pois yksittäisillä aikalei-

moilla tulleet hälytykset. Kj-vaihekatkokset, mutta myös muut jakeluverkon viat vaikuttavat usein useampaan käyttöpaikkaan, jolloin näillä käyttöpaikoilla on samalla aikaleimalla hälytyksiä. Suodattamalla pois yksittäiset alijännitehälytykset, jäljelle jää 328 kappaletta alijännitehälytyksiä, joilla on vähintään toinen hälytys joukossa, jolla on sama aikaleima.

Suodatuksen jälkeen tarkasteltavaksi jääneiden hälytyksien ajanhetkiltä haettiin käytöntukijärjestelmään dokumentoidun vikakeskeytyksen tiedoista dokumentoitu tieto vikatyypistä. Vikatyypin perusteella hälytykset on jaettu kj-vaihekatkos-, muu vika-, pikajälleenkytkentä- ja laatu -joukkoihin.

- Kj-vaihekatkos-joukkoon kuuluvat hälytykset, jotka ovat aiheutuneet kj-vaihekatkoksesta
- Muu vika -joukkoon kuuluvat hälytykset, joilla on muusta syystä aiheutunut keskeytys
- Pikajälleenkytkentä -joukkoon kuuluvat hälytykset, jotka ovat muodostuneet samaan aikaan kun käyttöpaikka on kokenut pikajälleenkytkennän
- Laatu -joukkoon kuuluvat hälytykset, jotka eivät ole kokeneet samaan aikaan keskeytystä, mutta useampi vierekkäinen käyttöpaikka on lähettänyt alijännitehälytyksen samalla aikaleimalla.

Kuvassa 33 on esitetty jännitteiden hajontataulukko. Yksi piste tarkoittaa yhtä hälytystä. Hälytyksen sijainti kuvaajassa määräytyy siitä, mitkä ovat olleet hälytyksen kahden pienimmän jännitteen arvot. X-akselilla on hälytyksen pienin jännite ja y-akselilla on toiseksi pienin jännite. Väritetyillä alueilla on erotettu mahdolliset hälytykset.



Kuva 33. 9.1.2024 – 23.1.2024 alijännitehälytysten jännitteiden hajontakuvaaja.

Kuvasta 33 huomataan kj-vaihekatkoksen (siniset pisteet) aikaisten hälytysten osuvan suurimmalta osin jännite-epäsymmetriahälytyksen alueelle. Jännite-epäsymmetriahälytyksen alueelle osuvissa hälytysten rykelmästä voidaan nähdä yhtenäisyyttä teorian kanssa. Teorian mukaan kj-vaihekatkoksen aikaisten jännitteiden Dyn11- ja Yzn11-muuntajien toisiopuolella on kahden alimman jännitteen osalta 50 %:ia nimellisestä jännitteestä. Yhtenäisyys teorian kanssa nähdään siitä, että jännite-epäsymmetriahälytyksen alueen suurin rykelmä asettuu lähelle alueen vasemmanpuoleista alanurkan reunaa.

Kuvaajasta huomataan, että kj-vaihekatkoksesta johtuneiden hälytysten (siniset pisteet) vaihteluväli voi olla laaja. X-akselin jännitteiden vaihteluväli on 89,2 V – 147,1 V ja y-akselilla jännitteiden vaihteluväli on 90,2 V – 166,9 V. Kj-vaihekatkoksen aikana jännitteet ovat teorian mukaan pj-verkossa kahdella vaiheella 50 %:ia vikaa edeltäneestä vaihejännitteestä.

Oletetaan, että kj-vaihekatkoksen aikana Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisen muuntajan pj-vaihejännitteet eivät voi nousta yli 170 V, joka on samalla nykyinen jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniteyläraja. Kuvan 33 datasta muodostetaan todennäköisyysjakauma

niille hälytyksille, joiden vaihejännitteet ovat pienemmät kuin 170 V. Todennäköisyysjakauman avulla lasketaan todennäköisyys sille, että jokin vaihejännite on alle 100 V. Jonkin vaihejännitteen ollessa alle 100 V, muodostuu hälytykseksi vaihe puuttuu -hälytys. Kuvassa 34 on esitetty todennäköisyysjakauma.



Kuva 34. Kuvasta 33 hälytysdatasta poimittujen alle 170 V vaihejännitteiden jakauma. Keskiarvo on 124,4 V ja keskihajonta on 15,4 V. Hälytykset ovat 123 mittarilta, jolloin joukon koko on 246 kappaletta.

Kuvassa 34 on esitetty todennäköisyysjakauma vaihejännitteille kj-vaihekatkokuksessa. Kuvaan 34 on piirretty vihreällä alueella todennäköisyys sille, että jokin vaihejännite on alle 100 V, jolloin muodostuu vaihe puuttuu -hälytys. Todennäköisyys vaihe puuttuu -hälytykselle on noin 5,8 %:ia, joka nähdään kuvan 34 vihreän alueen pinta-alana. Tämä tarkoittaa sitä, että 9.1.2024 – 23.1.2024 joukon tapauksessa 94,2 %:n todennäköisyydellä jännite-epäsymmetriahälytys tuli tämänhetkisinä rajoilla. Laskemalla jännite-epäsymmetriahälytyksen jännitteen alarajaa esimerkiksi 90 V:iin, saadaan kattavuudeksi 98,8 %:ia jännite-epäsymmetriahälytyksen muodostumiselle. Jos alaraja on 80,0 V saadaan 99,7 %:n kattavuus.

Laskemalla jännite-epäsymmetriahälytyksen alarajaa ja vaihe puuttuu -hälytyksen rajaa, luodaan mahdollinen katvealue. Esimerkiksi, jos 100 V raja tiputetaan 80 V:iin, eivät mittarit enää lähetä hälytyksiä niistä tapauksista, joissa vain yhden vaiheen jännite on välillä 80–100 V. Katvealue on suurempi, mitä enemmän rajaa tiputetaan. Tällöin käytöntukijärjestelmään ei tule vaihe puuttuu -hälytystä, niistä vioista, joissa vain yhden vaiheen jännite on välillä 80–100 V. Tästä syystä ei ole järkevää pudottaa rajaa pelkästään sillä

perusteella, että kuvan 34 mukaisesti kattavuus saadaan mahdollisimman lähelle 100 %:ia.

5.2.2 Jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajojen päivitys

Nykyisillä jännite-epäsymmetriahälytyksen rajoilla Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisten muuntajien takaiset sähkömittarit lähettävät 94,2 %:n todennäköisyydellä jännite-epäsymmetriahälytyksen kj-vaihekatkoksen aikana, kuten luvussa 5.2.1 esitettiin. Kuvasta 33 huomataan olleen tapauksia, missä mittari on mitannut alle 100 V jännitteitä kj-vaihekatkoksen yhteydessä. Tällöin kyseiset mittarit ovat lähettäneet vaihe puuttuu -hälytyksiä. Kuvan 34 normaalijakauman avulla pyrittiin selvittämään todennäköisyyttä sille, että kj-vaihekatkoksen aikana ainakin yksi vaihejännite on alle 100 V aiheuttaen vaihe puuttuu -hälytyksen. Nykyisillä rajoilla todennäköisyys vaihe puuttuu -hälytykselle on 5,8 %.

Kuvan 33 hajontakuvaajan ja kuvassa 34 esitetyn normaalijakauman perusteella jännite-epäsymmetriahälytyksen alarajaa voisi laskea alemmaksi nykyisestä, jotta kj-vaihekatkoksesta aiheutuneet hälytykset kuvaisivat tarkemmin tilannetta. Asettamalla hälytyksen jännitteen alarajaksi 90 V saadaan jännite-epäsymmetriahälytyksen muodostumiselle todennäköisyys 98,8 %. Jännite-epäsymmetriahälytyksen alarajaa laskettaessa, on myös vaihe puuttuu -hälytyksen rajaa siirrettävä, mikäli muuta muutosta hälytyksen muodostumisen logiikkaan ei tule. Jännite-epäsymmetriahälytyksen alaraja on sopiva arvo vaihe puuttuu -hälytyksen rajaksi.

Jännite-epäsymmetriahälytyksen alarajan laskeminen 90 V:iin ja vaihe puuttuu -hälytyksen rajan laskeminen 90 V:iin, aiheuttaa rajojen muuttaminen katvealueen hälytyksille. Mittari ei muodosta kumpaakaan edellä mainittua hälytystä, jos vain yksi vaihejännite on välillä 90–100 V. Sen sijaan ainut muodostuva hälytys tässä tapauksessa on alijännitehälytys.

Jännite-epäsymmetrian yläraja 170 V on jo valmiiksi varsin korkealla verrattuna kuvan 33 mitattuihin jännitteisiin kj-vaihekatkoksen aikana. Ei ole ollut tilannetta, jossa Dyn11- tai Yzn11-kytkentäisissä muuntopiireissä mittareiden mittaamat vaihejännitteet olisivat olleet yli 170 V. Jännite-epäsymmetriahälytyksen ylärajaa ei kannata, koska tällöin kaivennetaan aluetta, jossa jännite-epäsymmetriahälytys muodostuu.

5.3 Nollavikatapausten tilastollinen tutkiminen hälytysdatasta

Tässä luvussa tutkitaan olemassa olevaa dataa nollavikalaukaisuista, jotka ovat tallentuneet mittaustietojärjestelmään hälytyksien yhteydessä. Luvussa 5.3.1 on tutkittu kuormituksen vaikutusta jännitteiden epäsymmetrian muutokseen niissä tilanteissa, joissa nollajohdin on kokonaan poikki ja niissä tilanteissa, joissa nollapiirissä on huono jatkuvuus. Luvussa 5.3.2 on esitetty johtopäätökset nollavikojen tutkimuksesta ja esitetty ehdotuksia, kuinka parantaa vaikeammin tunnistettavien nollavikojen tunnistamista.

5.3.1 Kuormitustilanteen vaikutus jännite-epäsymmetriaan

Teorian luvun 3.3 mukaan tähtipisteen siirtymiseen vaikuttaa vahvasti kuormitustilanteen symmetrisyys. Täysin symmetrisillä kuormilla ei muodostu jännitteiden epäsymmetriaa nollavikatilanteessa. Tässä luvussa tutkitaan nollavikalaukaisujen mukana tulleiden vaihevirtojen avulla, kuinka suuri vaikutus kuormituksella on jännitteiden vinoutumiseen erityyppisissä nollavioissa. Erityyppiset nollaviat on jaettu kahteen joukkoon sen perusteella, oliko vikapaikalla nollapiirin katkeaminen vai oliko nollapiirissä löysä liitos.

Tässä luvussa on tutkittu nollavikalaukaisujen yhteydessä saatua mittausdataa vianaikaisista jännitteistä ja virroista. Tämä tarkoittaa sitä, että nollavikalaukaisun ehdot ovat täyttyneet, jolloin suurimman vaihejännitteen arvo on aina yli 260 V ja pienimmän vaihejännitteen arvo on aina alle 210 V. Tämän lisäksi on hyvä tiedostaa, että hälytyksistä saadut vaihevirratt ovat vianaikaisia virtoja, eivätkä siten täysin kuvaa kuormitustilannetta juuri hetkeä ennen nollavikaa.

Nollavikalaukaisut on jaettu kahteen joukkoon riippuen, mitä käytöntukijärjestelmään kyseisestä tehtävästä on dokumentoitu vikatyypiksi. Dokumentoitu vikatyyppi voi olla joko ”nollajohdin poikki” tai ”liitinvika”. Tämän avulla voidaan selvittää eroavaisuus näiden kahden erityyppisten nollavian välillä.

