



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Miina Korpilähde

# SUOJARELEEN TAAJUUSSUOJAN TOIMINTA KJ-VERKON VIKATILAN- TEISSA

Simulointi oiko- ja maasulkutilanteissa

Tekniikka  
2020

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Miina Korpilähde
Opinnäytetyön nimi	Suojareleen taajuussuojan toiminta KJ-verkon vikatilanteissa
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	81 + 2 liitettä
Ohjaaja	Mikko Västi

---

Työssä tutkitaan suojareleen taajuussuojan toimintaa keskijänniteverkon yleisimmissä vikatilanteissa, eli oiko- ja maasuluissa. Tavoitteena on havainnoida, vaikuttaako vikatilanne suojareleen taajuussuojan toimintaan. Eri valmistajien suojareleet testataan Omicronin Relay SimTest -ohjelmalla tehdyillä simulointimalleilla. Simulointimallien lähtötietoina käytetään sähköverkkoyhtiöltä saatuja kahden erityyppisen keskijänniteverkon tietoja.

Teorian osalta työssä käydään läpi verkon taajuuden teoria, taajuussuojauksen toimintaperiaatteet ja sovellukset sekä keskijänniteverkon yleisimmät viat. Taajuussuojauksen osalta perehdytään myös lyhyesti taajuusmittauksessa käytettyihin algoritmeihin ja niiden suorituskyvyn eroihin, kun verkon jännitteissä on erilaisia taajuuteen vaikuttavia häiriöitä. Taajuusmittaus tehdään yleensä suojareleen jännitemittauksista. Keskijänniteverkon yleisimpien vikojen osalta käydään läpi niiden mahdollinen vaikutus taajuusmittaukseen.

Tutkimuksen tulos on se, että yhden testatun suojareleen ylitaajuussuoja havahtuu joissakin vikatilanteissa. Näissä tilanteissa suojareleen taajuussuoja palautuu ennen kuin aseteltu toiminta-aika on täyttynyt, eikä anna laukaisukäskyä. Ylitaajuussuojan asettelu on tehty standardin SFS-EN 50160 mukaisen yhteiskäyttöverkon perustaajuuden ylärajan mukaan. Havahtumisen aiheuttavat vikatilanteet on analysoitu ja keskeisimmät huomiot näistä tilanteista on koottu yhteenvedoksi.

## ABSTRACT

Author	Miina Korpilähde
Title	Operation of Frequency Protection Relay in Medium Voltage Radial Distribution Network
Year	2020
Language	Finnish
Pages	81 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Mikko Västi

---

This study focuses on the operation of frequency protection relay in fault situations of the medium voltage distribution network. Most commonly occurring faults in medium distribution network are short circuits between different phases and earth faults. The objective was to detect if a fault in distribution network has an impact on the operation of frequency protection of tested relays. Testing was carried out with simulation models which were built with Omicron Relay SimTest software. Data for simulation models used was received from an actual power grid company.

The study covers power grid frequency, frequency protection principles and applications and most common fault modes of distribution network. The performance of different frequency measurement algorithms is shortly compared in connection to disturbance in network voltages. The measurement of protection relay frequency is usually derived from network voltage measurements.

The result of this study is that in one of the tested protection relays over frequency protection start is activated. The tests showed that the start of the protection is, however, deactivated before the operation time has elapsed and no frequency protection trip is performed. Fault situations leading to the start activation were analyzed and a summary of essential factors is presented in the thesis.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

1	JOHDANTO .....	10
1.1	Työn tavoite .....	10
1.2	Työn rakenne .....	11
2	VERKON TAAJUUS.....	12
2.1	Taajuus ja pätöteho .....	13
2.2	Taajuuden säätö .....	14
2.3	Verkon taajuusstabiilius.....	19
3	TAAJUUSUOJAUS SUOJARELEILLÄ .....	21
3.1	Alitaajuussuoja $f <$ .....	23
3.2	Ylitaajuussuoja $f >$ .....	25
3.3	Taajuusmittaus ja kytkentä .....	26
3.4	Taajuuden mittausalgoritmeja.....	29
3.5	Taajuussuojan testaus.....	35
4	KESKIJÄNNITEVERKON KESKEYTYKSET JA VIAT .....	37
4.1	Tavallisimmat viat .....	38
4.2	Vikojen vaikutus verkon taajuuteen.....	39
5	KOESTUSDATAN GENEROINTI.....	42
5.1	Verkkomallien esittely .....	42
5.1.1	Maaseutuasema 20 kV sekaverkko .....	42
5.1.2	Kaupunkiasema 10 kV kaapeliverkko .....	48
5.2	Suojareleasettelut .....	51
5.3	Testitapauksien esittely .....	52
6	TAAJUUSSUOJIEN KOESTUS .....	55
6.1	Koestuskytkentä.....	55