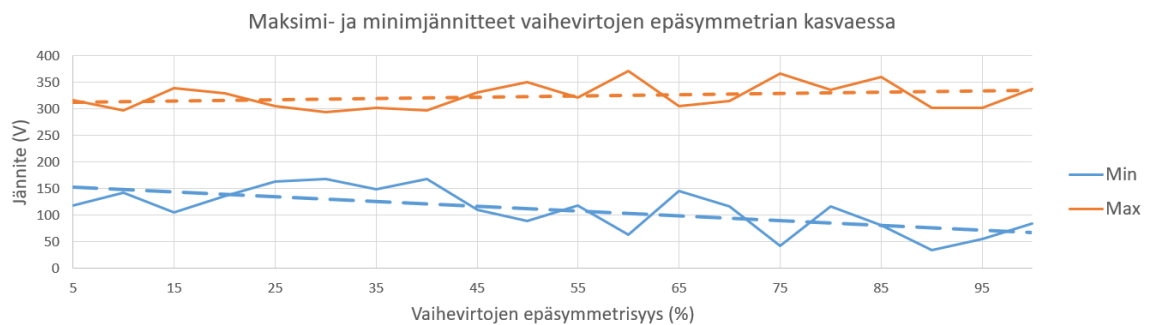
Mittareilta ei ole tällä hetkellä saatavilla tietoa vianaikaisista vaihekulmista. Sen sijaan kuormituksen epäsymmetriaa on kuvattu kaavan 5.1 avulla, jolla lasketaan prosentuaalinen virtojen epäsymmetria virtojen absoluuttisilla arvoilla.

$$\frac{|I_{\sigma,max} - I_{\bar{x}}|}{I_{\bar{x}}}, \quad (5.1)$$

missä $I_{\sigma,max}$ on sen vaiheen virta, joka poikkeaa eniten vaihevirtojen keskiarvosta. Tämä voi olla hälytyksistä tulleista vaihevirroista joko suurin tai pienin vaihevirta. $I_{\bar{x}}$ on vaihevirtojen keskiarvo. Tämän lisäksi hälytykset ovat ryhmitelty saadun epäsymmetrisen kuormitusprosentin perusteella 20 eri ryhmään. Tällöin esimerkiksi ryhmään 20 kuuluvat

ne hälytykset, joiden epäsymmetrinen kuormitusprosentti on välillä 95–100 % kaavan 5.1 perusteella. Verkkotietojärjestelmään ei ole tallennettu tietoa käyttöpaikkojen maadoituksista. Käyttöpaikkojen maadoitusarvojen tuntemisella saataisiin hyödynnettyä hälytysdataa tarkemmin.

Kuvassa 35 on esitetty nollavikalaukaisu -hälytysten yhteydessä tallentuneiden maksimi- ja minimivaihejännitteet vaihevirtojen epäsymmetrian funktiona niissä tapauksissa, jossa nollajohdin on kokonaan poikki. Tähän joukkoon kuuluu 131 kpl nollavikalaukaisuja.



Kuva 35. AMR-hälytyksien maksimi ja minimi vaihejännitteet vaihevirtojen epäsymmetrian funktiona, kun nollapiiri on kokonaan poikki.

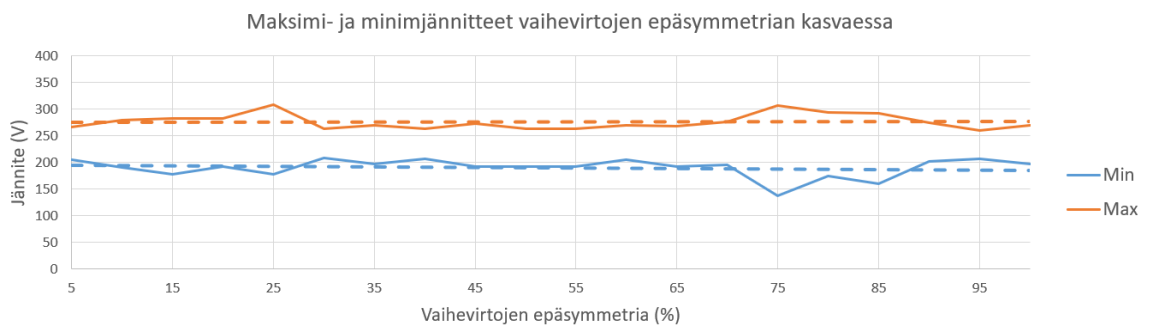
Kuvaan 35 on sovitettu lineaarisen regressiomallin mukaiset trendiviivat, jotka ovat piirretty katkoviivoilla kuvaajassa. Oranssi trendiviiva kuvaa maksimi vaihejännitettä ja sininen trendiviiva kuvaa minimi vaihejännitettä. Kuvaajan perusteella huomataan, että nollajohdinten ollessa kokonaan poikki, aiheutuu jännitteisiin voimakasta jännite-epäsymmetriaa. Jännite-epäsymmetria on voimakasta, vaikka vaihevirtojen epäsymmetria ei ole kovin suurta. Tämä nähdään kuvan 35 trendiviivoista, kun 0–5 % vaihevirtojen epäsymmetriassa suurin vaihejännite on 312 V ja pienin vaihejännite 158 V. Suurin ja pienin vaihejännite ovat selvästi ylittäneet nollavikalaukaisun vaadittavat jänniterajat, jotka ovat suurin vaihejännite yli 260 V ja pienin vaihejännite alle 210 V.

Kuvan 35 trendiviivoista huomataan, että virtojen epäsymmetrian kasvaessa jännitteiden vinoutuminen kasvaa maksimi- ja minimijännitteiden osalta. Tämä näkyy kuvaajassa toisistaan loittonevina suorina. Jos nollajohdin on täysin poikki, on sen tunnistaminen tehokasta nykyisillä rajoilla, sillä jännite-epäsymmetria on suurta.

Mikäli nollavikatehtävälle on dokumentoitu ”liitinvika”, nollapiirissä on ollut huono kontakti liitoskohdassa. Tyypillisiä esimerkkejä tästä ovat nollaliittimen tai -liittimien löysyys, jolloin liitosta ei ollut kiristetty riittävästi. Tällöin nollapiirin impedanssi on suunniteltua suurempi. Löysät liitokset eivät välttämättä aiheuta ongelmia pitkään aikaan asennuksesta. Pitkään jatkuneena, ne usein alkavat aiheuttamaan ongelmia, koska nollapiirin huonot

liitokset aiheuttavat liitoksessa lämpenemistä, joka voi entisestään kasvattaa liitoksen impedanssia. Löysät liitokset voivat löystyä entisestään esimerkiksi olosuhteiden vaihteluiden seurauksena. Nollajohtimen liitoksissa oleva vika on hankalaa löytää ennen oireiden, kuten jännitteiden vinoutumisen alkua.

Kuvassa 36 on esitetty nollavikalaukaisu -hälytysten yhteydessä saatavien maksimi- ja minimi vaihejännitteet vaihevirtojen epäsymmetrian funktiona niissä tapauksissa, joissa nollapiiri ei ole kokonaan poikki. Tähän joukkoon kuuluu 55 kpl nollavikalaukaisuja. Kuvassa 36 on sovitettu lineaarisen regressiomallin mukaiset trendiviivat maksimi vaihejännitteille oranssilla ja minimi vaihejännitteille sinisellä.



Kuva 36. AMR-hälytyksien maksimi ja minimi vaihejännitteet vaihevirtojen epäsymmetrian funktiona, kun nollapiiri ei ole kokonaan poikki.

Kuvasta 36 huomataan minimi ja maksimi vaihejännitteiden olevan huomattavasti lähempänä nollavikalaukaisu -hälytykseen vaadittavia jännitteitä verrattuna kuvan 35 tapaukseen. Vaihevirtojen epäsymmetrian ollessa 0–5 %, on maksimivaihejännite 276 V ja minimi vaihejännite 195 V. Vianaikaisten kuormitusvirtojen kasvaessa huomataan kuvan 36 trendiviivoista, ettei jännite-epäsymmetria kasva yhtä vahvasti kuin tapauksissa, joissa nollajohdin oli kokonaan poikki. Nollapiirin impedanssi on kuitenkin kasvanut liitin-vian seurauksena. Kasvanut nollapiirin impedanssi aiheuttaa sen, että kaikki nollavirta ei palaa nollapiiriä pitkin, vaan osa nollavirrasta jakaantuu matalaimpedanssisempaa reittiä eli vaihejohtimia pitkin takaisin syötölle, aiheuttaen jännitteiden vinoutumista.

5.3.2 Nollavikojen tunnistaminen AMR-mittareilla

Saatavilla olevan mittaridatan avulla pystyttiin muodostamaan suuntaa antava tulkinta jännitteiden vinoutumisesta kuormituksen kasvaessa. Saatavilla olevassa datassa on vian aikaiset virrat. Normaalissa käyttötilanteessa TN-järjestelmässä nollapiiri toimii vaihevirtojen paluureittinä syötölle. Nollavian aikana vaihevirrat eivät pääse palaamaan suunnitellusti nollapiiriä pitkin, vaan kulkeutuvat syötölle muita reittejä pitkin, kuten vai-

hejohtimia ja maata pitkin. Koska osa epäsymmetrisistä vaihevirroista palautuu vaihejohtimia pitkin, aiheuttaa se vaihevirroille summautumista, minkä takia hälytyksistä saatavat virrat eivät täysin kuvaa todellista kuormitustilannetta. Tämän lisäksi hälytyksistä ei ole saatavilla jännitteiden ja virtojen vaihekulmia, jotka ovat hyödyllisiä jännitteiden ja kuormituksen epäsymmetriaa tarkasteltaessa.

Saatu data jaettiin kahteen osaan käytöntukijärjestelmään vikatapauksille dokumentoitujen vikaa kuvaavien tietojen perusteella. Käytöntukijärjestelmästä oli saatavilla tieto, oliko nollajohdin poikki vai oliko kyseessä liitinviika nollapiirissä.

Kuvia 35 ja 36 toisiinsa vertaamalla nähdään, että nollajohtimen ollessa kokonaan poikki, tunnistaa sähkömittari nollavian varmemmin, koska jännitteet ovat huomattavasti vinoutuneempia. Nollajohtimen katkeamisen jälkeen paluuvirtojen reitti riippuu muuntamon ja käyttöpaikan maadoituksista. Hyvillä maadoituksilla jännitteiden vinoutuminen on vähäisempää nollavian aikana. Jokaisella käyttöpaikalla ei välttämättä ole hyvät maadoitukset, jolloin paluuvirroista suurempi osa kulkee vaihejohtimia pitkin aiheuttaen jännitteiden vinoutumista.

Jos nollavika johtuu liitinviasta nollapiirissä, tai jostain muusta syystä nollapiirin impedanssi on kasvanut, mutta piiri ei ole kokonaan poikki, on näiden nollavikojen tunnistaminen haastavampaa. Näissä tapauksissa mittareilta saadut jännitteiden arvot olivat lähempänä nollavikalaukaisun rajoja, kuin vastaavasti tapauksissa, jossa nollajohdin oli poikki.

Mahdollinen lähestymistapa tunnistaa mittareilla paremmin liitinviasta johtuneet nollaviat, on jättää käyttöön nykyinen nollavikahälytys toiminaan rinnakkain nollavikalaukaisun kanssa. Nollavikahälytyksen rajoja muutetaan siten, että ne tunnistavat nollavialle ominaisen jännite-epäsymmetrian herkemmin tiukentamalla nykyisiä rajoja. Nollavikahälytyksessä katkorele ei automaattisesti aukea, vaan hälytys tulee käytönvalvojalle reagoitavaksi. Nollavikahälytyksen hyöty on orastavien nollavikojen tuominen aikaisemmin käytönvalvojan tietoon, mutta haasteena on suuren epäsymmetrisen kuormituksen takia aiheutuva jännitteiden vinoutuminen ja sen mahdollisesti aiheuttamat turhat hälytykset. Tällä hetkellä ei ole tiedossa, kuinka paljon verkossa on käyttöpaikkoja, joissa jännitteet ovat vinoutuneet pelkän suuren epäsymmetrisen kuormituksen takia. Tästä syystä nollavikalaukaisun rajoja ei kiristetä, jolloin vältetään mahdolliset suuret määrät katkoreleen aukeamisia, jotka johtuisivat vahvasta vinokuormituksesta.

Toinen mahdollinen keino tunnistaa hitaasti alkavat nollaviat, on ali- ja ylijännitehälytysten hyödyntäminen näiden hälytysten esiintymistiheyden perusteella. Käytöntukijärjes-

telmä tallentaa käyttöpaikkakohtaisesti muistiin määritellyn aikavälin ajaksi käyttöpaikkojen mittareiden lähettämät ylijännite- ja alijännitehälytysten esiintymät. Määritetyn aikavälin aikana täytyisi tapahtua ennalta määritelty määrä alijännite- ja ylijännitehälytyksiä, jotta nollavikahälytys muodostuisi. Jos hälytyksiä tulee riittävästi, muodostuu tästä käytöntukijärjestelmään nollavikahälytys. Mikäli alijännite- ja ylijännitehälytyksiä ei muodostu määritellyssä aikavälissä tarpeeksi, pyyhkiytyvät ne pois tarkasteluajaväliltä käytöntukijärjestelmässä. [36]

6. SIMULOINTIMALLI

Työssä toteutetut simuloinnit ovat suoritettu PSCAD-simulointiohjelmistolla. Tässä luvussa esitetään kuinka mallinnettavan verkon komponentit ovat valittu, jotta päästään riittävän tarkkoihin ja verkon todellista käyttäytymistä kuvaaviin simulointituloksiin. [39, s. 32] Luvussa 6.1 on esitelty oleelliset komponentit, joita simulointimallissa on käytetty. Luvussa 6.2 on esitetty mallinnetun sähköaseman PSCAD-malli ja luvussa 6.3 esitellään, kuinka mallin varmennus on toteutettu. Simulointimallin varmentamisella todetaan mallin kuvaavan riittävän tarkasti todellisen verkon käyttäytymistä.

6.1 Tutkittavan verkon komponenttien mallintaminen

Simulointimallissa käytettävillä komponenteilla voi olla merkittävä vaikutus tutkittavien simulointien kannalta. Tästä syystä on tärkeää, että mallinnetut komponentit soveltuvat simuloitavaan tilanteeseen riittävän tarkasti. [39, s. 32] Tämän työn keskiössä on mittareiden kyky tunnistaa kj-vaihekatkos ja nollavika. Mittareiden hälytyksissä hyödynnetään keskiarvotamisjaksoja hälytyksen havainnointiajalla. Tästä syystä simulointimallissa ei ole valittu tarkimpia taajuusriippuvaisia komponentteja, koska lyhytaikaisten transientti-ilmiöiden tutkiminen ei ole tässä työssä keskiössä.

6.1.1 Mallinnettavat johdot

Simuloitavan verkon johtimet on mallinnettu PSCAD:n ”Coupled PI SECTION” -mallilla, joka ottaa huomioon vaihejohtimien välisen keskinäiskytketymisen. [39, s. 35] Coupled PI -malliin syötetään johdon myötä- ja nollaverkon impedanssit. Taulukossa 7 on esitetty simuloitavassa verkossa käytettyjen johtimien myötä- ja nollaverkon impedanssien arvot.

Taulukko 7. Eri johtimien myötä- ja nollaverkon impedanssien arvot, jotka syötetään johtimien PSCAD Coupled PI -malliin.

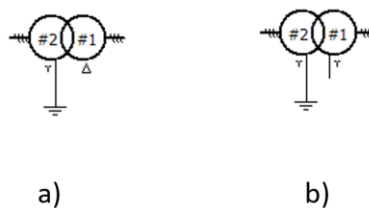
Positive Sequence	Rv63	Sp40	AXAL-TT95	AHPW95
+ve Sequence Resistance [ohm/m]	5,300E-04	8,47E-04	3,200E-04	3,20E-04
+ve Sequence Inductive Reactance [ohm/m]	3,680E-04	3,83E-04	1,060E-04	1,26E-04
+ve Sequence Capacitive Reactance [Mohm/m]	318,5	251	16,75	15,61
Zero Sequence				
Zero Sequence Resistance [ohm/m]	6,850E-04	9,97E-04	3,637E-03	5,30E-03
Zero Sequence Inductive Reactance [ohm/m]	1,899E-03	1,91E-03	1,520E-04	1,30E-04
Zero Sequence Capacitive Reactance [Mohm/m]	520,89	522	16,75	15,61

Kaapelien myötäverkon impedanssit ja nollaverkon kapasitiivinen reaktanssi saadaan laskettua johtimien datalehdissä ilmoitettujen tietojen perusteella. Sen sijaan kaapelien sarjanollaimpedansseja ei tunneta johtovakioina. Sarjanollaimpedanssit riippuvat johtimen sähköisistä ominaisuuksista, asennuksesta sekä maadoituksesta. [38] Taulukossa 7 esitetyt nollaverkon impedanssien arvot perustuvat johdinvalmistajalta saatuihin arvoihin.

6.1.2 Muuntajien kytkentäryhmän mallintaminen

Muuntaja on kokonaisuudessaan erittäin kompleksinen komponentti ja sille on ominaista erilainen käyttäytyminen jatkuvassa tilassa ja transienttiylijännitteitä aiheuttavissa tilanteissa. [39, s. 36] Tässä työssä mielenkiinnon kohteena on vikojen jatkuvan tilan jännite-epäsymmetria. Tällä perusteella muuntajia on mallinnettu PSCAD:n yksinkertaisilla 3-vaiheisilla muuntajien malleilla. PSCAD:n valmiit mallit soveltuvat jatkuvan tilan simulointeihin.

Luvussa 3 esiteltiin muuntajan kytkentäryhmien vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen muuntajan läpi. Eri kytkentäryhmät voitiin jakaa kolmeen eri muuntajatyypiin. Kytkentäryhmän kuuluminen tiettyyn muuntajatyypiin riippuu nollapiirin jatkumisesta muuntajan läpi sekä siitä, kuinka vaihejännitteet muodostuvat. Tätä teoriaa hyödynnetään simulointimallissa seuraavasti. Dyn11- ja Yzn11-muuntajat on mallinnettu tyypin 3 Dyn11-muuntajalla. Tyypin 2 ZNzn0-muuntajat ovat puolestaan mallinnettu tyypin 2 Yyn0-muuntajilla. Jatkuvassa tilassa jännite-epäsymmetria molempien muuntajien lävitse siirtyy samalla tavalla. Kuvassa 37 on esitetty muuntajien mallinnus PSCAD:ssa.



Kuva 37. Jakelumuuntajien mallinnus PSCAD:ssa. a) Tyypin 3 muuntaja Dyn11

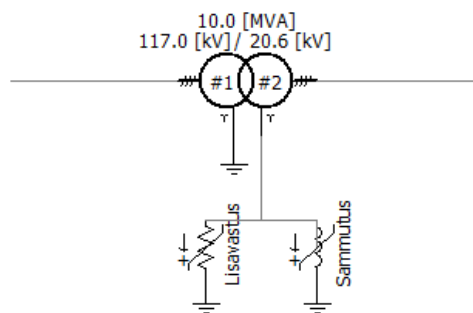
b) Tyypin 2 muuntaja Yyn0.

PSCAD:ssa valmiina saatavilla olevaan muuntajan malliin syötetään muuntajan nimellisteho, oikosulkureaktanssi, kuormitushäviöt ja tyhjäkäyntihäviöt. Muuntajan sähköiset arvot on saatu verkkotietojärjestelmään dokumentoidusta teknisistä tiedoista kyseiselle muuntajalle.

6.1.3 Maasulkuvirran kompensointilaitteistot

Laajoille kaapeliverkoille käytetään yleensä keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin lisäksi myös hajautettua kompensointia. Maasulkuvirran kompensoinnin tarkoitus on pienentää kapasitiivista maasulkuvirtaa, jotta päästään riittäviin maasulun aikaisiin kosketusjännitevaatimuksiin. [38] Maasulkuvirran kompensointikela eli sammutuskuristin kytketään verkon tähtipisteen ja maan väliin. Kuten todettiin kappaleessa 3.2.2 Elenian verkossa päämuuntajat ovat tyypillisesti Ynd-kytkentäisiä, jolloin tähtipistettä ei ole saatavilla päämuuntajan toisiopuolella. Tähtipiste voidaan luoda ZNyn-kytkentäisen maadoitusmuuntajan avulla, jolloin sammutuskuristin asennetaan maadoitusmuuntajan luoman tähtipisteen ja maan väliin. [20, s. 13–22]

Simulointimallissa päämuuntajan kytkentäryhmä poikkeaa todellisesta, jotta keskitetyn maasulkuvirran kompensointilaitteisto on helpommin mallinnettavissa. Päämuuntajan kytkentäryhmä on muutettu Yy-kytkentäiseksi, jolloin tähtipiste on suoraan saatavilla muuntajan toisiopuolelta. Päämuuntajan tähtipisteen ja maan väliin on kytketty rinnan sammutuskuristin ja lisävastus. Keskitetyn maasulkuvirran kompensointilaitteisto PSCAD:ssa on esitetty kuvassa 38.



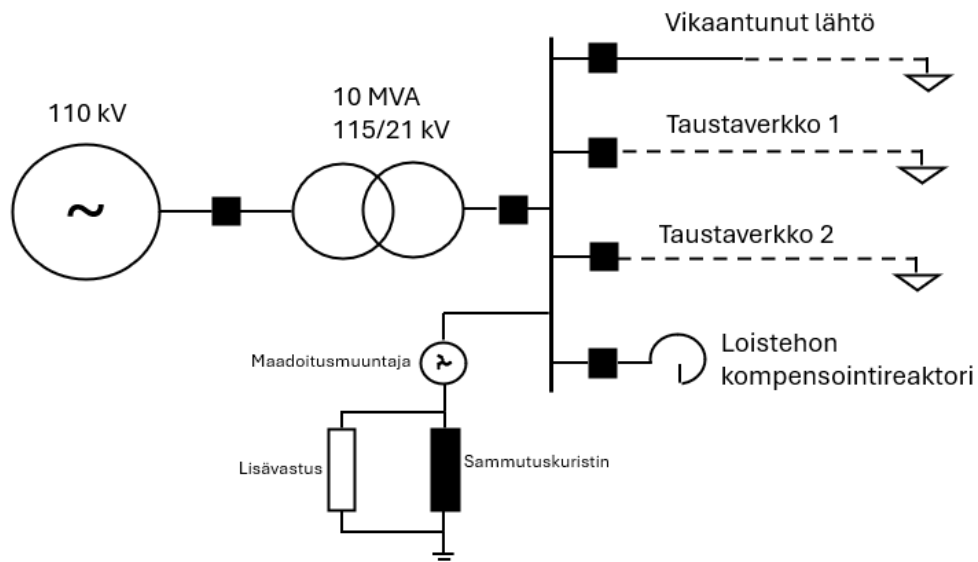
Kuva 38. Keskitetyn maasulkuvirran kompensointilaitteiston mallintaminen PSCAD:ssa.

Simulointimallissa hajautettuja maasulkuvirran kompensointilaitteistoja on mallinnettu ZNyn-kytkentäisillä maadoitusmuuntajilla. Hajautetun maasulkuvirran kompensointilaitteistot kytkettiin jakelumuuntajien yhteyteen keskijännitepuolelle. [39, s. 44] Sammutuskuristin kytkettiin tähtipisteen ja maan väliin ilman lisävastusta. Simulointimallissa vikaantuneella lähdöllä oli yksi 12,5 A kokoinen hajautetun maasulkuvirran kompensointilaitteisto. Taustaverkoilla oli yhteensä 140 A verran hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Todellisuudessa yksittäinen hajautettu kompensointilaitteisto on mitoitettu kompensoimaan 5–15 A maasulkuvirtaa. [40, s. 25]

Keskitetyn maasulkuvirran kompensointikelaa säädettiin simuloinneissa siten, että verkko jää alikompensoiduksi, mikä vastaa verkon todellista tilannetta. Kelaa säädettiin siten, että verkossa simuloitiin 1-vaiheista maasulkua ja verrattiin vian aikaista nollajännitteen U_0 ja ja nollavirran I_0 kulmaeroa. [39, s. 44] Keskitetyn kompensointikelan rinnalle on kytketty 2,5 Ω lisävastus. Todellisuudessa lisävastus on kytketty 500 V jännitetasoon, jonka takia simulointimallissa lisävastus on redusoitava 20,6 kV jännitetasoon. Simulointimallissa lisävastuksen redusoitu arvo on 1415 Ω . [39, s. 44]

6.2 Könnin sähköaseman yksinkertaistettu verkkomalli

Työssä mallinnettavaksi sähköasemaksi valittiin Elenian verkkoalueella sijaitseva Könnin sähköasema. Könnin sähköasema valittiin mallinnettavaksi, koska mittaustietojärjestelmästä oli saatavilla kj-vaihekatkoksen aikaisia jännitteitä käyttöpaikoilta, joita syötetään ZNzn0-kytkentäisellä muuntajalla. Mallinnettavan kj-vaihekatkoksen kytkentätilanne on esitetty myös luvun 5.1.1 kuvassa 30. Simuloinnilla on tarkoitus varmentaa ZNzn0-kytkentäisen muuntajan vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen kj-vaihekatkoksen aikana. Tämän lisäksi tarkastellaan erilaisten kj-vaihekatkosten aikaisia maasulkuja ja niiden vaikutusta Dyn11- ja ZNzn0-kytkentäisten muuntajien toisipuolelle. Kuvassa 39 on esitetty Könnin sähköaseman PSCAD-mallin verkkokaavio. Liitteessä A on simuloinneissa käytetty PSCAD-simulointimalli.