6.2	Koestusprosessi.....	57
7	TULOKSET .....	63
7.1	Verkkomallin ja suoja-relekytkennän vaikutus.....	63
7.1.1	KytKentä 2LL/3LL .....	65
7.1.2	KytKentä 3LN.....	69
7.2	Vikapaikan, vikavastuksen ja kuorman vaikutus.....	71
7.3	Jännitekulman vaikutus.....	73
7.4	Yhteenveto tuloksista.....	77
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA ARVIOINTI.....	78
	LÄHTEET.....	80

## LIITTEET

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Verkon taajuus, kuormituksen tai sähköntuotannon muutos .....	14
<b>Kuva 2.</b> Fingrid sähköjärjestelmän tilat. ....	15
<b>Kuva 3.</b> Verkon taajuus ilman säätöä (1) ja säädön kanssa (2). ....	18
<b>Kuva 4.</b> ABB 630 alitaajuussuojan DAFTUF toimintadiagrammi .....	23
<b>Kuva 5.</b> ABB 630 ylitaajuussuojan DAPTOF toimintadiagrammi. ....	25
<b>Kuva 6.</b> AQ300 jännitemittausmoduuli.....	27
<b>Kuva 7.</b> AQ300 pääjännitteiden ja nollajännitteen mittaus 3LL+ $U_0$ .....	27
<b>Kuva 8.</b> AQ300 vaihejännitteiden ja nollajännitteen mittaus 3LN+ $U_0$ .....	28
<b>Kuva 9.</b> SEL-315A taajuussuojan toiminnan esto alijännitteellä.....	28
<b>Kuva 10.</b> Dynaamisesti laskeva taajuus a) ZC, b) SDFT, c) SDC, d) SDM .....	30
<b>Kuva 11.</b> Taajuus ja amplitudi ajan suhteen a) ZC b) SDFT, c) SDC, d) SDM ..	31
<b>Kuva 12.</b> Signaali jossa tasakomponentti a) ZC b) SDFT, c) SDC, d) SDM.....	32
<b>Kuva 13.</b> Voimajärjestelmän simulointimalli.....	32
<b>Kuva 14.</b> a) Generaattorin roottorin nopeus b) ZC c) SDFT, d) SDC, e) SDM... 33	
<b>Kuva 15.</b> Nollakohtien tunnistus, zero-crossing.....	34
<b>Kuva 16.</b> Keskijänniteverkon keskeytysten aiheuttajien osuudet .....	38
<b>Kuva 17.</b> Simulointimalli maaseutuasema 20 kV sekaverkko. ....	44
<b>Kuva 18.</b> Simulointimalli kaupunkiasema 10 kV kaapeliverkko.....	49
<b>Kuva 19.</b> Maaseutuverkon vikapaikat. ....	53
<b>Kuva 20.</b> Kaupunkiverkon vikapaikat.....	54
<b>Kuva 21.</b> Omicron Relay SimTest jännitekytkentä.....	55
<b>Kuva 22.</b> Omicron CMC 356. ....	56
<b>Kuva 23.</b> Omicron Relay SimTest binääritulojen kytkennät.....	57
<b>Kuva 24.</b> Omicron Test Universe QuickCMC alitaajuus. ....	58
<b>Kuva 25.</b> Omicron Test Universe QuickCMC ylitaajuus.....	58
<b>Kuva 26.</b> Kaupunkiverkon testisetit. ....	59
<b>Kuva 27.</b> Kaupunkiverkko Lähtö 1 oikosulut. ....	60
<b>Kuva 28.</b> Kaupunkiverkko Lähtö 1 oikosulut testitapauksia. ....	60
<b>Kuva 29.</b> R4 f> havahtumisaika vian synnyn jälkeen. ....	60
<b>Kuva 30.</b> Relay SimTestin virtuaalireleen mittaamat vaihejännitteet .....	61
<b>Kuva 31.</b> Relay SimTest virtuaalireleen mittaamat pääjännitteet. ....	61

<b>Kuva 32.</b> Relay SimTest suojarahleen R4 binäärilähdön aktivoituminen.....	62
<b>Kuva 33.</b> Maaseutuverkko maasta erotettu 3LN, L2-N lähtö 2. ....	67
<b>Kuva 34.</b> Maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL, L2-N lähtö 2. ....	68
<b>Kuva 35.</b> VL1-L2 Maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL. ....	68
<b>Kuva 36.</b> VL2-L3 Maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL. ....	68
<b>Kuva 37.</b> Vaihejännitteet maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL.....	69
<b>Kuva 38.</b> Vaihejännitteet maaseutuverkko maasta erotettu 3LN .....	70
<b>Kuva 39.</b> VL1-N ja VL2-N maaseutuverkko maasta erotettu 3LN.....	70
<b>Kuva 40.</b> Vaihejännitteet, L1-L2 oikosulku pitkän lähdön päädyssä.....	71
<b>Kuva 41.</b> Havahtuminen vikavastuksella 100 $\Omega$ . ....	72
<b>Kuva 42.</b> Vaihejännitteet, maasulku L3-N jännitekulma 57° .....	73
<b>Kuva 43.</b> VL1-N alitaajuus maasulku L3-N jännitekulma 57°. ....	74
<b>Kuva 44.</b> VL2-N ylitaajuus maasulku L3-N jännitekulma 57°. ....	74
<b>Kuva 45.</b> VL2-N ylitaajuus maasulku L3-N jännitekulma 45° .....	75
<b>Kuva 46.</b> VL1-N alitaajuus maasulku L3-N jännitekulma 45° .....	75
<b>Kuva 47.</b> VL2-N ylitaajuus maasulku L3-N jännitekulma 90° .....	76
<b>Kuva 48.</b> VL1-N alitaajuus maasulku L3-N jännitekulma 90° .....	76

## TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 1.</b> SFS-EN 50160 taajuuden rajat normaaleissa käyttöolosuhteissa....	15
<b>Taulukko 2.</b> Tehonvajaussuojan nykyiset ja uudet portaat.....	22
<b>Taulukko 3.</b> Johtoverkon tyyppien osuudet Suomessa.....	37
<b>Taulukko 4.</b> Keskeytysten aiheuttajien osuudet, vikoja kpl/100km .....	37
<b>Taulukko 5.</b> Keskiännitelinjojen 0,5 -70kV johtopituudet.. .....	38
<b>Taulukko 6.</b> Maaseutusähköasema syöttöverkon ja päämuuntajan tiedot.....	43
<b>Taulukko 7.</b> Maaseutuaseman kaapeli- ja johtotiedot lähdöittäin. ....	45
<b>Taulukko 8.</b> Lähtöjen virroista lasketut kuormat.....	46
<b>Taulukko 9.</b> Maaseutuverkko maasulkuvirta ja sammutuskela Z0.....	47
<b>Taulukko 10.</b> Kaupunkisähköasema syöttöverkon ja päämuuntajan tiedot.....	48
<b>Taulukko 11.</b> Kaupunkiaseman kaapelitiedot lähdöittäin. ....	50
<b>Taulukko 12.</b> Kaupunkiverkko maasulkuvirta ja sammutuskela Z0. ....	51
<b>Taulukko 13.</b> Kaikki havahtumiset testitapauksissa .....	64
<b>Taulukko 14.</b> Havahtumiset eri verkkomalleissa ja kytkennöissä.....	65
<b>Taulukko 15.</b> Havahtumiset 2LL/3LL -kytkennässä .....	66
<b>Taulukko 16.</b> Havahtumiset 3LN -kytkennässä.....	69



**LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Kyselylomake verkon lähtötiedot

**LIITE 2.** Simuloinnin tulosten yhteenveto

# 1 JOHDANTO

Sähkövoimajärjestelmän asianmukainen toiminta edellyttää taajuuden ja jännitteen pysymistä lähellä nimellisarvoja. Sekä ali- että ylitaajuus on haitallinen verkon pyörriville koneille, kuten generaattoreille ja niiden voimakoneille. Alitaajuus on verkon stabiiliuden kannalta ylitaajuutta vaarallisempaa. Mikäli alitaajuustilanteessa sähkötehon lisääminen ja kuormien irrottaminen ei tuo tehotasapainoa takaisin, verkko voi ajautua suurhäiriötilaan.

Eurooppalaisessa verkossa sähköjärjestelmän varautumis- ja käytönpalautussuunnitelma nojautuu EU:n verkkosääntöön. Suomessa Fingridin suunnitelman mukaan tämä velvoittaa jatkossa kaikki jakeluverkonhaltijat olemaan osa varautumissuunnitelmaa ja suoraan kantaverkkoon liittyneet jakeluverkonhaltijat olemaan myös osa käytönpalautussuunnitelmaa. Suojareleiden taajuussuojan osalta tämä tarkoittaa sitä, että suojauksen toiminta pitää olla varmaa verkon oikeassa tehonvaja- ja ylituotantotilanteessa. Samanaikaisesti taajuussuoja ei saa antaa vikalaukaisua. Alitaajuussuoja ei saa toimia ohimenevissä vika- tai poikkeustilanteissa, jotka eivät ole tehonvajaustilanteita. Eikä ylitaajuussuoja saa antaa tuotanto- tai energianvarastointiyksikölle laukaisu/irrotuskäskyä ohimenevässä vikatilanteessa, kun kyseessä ei ole pysyvä ylitaajuustilanne /1/.