Kuva 39. Könnin sähköaseman PSCAD-mallin verkkokaavio.

Kuvan 39 vikaantunut lähtö koostuu sekä kaapelista että ilmajohtosta. Normaali-kytkentätilanteessa lähdössä on kaapelia 14 km ja avojohtoa 9 km. Todellisessa tilanteessa oli

hyödynnetty kaukokäyttöisiä erottimia rajatessa vian vaikutusalueita. Kytkenämuutosten jälkeen lähdössä oli kaapelia 5 km ja avojohtoa 5 km ja tätä kytkentätilannetta simuloinnissa mallinnetaan. Tässä tilanteessa loppua 9 km kaapelia ja 4 km avojohtoa syötetäänkin taustaverkon 2 kautta. Vikaantuneessa lähdössä suurin osa kaapelista on AHXWP95-kaapelia. Vikaantuneella lähdöllä on 4 km Rv63-johtoa ja 1 km Sp40-johtoa. Vikaantuneella lähdöllä oli vikatilanteen aikana syötössä 11 jakelumuuntajaa, joiden nimellisteho vaihtelee välillä 50 kVA – 400 kVA.

Simuloinneissa taustaverkko 1 koostuu 47 km:stä kaapelista ja 19 km:stä ilmajohtosta. Kaapeli on mallinnettu kokonaisuudessaan AXAL-TT95 kaapelina ja avojohto on mallinnettu rv63-johtona. Taustaverkko 2 koostuu 52 km kaapelista ja 14 km ilmajohtosta, jotka ovat mallinnettu AXAL-TT95 kaapelina ja sp40 johtona.

Maasulkuvirran suuruus verkolle oli 214 A. Tämä arvo saatiin simuloimalla 1-vaiheinen jäykkä maasulku verkossa ilman, että maasulkuvirtaa kompensoitiin. Hajautettua maasulkuvirran kompensointia oli taustaverkolla 1 85 A ja taustaverkolla 2 55 A. Keskitetyn kompensointiyksikön syöttämä induktiivinen maasulkuvirta oli 63,6 A. Kokonaisuudessaan maasulkuvirtaa kompensointiin 203,6 A verkon jäädessä tällöin alikompensoiduksi 10,4 A.

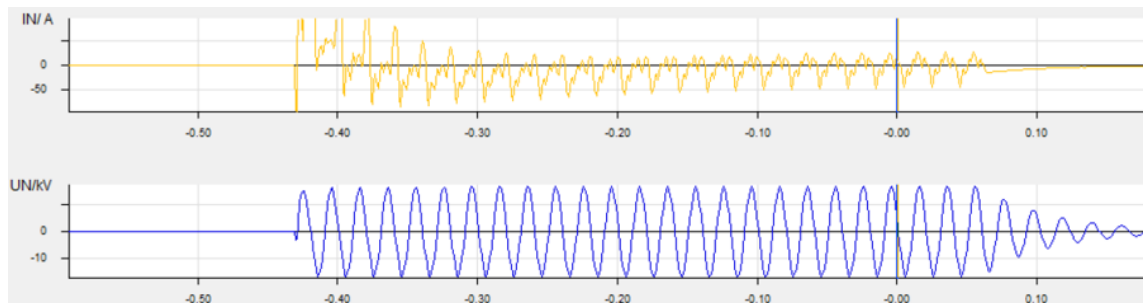
6.3 Simulointimallin soveltuvuuden varmentaminen

Simulointimallit on hyvä varmentaa, jotta ne kuvaavat verkkoa simuloitavaan tilanteeseen nähden oikein. Paras tapa mallin varmentamiseen on verrata mallia ja todellisia kenttämittauksia tutkituista simulointitapauksista. [39, s. 47] Tässä työssä simulointimallilla luodaan tilanne uudestaan 2.1.2024 tapahtuneesta vikatilanteesta. Koska kyseessä oli vikatilanne eikä suunniteltu mittausjärjestely, on haastavaa käyttää mallin verifiointiin ainoastaan viasta saatua häiriötallennetta. Vikatilanteessa on muuttuvia olosuhteita, kuten vikaresistanssi ja mahdollinen vian katkeilu. Tästä syystä mallin verifiointiin käytetään vuonna 2022 toteutetusta maasulkukokeesta saatua häiriötallennetta. Maasulkukokeessa toteutettiin jäykkä 1-vaiheinen maasulku verkossa 1 km päässä sähköasemalta olevalle muuntamokopille. Simulointimallissa jäykkä 1-vaiheinen maasulku on mallinnettu siten, että 1-vaiheisen maasulun vikaresistanssin arvo on 0Ω . Maasulkukoe oli toteutettu eri johtolähdölle, kuin missä tammikuussa 2024 ollut vika oli.

Maasulkukokeesta saadun häiriötallenteen avulla tehty verifiointi osoittautui haasteelliseksi. PSCAD-simulointimallissa verkon ja sen kuormien mallinnus on toteutettu yksinkertaisesti ja simuloinnin päämääränä on ollut selvittää jatkuvan tilan jännitteitä kj-vaihe-

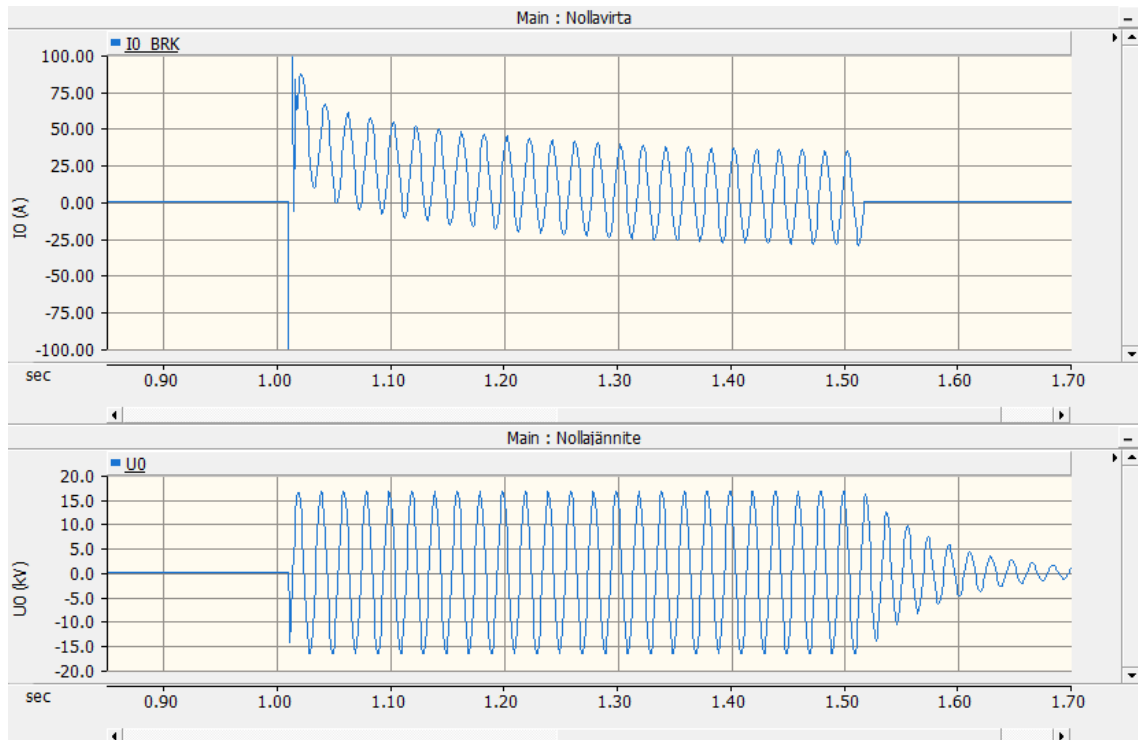
katkoksen aikana. Simulointimallin yksinkertaisuuden vuoksi simuloinnista saadut tulokset jäykästä 1-vaiheisesta maasulusta poikkesivat vuoden 2022 maasulkukokeen yhteydessä saadusta häiriötallenteesta. Maasulkukoe vuonna 2022 on toteutettu kuvassa 39 esitetylle taustaverkolle 1. Maasulkukoe on suoritettu sähköasemalta katsottuna lähdön alkupäässä n. 1 km:n päässä sähköasemasta. Maasulkukokeesta saadusta häiriötallenteesta kuvassa 40 nähdään selkeästi, että maasulkuvirta sisältää huomattavan määrän harmonisia maasulkuvirtakomponentteja. Epälineaaristen kuormien verkkoon syöttämät harmoniset komponentit aiheuttavat säröytymistä maasulkuvian ajan. Harmonisille maasulkuvirroille on tyypillistä suurempi riippuvuus vikakohtasta. Harmoniset maasulkuvirrat ovatkin suurimpia lähellä sähköasemaa, koska maasulkuvirran kohtaama kokonaisimpedanssi on pienempi. Maasulussa vikaresistanssilla on merkitystä säröytymiseen. Vikaresistanssi kasvattaa nopeasti harmonista kokonaisimpedanssia pienentäen harmonisia maasulkuvirtoja. [41]

Lähes vikaimpedanssiton maasulkukoe, joka suoritetaan lähellä sähköasemaa, sisältää suuren määrän harmonisia maasulkuvirtakomponentteja näkyen kuvassa 40 virran säröytymisenä. Yliaallot ovat aiheuttaneet virran säröytymistä koko maasulkukokeen keston ajan. Maasulkukokeen aikainen maasulkuvirta nähdään häiriötallenteesta kuvassa 40. Maasulkuvirta ajan funktiona on esitetty kuvassa 40 keltaisella.



Kuva 40. Maasulkukokeessa mitattu maasulkuvirta kuvataan keltaisella ja tähtipisteen ja maan välinen nollajännite sinisellä. Ajanhetkellä $t = 0$ rele antoi avautumiskäskyn ja 55 ms myöhemmin avautui katkaisija.

Simuloinneissa ei ole tarkasti mallinnettu epälinearisuuksia, jonka takia simuloitussa maasulkuvirran transienteissa ei esiinny häiriötallennetta vastaavaa säröytymistä. Simuloidussa verkossa 1-vaiheisen jäykän maasulun aikainen maasulkuvirta ja tähtipisteen ja maan välinen nollajännite on kuvassa 41.



Kuva 41. Simuloitu 1-vaiheinen jäykkä ($R_f = 0$) maasulku. Ylempänä on maasulkuvirta ja alempana on tähtipisteen ja maan välinen nollajännite ajan funktiona.

Simuloinneissa vika alkaa ajanhetkellä $t = 1,097$ s ja viankesto on 0,5 s, joka vastaa maasulkukokeessa vian kestoaikaa. Simuloinnissa vian alkamisaikaa on säädetty siten, että simuloinnista saatu maasulkuvirran tasavirtakomponentti vastaa häiriötallenteen tasavirtakomponentin suuruutta $I_{DC} = 2,72$ A. Tällöin maasulku alkaa jännitteen jakson vastaavassa kohdassa kuin häiriötallenteessa.

Häiriötallenteen ja simuloinnin nollajännitteet ovat suuruusluokaltaan vastaavia keskenään. Häiriötallenteesta saatu nollajännitteen tehollisarvo on 11,44 kV ja simuloidun verkon nollajännitteen tehollisarvo on 11,85 kV. Häiriötallenteessa maasulkuvirran tehollisarvo oli 18,9 A ja simuloidun verkon maasulkuvirran tehollisarvo oli 19,3 A ennen katkaisijan aukeamista.

Verrattaessa häiriötallenteen ja simuloidun verkon nollavirtoja keskenään, on ero selkeä säröytymisen osalta. Häiriötallenteen maasulkuvirta sisältää kokeen keston ajalta harmonisia ylitaajuuskomponentteja näkyen maasulkuvirran säröytymisenä. Maasulkuvirran taajuuskomponentit saadaan laskennallisesti hyödyntämällä Fourier'n muunnosta. Elenian käyttämässä häiriötallennesovelluksessa on laskentaominaisuus Discrete Fourier Transform (DFT) eli Suomeksi diskreetille Fourier -muunnokselle. Koska DFT-muun-

nos on hyvin raskas laskennallisesti, käyttävät simulointiohjelmit useinkin nopeaa Fourier- eli FFT (Fast Fourier Transform) -muunnosta taajuusjakauman laskemiseen. [42] PSCAD-ohjelmistossa hyödynnettiin FFT-komponenttia maasulkuvirran taajuuskomponenttien simuloinnissa. Taulukkoon 8 on koottu häiriötallenteen maasulkuvirran DFT-laskennan taajuuskomponentit sekä simuloinnista saadut maasulkuvirran FFT-laskennan taajuuskomponentit.

Taulukko 8. Häiriötallenteen maasulkuvirran DFT tehollisarvot ja simuloinnin FFT tehollisarvot juuri ennen katkaisijan aukeamista.

Yliaallon kertaluku	Häiriötallenne DFT RMS (A)	Simuloitu FFT RMS (A)
DC	2,72	2,72
1	14,99	14,23
2	4,91	11,99
3	6,45	6,31
4	2,65	2,63
5	6,04	1,58
6	0,29	0,86
7	1,60	0,64

Taulukosta 8 nähdään, että perustaajuuden sekä 3. ja 4. kertaluvun yliaaltojen osalta häiriötallenteen ja simuloinnin maasulkuvirtakomponentit ovat lähellä toisiaan. Huomataan, että 2., 5., 6. ja 7. kertaluvun virtakomponentit eroavat toisistaan suuresti.

Maasulkuvirran osalta merkittävin komponentti on peruskomponentti eli 50 Hz taajuuskomponentti. Simuloinnista pystyttiin luomaan suuruusluokaltaan vastaava 50 Hz maasulkuvirtakomponentti. Häiriötallenteesta saatu perustaajuinen maasulkuvirta oli 15,0 A ja simuloinnista saatu vastaava komponentti oli 14,4 A juuri ennen katkaisijan aukeamista.

7. SIMULOINTIEN TULOKSET

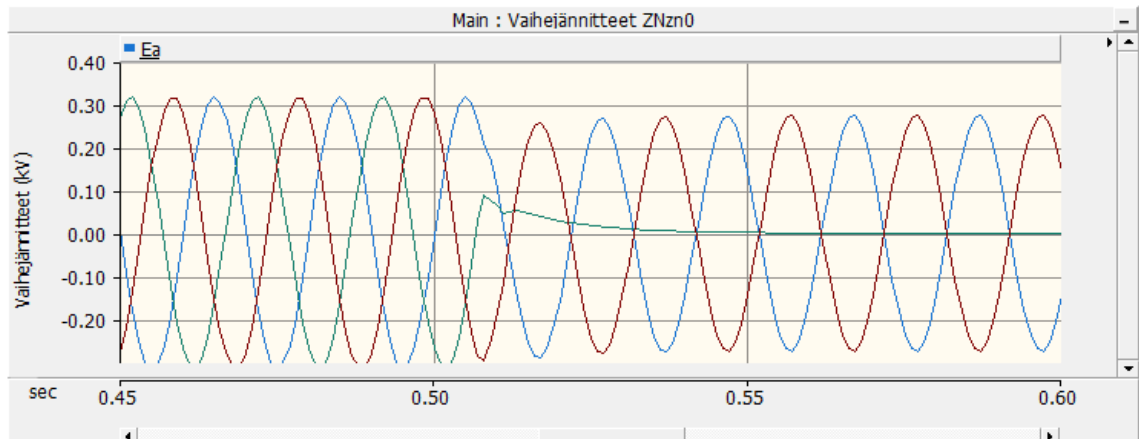
Tässä luvussa on esitelty keskeisimmät simulointitulokset ja pohdintaa tulosten oikeellisuudesta. Työn tarkoituksena oli varmentaa kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen kj-verkosta pj-verkkoon. Simuloinnit toteutettiin siten, että simuloitiin kj-vaihekatkos ja verrattiin simuloituja pienjännitetason vaihejännitteitä mittareilta tallentuneisiin pj-vaihejännitteisiin, joita on esitelty luvussa 5.1.1. Tämän lisäksi simuloitiin kj-vaihekatkostapauksia, joissa on erilaiset maasulkutilanteet. Tilanteet ovat jaoteltu sen perusteella, onko maakosketus katkenneesta kohdasta katsottuna syötön vai kuorman puolella. Simuloinneissa tutkittiin muuttaako maasulun vikaresistanssin suuruus pj-vaihejännitteitä Dyn11- tai ZNzn0-kytkentäisten muuntajien toisiopuolella. Samalla mitattiin maasulkuvirran ja nollajännitteen suuruutta ja verrattiin sitä Könnin sähköaseman suunnatun maasulkusuojauksen asetteluihin.

Simuloinneissa on kerätty vikojen pysyvän tilan suureita. Tämä on toteutettu siten, että vikaa on pidetty simulointimallissa päällä simuloinnin loppuun asti eikä ole huomioitu, että todellisuudessa sähköasemalla vikaantuneen lähdön johtokatkaisija mahdollisesti avautuisi. Simulointitulokset on koottu taulukoihin. Luvun taulukoihin on myös kerätty tieto maasulun aikaisista maasulkusuureista, joita on verrattu todellisiin Könnin sähköaseman suojausasetteluihin ja koottu tieto, olisiko vikalähdön katkaisija auennut.

7.1 Kj-vaihekatkos ilman maakosketusta

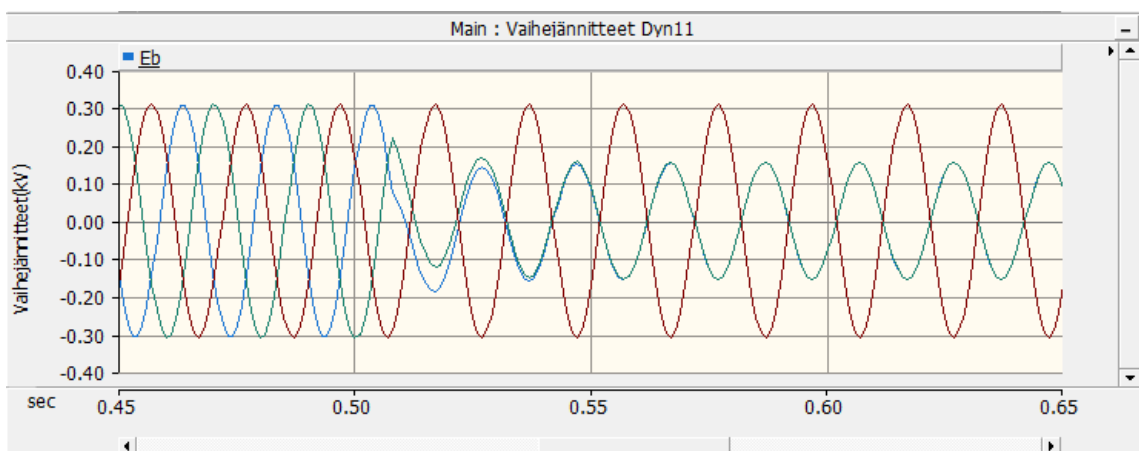
Ensimmäisenä simuloitiin kj-vaihekatkos ilman maakosketusta. Tämä on mahdollinen kj-vaihekatkosvika, joka johtuu tyypillisesti lyhyiden johtimien katkeamisesta, esimerkiksi pylväshaararakenteessa olevan lyhyen johtimen eli jompin katkeamisesta. Tällöin johdin roikkuu ilmassa katkenneen kohdan kummastakin päästä eikä johtimella ole johtavaa yhteyttä maahan. Simuloinneissa on tarkasteltu pienjännitetason vaihejännitteitä ennen ja jälkeen kj-vaihekatkoksen. Kj-vaihekatkos tapahtui ajanhetkellä 0,50 sekuntia vaihejohtimeen b.

Kuvassa 42 on esitetty pienjänniteverkon vaihejännitteet ZNzn0-kytkentäisen muuntajan toisiopuolella kj-vaihekatkoksen aikana. ZNzn0-kytkentäisen muuntajan tapauksessa kaikki toisiopuolen vaihejännitteet putoavat kj-vaihekatkoksessä. Pienjänniteverkossa b-vaiheen vaihejännite on tehollisarvoltaan 0,12 V. Tehollisarvoiltaan a-vaiheen jännite on 200,8 V ja c-vaiheen jännite on 200,8 V.



Kuva 42. Pj-verkon vaihejännitteet ZNzn0-kytkentäisen muuntamon toisiopuolella. Ajanhetkellä 0,50 s kj-jänniteverkossa b-vaiheen katko. Kuvassa sininen käyrä on a-vaihe, vihreä käyrä on b-vaihe ja punainen käyrä on c-vaihe.

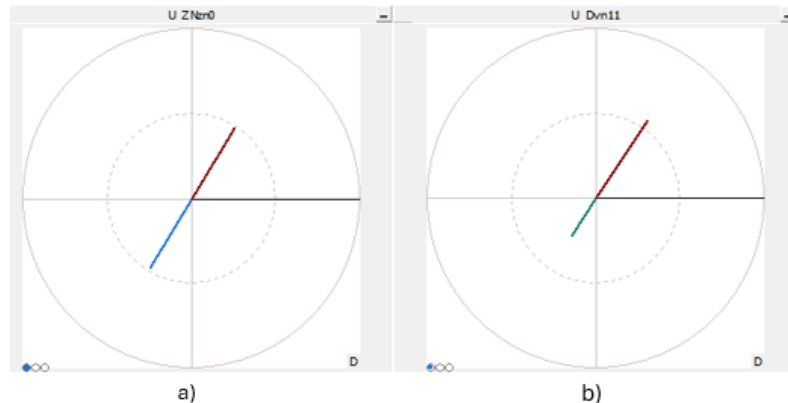
Kuvassa 43 on esitetty pienjänniteverkon vaihejännitteet Dyn11-kytkentäisen muuntajan toisiopuolella kj-vaihekatkoksen aikana. Dyn11-kytkentäisen muuntajan tapauksessa a- ja b-vaiheen osalta pienjänniteverkon tehollisarvoiset vaihejännitteet ovat 116,7 V ja 116,8 V. C-vaihe pysyi muuttumattomana ja sen vaihejännitteen tehollisarvon suuruus on 233,6 V.



Kuva 43. Pj-verkon vaihejännitteet Dyn11-kytkentäisen muuntamon toisiopuolella. Ajanhetkellä 0,50 s kj-jänniteverkossa b-vaiheen katko. Kuvassa sininen käyrä on a-vaihe, vihreä käyrä on b-vaihe ja punainen käyrä on c-vaihe.

Kj-vaihekatkoksen seurauksena vaihekulmat muuttuvat normaaleista vaihekulmista. ZNzn0-kytkentäisen muuntajan tapauksessa pj-verkon alijännitteisten a- ja c-vaiheiden vaihekulmat muuttuvat siten, että ne ovat vastakkaisuuntaiset. Tämä nähdään kuvan 44 a) tapauksessa. Dyn11-kytkentäisen muuntajan tapauksessa a- ja b-vaiheiden suuruus ja vaihekulmat muuttuvat samanlaisiksi. Nämä vaiheet ovat vastakkaisuuntaiset

tervettä c-vaihetta nähden. Vastakkaisvaiheisuus tervettä vaihetta nähden nähdään kuvassa 44 b).



Kuva 44. *Pj-verkon vaihejännitteiden vaihekulmat kj-vaihekatkoksen aikana ilman maakosketusta, kun verkkoa syöttävä jakelumuuntaja on a) ZNzn0-kytkentäisen b) Dyn11-kytkentäisen.*

Vian aikana maayhteys muodostuu ainoastaan maakapasitanssien kautta, jonka takia maasulkuvirta on hyvin pieni. Simuloinneissa vikaantuneen lähdön katkaisijalta mitattu maasulkuvirta on 0,02 A ja tähtipisteen ja maan välinen nollajännite on 0,02 kV.

7.2 Kj-vaihekatkos maakosketuksella

Tässä luvussa tarkastellaan tilannetta, jossa kj-vaihekatkoksen yhteydessä katkenneesta kohdasta katsottuna syötön tai kuorman puoleinen johdin on maakosketuksissa. Katkennut johdin voi saada jäykän yhteyden maahan, mikäli se osuu esimerkiksi verkon rakenteessa olevaan maadoitettuun osaan. Useasti katkennut johdin putoaa maahan tai johdin jää puun kautta maakosketukseen, jolloin vikaresistanssi voi tilanteesta ja välimateriaalin ominaisuuksista riippuen olla hyvin suuri, kymmeniä ja talvella jopa satoja k Ω . Myös päällystettyjen ilmajohtimien tapauksessa on jäykän maasulun mahdollisuus pienempi johtimen katketessa. Kaapeliverkossa johtimen katkeaminen käytännössä johtaa aina hyvin jäykkään maasulkuun. Simulointitapauksissa vikaresistanssin suuruutta muutettiin portaittain välillä 0–8000 Ω ja ovat simulointitapausten yhteydessä kirjattu taulukoon.

Könnin sähköaseman suunnatun maasulkusuojauksen asetteluarvot kompensoidulle verkolle on nollavirran osalta ensimmäiselle portaalille $I_0 > 1,0$ A ja tähtipisteen ja maan välinen nollajännite on oltava $U_0 > 1,19$ kV. Toisen portaan suunnatun maasulun suojausasettelut ovat $I_0 > 1,5$ A ja $U_0 > 0,95$ kV. Suunnatussa maasulkusuojaus tulla sekä nollavirta- että nollajännite-ehtojen täytyä, jotta suojaus laukaisee. [43]

7.2.1 Vaihekatkos ja maasulku kuorman puolelta

Tähän lukuun on koottu simulointien tulokset, joissa vaihekatkoksen jälkeen kyseisen vaiheen johdin on kuorman puolelta maasulussa. Simuloinneissa vaihekatkos alkaa ajanhetkellä 0,50 sekuntia ja maasulku alkaa ajanhetkellä 0,51 sekuntia. Vaihekatkos ja maasulku toteutettiin vaiheelle b.

Taulukkoon 9 on koottu simulointitapauksista saadut pj-puolen vaihejännitteet sekä ZNzn0- että Dyn11-kytkentäisille muuntajille. Tämän lisäksi taulukkoon on kerätty maasulun aikaiset sähköiset suureet maasulun aikaisesta lähdön katkaisijan mittaamasta nollavirrasta ja tähtipisteen ja maan välisestä nollajännitteestä.

Taulukko 9. Kj-vaihekatkos, maasulku katkenneen johtimen kuorman puolelta

Maasulun vika-resistanssi	Maasulun aikaiset sähköiset suureet								
	Pj-verkon vaihejännitteet (V)						Kj-verkon suureet		Johtokatkaisija aukeaa (K=kyllä/E=ei)
	ZNzn0			Dyn11			I _o (A)	U _o (kV)	
a	b	c	a	b	c				
0 Ω	200,5	25,7	206,1	111,9	121,1	229,1	4,9	4,1	K
50 Ω	200,6	24,7	206	111,9	120,8	229,1	4,6	3,9	K
150 Ω	200,8	22,9	205,6	112	120,2	229,1	4,3	3,6	K
500 Ω	201,2	18,3	205,1	112,2	118,8	229,1	3,5	2,9	K
1500 Ω	201,8	11,6	204,3	112,8	117	229,1	2,2	1,8	K
3000 Ω	202,2	7,6	203,8	113,4	116	229,1	1,4	1,2	K
5000 Ω	202,5	5,2	203,5	113,8	115,5	229,1	1,0	0,8	E
8000 Ω	202,7	3,6	203,3	114	115,1	229,1	0,6	0,5	E

Taulukosta 9 nähdään, että ZNzn0-kytkentäisellä muuntajalla b-vaiheen jännite putoaa nimellisestä hyvin pieniksi. Vikaresistanssin ollessa pieni, nousee maasulun aikainen b-vaihejännite ZNzn0-kytkentäisen muuntajan toisiopuolella. Vikaresistanssin kasvaessa b-vaiheelle indusoitunut vaihejännite pienenee. Jos vikaresistanssia kasvatetaan ääretömyyksiin, vastaisi se tilannetta, jossa kj-johdin jäisi roikkumaan ilmaan, joka esitettiin simuloinneissa luvussa 7.1. ZNzn0-kytkentäisen muuntajan tapauksessa a- ja c-vaiheiden jännitteet ovat pudonneet n. 86 %:iin alkuperäisistä vaihejännitteistä.

Kj-vaihekatkos, jossa kuorman puoleinen johdin on maakosketuksessa, aiheuttaa erilainen jännitteiden indusoituminen Dyn11-kytkentäisen muuntajan toisiopuolelle. Dyn11-kytkentäisen muuntajan osalta yksi vaihe pysyy ennallaan niin tehollisarvoltaan, kuin vaihekulmaltaankin. Kahden alijännitteisen vaiheen osalta huomataan keskinäistä eroa toisistaan eri tapauksissa. Alijännitteisten vaiheiden jännitteiden suuruudet eroavat eri tapauksissa. Tapauksista huomataan, että mitä suuremmaksi vikaresistanssi kasvatetaan,

sitä yhdenmukaisemmaksi alijännitteisten vaiheiden vaihejännitteet muuttuvat. Myös vaihekulmat muuttuivat näkyen, etteivät alijännitteisten vaiheiden kulmat olleet samat. Pahin tapaus on tilanne, jossa vikaresistanssi on 0Ω . Tällöin alijännitteisten vaihejännitteiden tehollisarvojen välinen ero on suurin. Samoin vaihekulmat poikkeavat toisistaan eniten, ja pahimmassa simulointitapauksessa vaihekulmat poikkesivat $180^\circ \pm 10^\circ$ verrattuna terveen vaiheen vaihekulmaan. Simulointien perusteella kuitenkin ei pitäisi joutua tilanteeseen, jossa 0Ω vikaresistanssinen maasulku jäisi sähköaseman suojaukselta tunnistamatta. Pieni impedanssisen maasulun aikana nollajännite ja nollavirta ovat korkeammat kuin suojauksen asettelut.

Kj-vaihekatkon jälkeen maakosketuksen ollessa kuorman puolella ovat maasulkuvirta ja nollajännite pienet jäykässäkin maasulussa. Simulointitapauksissa, joissa maasulun vikaresistanssi on ollut 1500Ω tai pienempi, ovat katkaisijat auenneet 2. portaan ehdolla. Vikaresistanssin ollessa välillä $1500\text{--}5000$ on 1. portaan maasulkuehto täyttynyt. Vikaresistanssin ollessa yli 5000Ω , suojausasettelujen ehdot eivät täyty maasulkuvirran eivätkä nollajännitteen osalta.

7.2.2 Vaihekatkos ja maasulku syötön puolelta

Tähän lukuun on koottu simulointitulokset, joissa vaihekatkoksen jälkeen kyseisen vaiheen johdin on syötön puolelta maasulussa. Simuloinneissa vaihekatkos alkaa ajanhetkellä $0,50$ sekuntia ja maasulku alkaa ajanhetkellä $0,51$ sekuntia. Vaihekatkos ja maasulku tehtiin vaiheelle b. Simulointitulokset on koottu taulukkoon 10.

Taulukko 10. Kj-vaihekatkos, maasulku katkenneen johtimen syötön puolelta.

Maasulun vikaresistanssi	Maasulun aikaiset sähköiset suureet								
	Pj-verkon vaihejännitteet (V)						Kj-verkon suureet		Johtokatkaisija aukeaa
	ZNzn0			Dyn11					
	a	b	c	a	b	c	Io (A)	Uo (kV)	(K=kyllä/E=ei)
0Ω	203,2	0,6	202,7	114,9	114,2	229,1	14,0	11,9	K
50Ω	203,2	0,6	202,7	114,9	114,2	229,1	13,3	11,2	K
150Ω	203,1	0,5	202,7	114,9	114,2	229,1	11,9	10,1	K
500Ω	203,1	0,4	202,8	114,9	114,3	229,1	8,8	7,5	K
1500Ω	203,1	0,4	202,8	114,8	114,3	229,1	5,0	4,3	K
3000Ω	203,1	0,3	202,8	114,8	114,4	229,1	3,0	2,6	K
5000Ω	203,1	0,3	202,8	114,7	114,4	229,1	2,0	1,7	K
8000Ω	203,0	0,3	202,9	114,7	114,4	229,1	1,3	1,1	K

Taulukkoon 10 koottujen simulointitapausten perusteella näyttää siltä, ettei vikaresistanssin suuruutta muuttamalla ole vaikutusta pienjänniteverkossa mitattuun jännite-epäsymmetriaan. Pienjänniteverkon vaihejännitteiden osalta jännite-epäsymmetrian siirtyminen käyttäytyy samalla tavalla kuin luvun 7.1 simuloinnin tapauksessa.

Maasulkusuojauksen näkökulmasta vikatilanne vastaa 1-vaiheista maasulkua johtolähdöllä. Simuloinnin perusteella vielä 8000 Ω vikaresistanssinen maasulku olisi aiheuttanut katkaisijan avautumisen.

7.2.3 Vaihekatkos ja samanaikainen maasulku eri johtimella

Tähän lukuun on koottu simulointitulokset, joissa vaihekatkoksen yhteydessä samassa kohtaa johtolähtöä on eri johtimella 1-vaiheinen maasulku. Simuloinneissa vaihekatkos alkaa ajanhetkellä 0,50 sekuntia ja maasulku alkaa samalla ajanhetkellä 0,50 sekuntia. Vaihekatkos on tehty b-vaiheelle ja maasulku tehtiin c-vaiheelle. Tämä tilanne vastaa tammikuussa 2024 tapahtunutta vikaa Könnin johtolähdöllä. Taulukkoon 11 on koottu simulointitulokset.

Taulukko 11. K_j-vaihekatkos b-vaiheella. Samanaikainen maasulku c-vaiheella samassa vikakohdassa.

Maasulun vika-resistanssi	Maasulun aikaiset sähköiset suureet								
	P _j -verkon vaihejännitteet (V)						K _j -verkon suureet		Johtokatkaisija aukeaa
	ZNzn0			Dyn11					
a	b	c	a	b	c	I _o (A)	U _o (kV)	(K=kyllä/E=ei)	
0 Ω	202,8	0,2	202,6	114,5	114,3	229,1	14,0	11,9	K
50 Ω	202,8	0,2	202,6	114,5	114,3	229,1	13,3	11,2	K
150 Ω	202,8	0,2	202,6	114,6	114,3	229,1	11,9	10,1	K
500 Ω	202,9	0,1	202,7	114,6	114,3	229,1	8,8	7,5	K
1500 Ω	202,9	0,2	202,8	114,6	114,3	229,1	5,0	4,3	K
3000 Ω	203,0	0,2	202,8	114,6	114,4	229,1	3,0	2,6	K
5000 Ω	203,1	0,2	202,8	114,6	114,4	229,1	2,0	1,7	K
8000 Ω	203,0	0,2	202,9	114,6	114,4	229,1	1,3	1,1	K

Taulukkoon 11 koottujen simulointitulosten perusteella maasulun aikaiset maasulkuvirta ja nollajännite ovat identtiset taulukon 10 kanssa luvussa 7.2.2. Maasulkusuojauksen näkökulmasta tapaus muistuttaa 1-vaiheista maasulkua. K_j-vaihekatkos aiheuttaa samaan tapaan kuin muissa simuloinneissa merkittävän jännite-epäsymmetrian vikapaikan jälkeisille käyttöpaikoille. Simuloinneista huomataan, ettei vikaresistanssin suuruudella ollut suurta merkitystä pienjänniteverkossa mitattuun jännite-epäsymmetriaan.

7.3 Tulosten arviointi

Simuloinnissa tutkittiin, mikä on jakelumuuntajan kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen keskijännitepuolelta pienjännitepuolelle kj-vaihekatkoksen aikana. Sähkömittareille asetettujen hälytysten perusteella voidaan tunnistaa sellaiset kj-vaihekatkokset, jotka eivät ole aiheuttaneet johtokatkaisijan aukeamista. Tässä simulointimallissa tutkitaan jatkuvan tilan jännite-epäsymmetrioita, jonka vuoksi simulointimalliin ei ole valittu tarkimpia taajuusriippuvaisia komponentteja. Simulointimallissa on epätarkkuuksia yksinkertaisten komponenttien valinnan takia ja kuormituksen mallintamisen yksinkertaisuuden takia, joka huomattiin mallia varmennettaessa luvussa 6.3. Mallia ei voi soveltaa transientti-ilmiöiden tutkimiseen, mutta jatkuvan tilan maasulkuilmiöiden- ja kj-vaihekatkoksen tutkimiseen mallilla päästiin kohtuulliseen tarkkuuteen.

Työssä simuloitiin kj-vaihekatkoksen aikaisia pienjänniteverkon vaihejännitteitä. Tuloksista huomataan, että pienjänniteverkossa vaihejännitteiden vaihtelu on vähäistä eri simulointitapausten välillä. Eniten poikkesi tapaus, jossa kj-vaihekatkoksen lisäksi oli maasulku, joka oli katkenneella johtimella kuorman puolella. Tämän simuloinnin tulokset ovat esitelty luvussa 7.2.1. Näissä simuloinneissa huomataan, että b-vaiheelle indusoituu myös jännite, joka on suurimmillaan, mitä jäykempi maasulku on. Muissa kj-vaihekatkos- ja maasulkusimuloinneissa tulokset eivät juurikaan poikenneet toisistaan jännite-epäsymmetrian osalta eikä maasulkusuureiden I_0 ja U_0 osalta. Vikaresistanssin kasvaessa simulointitilanteet lähestyvät tilannetta, jossa simuloidaan luvun 7.1 tilannetta.

Verratessa simuloinnista saatavia pienjännitetason vaihejännitteitä mittareiden mittauksiin vaihejännitteisiin, voidaan simuloinnin tuloksia pitää mielekkäinä. Simuloidut vaihejännitteet ovat hyvin lähellä sitä, mitä aidoissa kj-vaihekatkosvivoissa mittarit ovat hälytysten yhteydessä mitanneet sekä Dyn11-kytkentäisessä että ZNzn0-kytkentäisessä muuntopiirissä. Simulointien perusteella kj-vaihekatkoksen kanssa samanaikainen maasulku ei vaikuttaisi aiheuttavan merkittävää muutosta pienjänniteverkon vaihejännitteiden suuruuteen.

Luvussa 5.1.2 tutkittujen Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisistä muuntopiireistä tulleiden mittarihälytysten perusteella on ollut todellisia tilanteita, joissa kj-vaihekatkoksen aikana jännitteet eivät ole täyttäneet jännite-epäsymmetriahälytyksen ehtoja, koska matalin jännite oli pudonnut alle 100 V. Simulointimallilla ei pystytty luomaan tilannetta, jossa kj-vaihekatkoksen aikana Dyn11-kytkentäisen muuntajan jännitteet putoavat alle 100 V. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että todellisessa vikapaikassa tilanne on voinut olla hyvin paljon monimutkaisempi, kuin mitä yksinkertaisissa simuloinneissa tehtiin.

8. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin nykyisten AMR-hälytysrajojen soveltuvuutta jännite-epäsymmetriahälytyksissä ja nollavikalaukaisussa. AMR-hälytysten hyödyntäminen tehostaa pienjänniteverkon valvontaa, minkä takia sopivat ja riittävän tarkat hälytysrajat ovat välttämättömyys, jotta automaattisesti luotuun hälytykseen voidaan luottaa. Uuden sukupolven sähkömittareiden myötä käyttötoimintaa valvova henkilö voi tarvittaessa lukea pienjänniteverkon hetkittäisiä jännitteitä ja virtoja. Hälytysten mukana tulevien jännitteiden ja virtojen avulla käytönvalvontaa tekevä varmentaa vian vaikutusalueen. Ristiriitaiset tai väärät hälytykset voivat todellisissa vikatilanteissa hämmentää, jonka takia käyttöä valvovan on hyvä tiedostaa mahdolliset syyt, mistä poikkeavat hälytykset tai vian aikaiset pienjänniteverkon jännitteet johtuvat.

Työssä tutkittiin Elenian verkossa yleisimpien jakelumuuntajien kytkentäryhmien vaikutusta jännite-epäsymmetrian siirtymiseen muuntajan läpi. Tutkimusongelmalle aseteltiin tutkimuskysymykset *”Kuinka suuri ero on jakelumuuntajien kytkentäryhmien välillä jännite-epäsymmetrian siirtymisessä kj-viassa muuntajan läpi pj-puolelle?”* ja *”Älymittarilla voidaan tunnistaa kj-vaihekatkoksia, onko hälytysrajoissa otettava huomioon välissä olevan jakelumuuntajan kytkentäryhmä?”*

Työn teoriaosuudessa esiteltiin matemaattiset yhtälöt jokaiselle muuntajalle kuvaamaan jännite-epäsymmetrian siirtymisestä muuntajan kj-puolelta pj-puolelle. Muuntajat voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin riippuen siitä, kuinka vaihejännitteet muodostuvat ja kuinka nollapiiri jatkuu muuntajan läpi mentäessä. Samaan muuntajatyyppeihin kuuluvilla muuntajilla vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen on pj-verkon jännitteiden magnitudeihin samanlainen. Kytkentäryhmän vaikutus kj-vaihekatkoksen aikana simuloitiin PSCAD-mallilla. Kytkentäryhmän vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen todennettiin myös mittaustietojärjestelmään tallentuneista kj-vaihekatkoksen aikaisista sähkömittareiden mittaamista vaihejännitteistä. Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että Elenian verkossa yleiset Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisten muuntajien vaikutus jännite-epäsymmetriaan on samanlaista. ZNzn0-kytkentäiset jakelumuuntajat ovat myös Elenian verkossa yleisiä. ZNzn0-kytkentäisen muuntajan vaikutus jännite-epäsymmetriaan poikkeaa selvästi Dyn11- tai Yzn11-kytkentäisiin muuntajiin verrattuna. Siinä missä Dyn11- tai Yzn11-kytkentäisen muuntajan kj-vaihekatkoksen aikaiset vaihejännitteet pj-

verkossa ovat ideaalitapauksessa suhteellisarvoiltaan 1 , $-\frac{1}{2}$ ja $-\frac{1}{2}$ p.u., niin ZNzn0-kytkentäisen muuntajan vaihejännitteet pj-verkossa ovat ideaalitapauksessa suhteellisarvoiltaan $\frac{\sqrt{3}}{2}$, 0 ja $-\frac{\sqrt{3}}{2}$ p.u.

Kytkentäryhmällä on vaikutus jännite-epäsymmetrian siirtymiseen, jolloin tämä olisi huomioitava AMR-hälytyksiä määriteltäessä. Nykyinen jännite-epäsymmetriahälytys soveltuu Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisillä jakelumuntajilla syötetyille sähkömittareille. Nykyinen jännite-epäsymmetriahälytys ei sovellu sähkömittareille, joita syötetään ZNzn0-kytkentäisellä muuntajalla. Kj-vaihekatkoksen aikana ZNzn0-kytkentäisen muuntajan toisipuolella yhdelle vaiheelle ei ideaalitapauksessa induoidu jännitettä. Tämä tarkoittaa sitä, että korkeammalle priorisoitu vaihe puuttuu -hälytyksen ehto täytyy. Kj-vaihekatkoksen aikana ZNzn0-kytkentäisillä muuntajilla syötetyt sähkömittarit lähettävät vaihe puuttuu -hälytyksiä.

Mikäli halutaan saada myös ZNzn0-kytkentäisen muuntopiirissä olevilta mittareilta jännite-epäsymmetriahälytyksiä, vaatii se muutosta mittarin priorisointilogiikkaan tai uuden päättelyominaisuuden hyödyntämistä käytöntukijärjestelmässä. Käytöntukijärjestelmässä voidaan määriteltyjen ehtojen mukaisesti muuttaa hälytystä todellista tilannetta kuvaavammaksi. Toisaalta on hyvin todennäköistä, että kj-vaihekatkos vaikuttaa samanaikaisesti myös Dyn11- tai Yzn11-kytkentäisiin muuntajiin. Kj-vaihekatkoksen aikana Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisissä muuntopiireissä olevat sähkömittarit hälyttävät jännite-epäsymmetriaa eikä tilannekuvan hahmottaminen välttämättä kärsi yksittäisten ZNzn0-kytkentäisten muuntopiirissä olevien sähkömittareiden aiheuttamien vaihe puuttuu -hälytysten takia.

Nykyisin käytössä olevan jännite-epäsymmetriahälytyksen jänniterajojen soveltuvuutta tutkittiin tilastollisin keinoin olemassa olevasta mittaustietojärjestelmään tallentuneesta datasta. Nykyinen jännite-epäsymmetriahälytys soveltuu kj-vaihekatkoksen tunnistamiseen sähkömittareilla, joita syötetään Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisillä muuntajilla. Tutkimusongelmalle aseteltiin tutkimuskysymykset *"Ovatko nykyiset jännite-epäsymmetriahälytyksen rajat sopivat?"* ja *"Kuinka suuressa osassa kj-vaihekatkoksissa on tilanne, jossa vian aikaiset vaihejännitteet ovat varsinaisen jännite-epäsymmetriahälytyksen ulkopuolella?"*.

Tutkimuksessa selvitettiin, ovatko todellisten kj-vaihekatkosvikojen aikaiset pienjänniteverkon vaihejännitteet olleet sellaiset, etteivät jännite-epäsymmetriahälytyksen ehdot ole täyttyneet. Tämän tutkimiseen hyödynnettiin alijännitehälytysten yhteydessä saatuja vaihejännitteitä, sillä alijännitehälytyksiä ei suodateta pois mittareilla missään tilanteessa.

Alijännitehälytyksiä muodostuu, mikäli jokin vaihejännite on alle 207 V. Tietyin suodatusin, jotka esiteltiin luvussa 5.1.2, saatiin muodostettua jännitehajontakuvaaja, joka kuvaa hälytysten osumista tietylle hälytysalueelle. Tämän avulla todettiin, että on tilanteita, joissa kj-vaihekatkoksen aikana jännitteet ovat olleet hälytyksen ehtojen ulkopuolella. Datan perusteella laskettiin todennäköisyys sille, ettei jännite-epäsymmetriahälytyksen ehto täyty. Laskettu todennäköisyys tälle oli 5,8 %. Laskemalla jännite-epäsymmetriahälytyksen alarajaa 90 V:iin ja vaihe puuttuu -hälytyksen raja samaan 90 V:iin, todennäköisyys putoaa 1,2 %:iin. Tässä on huomioitava syntyvä katvealue niille tapauksille, joissa yhden vaihejännitteen arvo on välillä 90–100 V.

Nollavikalaukaisun jänniterajojen soveltuvuuden arvioimisessa oli työn aikana haasteita. Alkuperäiset tutkimuskysymykset älymittareiden nollavikalaukaisuun liittyen jalostuivat työn aikana. Eräs alkuperäinen kysymys työhön liittyen oli *”Onko mahdollista, että kj-verkossa tapahtuvat viat aiheuttavat virheellistä nollavikalaukaisua?”*. Diplomityöprosessin alkuvaiheessa todettiin kj-verkon vikojen aikaisten ylijännitteiden olevan hyvin lyhyitä, muutaman jakson mittaisia transientti-ilmiöitä. Mittareiden hälytyksissä hyödynnettävien keskiarvottamisjaksojen myötä nopeat transienttijännitteet eivät näy, jolloin virheellisiä hälytyksiä ei muodostu. Tutkimuskysymyksiksi muodostuivat *”Kuinka tiukat jännitteen rajat nollavikalaukaisulle voidaan asettaa ilman, että ilmenee turhia nollavikalaukaisuja?”*, *”Ovatko nollavian tunnistamiseen tällä hetkellä käytetyt rajat sopivat?”* ja *”Kuinka suuren jännitteen epäsymmetrisyyden vinokuorma aiheuttaa?”*.

Työssä päädyttiin tutkimaan tilastollisin keinoin olemassa olevasta mittaustietojärjestelmästä saatavasta datasta nollavikalaukaisun aikaisia suureita. Datasta pyrittiin selvittämään, onko liitinviasta johtuvien nollavikojen aikaiset jännitteet poikkeavia verrattuna tilanteeseen, jossa nollajohdin on kokonaan poikki. Olemassa olevaa dataa tämän tutkimiseen pystyttiin hyödyntämään hälytysten mukana tulleiden vaihevirtojen avulla, joiden kautta hahmoteltiin hälytysten aikaista kuormitustilannetta. Tuloksista huomattiin, että nollajohtimen ollessa kokonaan poikki, ovat jännitteet huomattavasti epäsymmetrisemmät jo vähäisellä kuormavirtojen epäsymmetrisyydellä. Nollavikalaukaisuja tulee varmemmin, kun nollajohdin on kokonaan poikki. Niissä tapauksissa, joissa nollapiirissä on huono liitos, huomattiin kuormitusvirtojen epäsymmetrian kasvamisesta huolimatta, että vian aikaisten vaihejännitteiden epäsymmetria on vähäisempää. Näissä tapauksissa vaihejännitteet olivat lähempänä nollavikalaukaisussa ehtoina käytettyjä jänniterajoja. Epäsuorasti tämä tarkoittaa, että nämä tilanteet ovat heikommin tunnistettavissa, mikäli vain vaihejännitteiden epäsymmetriaa käytetään vian tunnistamiseen.

Tässä työssä tehdyn tilastollisen tutkimisen kautta ei voida sanoa, mitkä ovat parhaiten soveltuvat nollavikalaukaisun jänniterajat. Tutkimuksesta huomattiin, että huonosta liitoksesta johtuvat nollaviat ovat haastavampia tunnistaa. Pienjänniteverkon kaapelointiasteen kasvaessa vähenevät tilanteet, joissa nollajohdin on kokonaan poikki. Maakaapeloinnin ja kaapeliverkon yhteyteen rakennettavien verkon solmupisteiden myötä, tulevaisuudessa nollaviat ovat todennäköisemmin liitinviasta johtuvia.

Hitaasti alkavien tai huonosta liitoksesta johtuvien nollavikojen tunnistamiseen ehdotuksena on jättää käyttöön nollavikahälytys, mutta muuttaa tämän hälytyksen jänniterajojen ehtoja siten, että ne ovat nollavikalaukaisun ehtoja tiukemmat. Nollavikahälytys toimii nollavikalaukaisun kanssa rinnakkain ja nollavikalaukaisun jänniterajat jätetään nykyiselleen. Tarkkaa ehdotusta siitä, mitkä olisivat tiukemmat nollavikahälytyksen rajat, on vaikea antaa, jonka vuoksi rajojen muutos on hyvä tehdä iteratiivisesti. Ylijännitteen osalta alarajana voidaan kuitenkin pitää standardista SFS-EN 50160 määriteltyä arvoa ylijännitteelle 253 V. Nollavikahälytyksen ylijännitteen raja olisi välillä 253–260 V.

Työn tavoitteena oli ehdottaa päivitettyt hälytysrajat jännite-epäsymmetriahälytykselle ja nollavikalaukaisulle. Tutkimustyössä todettiin, ettei nykyisellä toimintatavalla ja siihen liittyvällä logiikalla jännite-epäsymmetriahälytys sovellu mittareille, joita syötetään ZNzn0-kytkentäisellä muuntajalla. ZNzn0-kytkentäisillä muuntajilla syötetyille mittareille ei voida jännite-epäsymmetriahälytykselle täten ehdottaa rajoja. Tutkimuksen perusteella voidaan ehdottaa nykyisen jännite-epäsymmetriahälytyksen jännitteiden alarajaehdon laskemista 100 V:sta 90 V:iin ja vaihe puuttuu -hälytyksen rajan laskemista 100 V:sta 90 V:iin. Tällöin jännite-epäsymmetriahälytyksen herkkyys parantuu, mutta tämä aiheuttaa vaihe puuttuu -hälytyksen herkkyyden huonontumista. Tämä hälytys soveltuisi jatkossakin vain Dyn11- ja Yzn11-kytkentäisissä muuntopiireissä oleville mittareille. Nollavikalaukaisulle ehdotuksena on jättää nykyisen ehdon jänniterajat. Sen sijaan nollavikahälytykselle ehdotuksena on muuttaa jänniterajat nollavikalaukaisua tiukemmaksi. Tiukemmilla nollavikahälytyksen rajoilla saadaan paremmin tunnistettua liitinvikatyypiset nollaviat.

Jatkotutkimuksessa erityisesti hitaasti alkaviin tai liitinvikatyypisiin nollavikoihin olisi hyvä tehdä tutkimusta. Tässä työssä huomattiin, että liitinviosta johtuvat nollaviat eivät välttämättä aiheuta suurta jännite-epäsymmetriaa. Jatkotutkimuskysymyksenä voisi olla esimerkiksi *”Voidaanko sähkömittareilla tunnistaa nollavika muilla tavoin, kuin jännite-epäsymmetrian perusteella?”* Työn luvussa 5.3.2 viitattiin erääseen mahdolliseen ratkaisuun hyödyntämällä sähkömittareilta rekisteröityjä alijännite- ja ylijännitehälytysten esiintymistiheyksiä. Tällöin alijännite- ja ylijännitehälytysten esiintymistiheyttä hyödynnetään käytöntukijärjestelmässä tunnistamaan nollavika. Pienjänniteverkon valvontaa voitaisiin

parantaa kehittämällä käytöntukijärjestelmän älyominaisuuksia tai logiikkaa tunnistamaan verkon erilaisia tiloja mittareiden mittaamien suureiden perusteella.

LÄHTEET

- [1] Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta, 767/2021, Saatavissa: [Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten... 767/2021 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX ®](#)
- [2] T. Rahman, ”Analysis of Smart Meter Functionalities In The Electricity Market and Network Management”, Tampereen Yliopisto 2020, Saatavissa: [Rahman-Tasmia.pdf \(tuni.fi\)](#)
- [3] Sähkönmittauksen periaatteita, Energiateollisuus 2022, Saatavissa: [Sähkön mittauksen periaatteita 2022.pdf \(kajave.fi\)](#)
- [4] K. Nousiainen, ”Sähköenergiajärjestelmät”, Tampereen Yliopisto, Tampere, 2019, julkaisematon opetusmoniste
- [5] E. Lakervi, J. Partanen, ”Sähkönjakelutekniikka”, Otatiето, Helsinki 2008
- [6] E. Tiainen, ”Sähköasennukset 1”, Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, Espoo 2008
- [7] Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Saatavissa: [Sähköturvallisuuslaki 1135/2016 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX ®](#)
- [8] Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta 66/2009. Saatavissa: [Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten... 66/2009 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX ®](#)
- [9] J. Elovaara, L. Haarla, ”Sähköverkot I”. Otatiето, Helsinki, 2011
- [10] L. Aura, A. Tonteri, ”Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet”, WSOY, Helsinki 1995
- [11] O. Pöyhönen, ”Sähkötekniikan käsikirja 1”, Tammi, Helsinki, 1975
- [12] Käytöntukijärjestelmä kyselytiedot, Elenia sisäinen dokumentti
- [13] E. Clarke, ”Circuit Analysis of A-C Power Systems”, 1948, Saatavissa: [Circuit Analysis Of A-c Power Systems Vol. I : Shoults D.r : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive](#)
- [14] D.P. Kothari, I.J. Nagrath, ”Modern Power System Analysis”, Tata McGraw-Hill Education Private Limited, First Reprint, New Delhi 2011
- [15] J. Harmala, ”Vaihekatkon vaikutukset voimalaitoksen sähköjärjestelmässä”, diplomityö, Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT, 2023 Saatavissa: [lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/165446/Diplomityo Julia Harmala.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)
- [16] J. Bastman, ”EE.EES.400 Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi”, Tampereen Yliopisto, Tampere, 2022, julkaisematon opetusmoniste

- [17] S. K. Shaikh, A. M. Mulla, S. U. Bagwan and Y. A. Makandar, "Analysis and Application of Zigzag Transformer in Distribution System for Mitigation of Triplen Harmonics," 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2020, pp. 94-98 Saatavissa: [IEEE Xplore Full-Text PDF: \(tuni.fi\)](#)
- [18] J.L. Blackburn, "Symmetrical Components for Power System Engineering", New York 1993, Saatavissa: [Symmetrical Components for Power Systems Engineering - J. Lewis Blackburn - Google Books](#)
- [19] M. Bollen, "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", New York 2003, Saatavissa: [Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions | IEEE eBooks | IEEE Xplore](#)
- [20] H-M Pekkala, "Challenges in Extensive Cabling of the Rural Area Networks and Protection in Mixed Networks", diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2010 Saatavissa: [Diplomityö Pekkala 1 \(tuni.fi\)](#)
- [21] A. Gulbrand and O. Samuelsson, "Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems," 2007 *IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, Switzerland, 2007, pp. 1129–1134. Saatavissa: [Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
- [22] J. Elovaara, L. Haarla, "Sähköverkot II". Otatieto, Helsinki, 2011
- [23] T. Škumát and Ž. Eleschová, "Open Phase Fault Localization in a Medium Voltage Distribution Grid Using Smart Meters," 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2019, pp. 1-6 Saatavissa: [Open Phase Fault Localization in a Medium Voltage Distribution Grid Using Smart Meters | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore \(tuni.fi\)](#)
- [24] Impact of Open Phase Conditions on Electrical Power Systems of Nuclear Power Plants, IAEA, 2016. Saatavissa: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1755_web.pdf
- [25] A. Norouzi, „Open Phase Conditions in Transformers Analysis and Protection Algorithm,“ 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA – 8-11 April 2013, pp. 1-14. Saatavissa: [Open phase conditions in transformers analysis and protection algorithm | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore \(tuni.fi\)](#)
- [26] C. Menos-aikateriniadis, "Methods to identify broken neutral fault in LV distribution grid by using existing smart meters infrastructure", M.Sc thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, 2019 Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1372876/FULLTEXT01.pdf>
- [27] M. Kizhlo and A. Kanbergs, "The Behaviour of Grounding in case of Neutral Wire Damage," 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, 2018, pp. 1014-1018. Saatavilla: [The Behaviour of Grounding in case of Neutral Wire Damage | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)

- [28] A. Mäkinen et al., "Neutral fault management in LV network operation supported by AMR system," 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, 2013, pp. 1-4 Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6683725>
- [29] Standardi SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–54: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojajohtimet.
- [30] Löf, Niklas, et al. "Utilizing smart meters in LV network management." CIRED 2011 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Frankfurt am Main, Germany, June 6-9, 2011. CIRED, 2011.
- [31] Kauppinen, Markku, et al. "Experiences of using AMI system for DSO's business operation." CIRED-Open Access Proceedings Journal 2017.1 (2017): 2756-2759.
- [32] Piispanen, Markus. "Synergioiden saavutettavuus automaattisessa mittarinluennassa sähkö-, kaukolämpö- ja vesihuolto-yhtiöiden välillä." Aalto-yliopisto. Diplomityö (2010).
- [33] S. Repo et al., "Use case analysis of real-time low voltage network management," 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, UK, 2011, pp. 1-8. Saatavilla: [Use case analysis of real-time low voltage network management | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
- [34] Aidon PGM Application Notes, Aidon, sisäinen dokumentti 2020, 25 p.
- [35] L. Keränen "Usefulness of AMR data in the network operation", diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2009, Saatavissa: [document \(psu.edu\)](#)
- [36] Haastattelu, Kehitysinsinööri Anssi Vanhalo 19.4.2024
- [37] Työ- ja elinkeinoministeriön Älyverkkotyöryhmä AMR 2.0 loppuraportti, 2017. Saatavilla: [AMR+2.0+loppuraportti+15.12.2017.pdf \(tem.fi\)](#)
- [38] A. Nikander & A. Mäkinen, Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset - suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet, Raportti, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [39] A. Tukiainen, "Kaapeliverkkoon varastoituneen energian vaikutukset kytkentäyli-jännitteisiin", Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto 2018. Saatavissa: [Kaapeliverkkoon varastoituneen energian vaikutukset kytkentäyli-jännitteisiin - Trepo \(tuni.fi\)](#)
- [40] S. Vehmasvaara, "Compensation strategies in cabled rural networks", Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto 2013. Saatavissa: [Compensation strategies in cabled rural networks - Trepo \(tuni.fi\)](#)

- [41] A. Nikander, P.Pakonen “Yliaaltojen arviointi, vaikutukset ja merkitys kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkutilanteissa”, 2022 Tampereen Yliopisto. Saatavilla: [Yliaallot kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkutilanteissa loppuraportti – Sähkö tutkimuspoolin julkaisu - Energiateollisuus](#)
- [42] T. Pitkänen, “Fast Fourier transforms on energy-efficient application-specific processors”, Väitöskirja, 2014 Tampereen Teknillinen Yliopisto. Saatavilla: [Fast Fourier transforms on energy-efficient application-specific processors - Trepo \(tuni.fi\)](#)
- [43] Könnin sähköaseman suojausasettelut, Elenia sisäinen dokumentti

LIITE A: KÖNNIN SÄHKÖASEMAN PSCAD-MALLI