## 1.1 Työn tavoite

Tässä työssä testataan suojareleiden taajuussuojien toimintaa keskijänniteverkon yleisimmissä vikatilanteissa, eli oiko- ja maasuluissa. Testaus tapahtuu Omicron Relay SimTest -simulointiohjelmalla ja Omicron CMC 356 – syöttölähteellä. Simuloinnissa käytettävät verkkomallit, maaseudun sekaverkko ja kaapeloitu kaupunkiverkko, perustuvat kahteen olemassa olevaan keskijänniteasemaan ja -verkkoon. Testattavat suojareleet ovat eri valmistajien suunnittelemia ja valmistamia.

Työn tavoitteena on simuloida reaaliverkossa tapahtuvia yleisimpiä keskijänniteverkon vikoja ja havainnoida, kuinka suojareleiden taajuussuoja toimii näissä tilanteissa. Suojareleen poikkeavassa toimintatapauksessa vikatilanne analysoidaan, jotta ymmärrettäisiin, mikä poikkeaman aiheuttaa. Tässä työssä suojareleen

taajuussuoja ei saa antaa käytetyillä asetteluilla laukaisukäskyä lyhyessä simuloidussa vikatilanteessa. Myös havahtumista käsitellään poikkeamana.

## **1.2 Työn rakenne**

Työn teoriaosassa, luvuissa 2-4, käydään läpi verkon taajuuden teoriaa ja taajuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä taajuussuojauksen toimintaperiaatteita ja sovelluksia. Taajuussuojauksen osalta perehdytään lyhyesti myös taajuuden mittauksessa käytettyihin erilaisiin algoritmeihin ja vertaillaan niiden toimintaa tilanteissa, joissa mitattavassa taajuussignaali on verkossa ilmeneviä häiriöitä. Keski-jänniteverkon yleisimmät viat esitellään, sekä niiden vaikutus verkon taajuusmittaukseen.

Käytännön osuudessa, luvuissa 5 ja 6, kuvataan ensin, kuinka koestusdata, eli simulointimallit, on generoitu ja kuinka releet on aseteltu. Sen jälkeen esitellään koestuskytkentä ja -prosessi sekä testauksen tulokset ja niiden analysointi.

Viimeisenä esitellään luvussa 7 johtopäätökset ja arvioidaan työn onnistumista suhteessa asetettuun tavoitteeseen.

## 2 VERKON TAAJUUS

Sähkövoimajärjestelmässä taajuuden ja jännitteen on pysyttävä lähellä nimellisarvoja. Sekä ali-, että ylitaajuus voivat vahingoittaa verkon sähköisiä laitteita, näistä merkittävimpänä sähköverkon generaattori ja sen turbiini. Ylitaajuudella pyörivät osat joutuvat suureen rasitukseen ja niihin kohdistuva keskipakoisvoima voi vääntää ja rikkoa osia. Alitaajuus puolestaan on vaarallinen turbogeneraattorin turbiinin siivekkeille, sillä värähtely voi haurastuttaa ja rikkoa niitä. Taajuuden laskiessa alle 48-47 Hz, turbogeneraattorit on irrotettava verkosta. Alitaajuus voi aiheuttaa ongelmia myös generaattorin jäähdytykselle. /2,3/

Jännitettä säädetään loistehon avulla ja taajuutta voimakoneiden pätötehoa säätämällä. Verkossa ei voi varastoida sähköä suuria määriä, joten tuotetun ja kulutetun tehon välillä on vallittava tasapaino. Kuorman kasvaessa sähköntuotannon täytyy myös kasvaa, jotta verkon taajuus pysyy sallituissa rajoissa eikä ala laskea. Sama riippuvuus pätee myös käänteisesti, kuorman pienentyessä myös tuotetun sähkötehon tulee pienentyä, jotta taajuus ei nouse liian suureksi. /4,3/

Mikäli pätötehon kulutus kasvaa tuotantoa suuremmaksi, kuormitus ottaa tehonsa tahtigeneraattoreiden akselistojen pyörivien massojen liike-energiasta. Tämä hidastaa generaattoreita ja verkon taajuus pienenee. Mikäli kuorma, eli pätötehon kulutus puolestaan pienenee tuotettuun tehoon nähden, tahtigeneraattoreiden liike-energia kasvaa ja ne alkavat pyöriä nopeammin. Tällöin verkon taajuus kasvaa. Verkon kuorma suhteessa sähköntuotantoon voi muuttua yhtäkkisesti, esimerkiksi suuren moottorin kytkeytyessä verkkoon (etenkin saarekekäytössä), generaattorin irrottua verkosta tai kuorman irrottua verkosta vian vuoksi (esim. pysyvä maasulku johtolähdöllä). Hetkelliset taajuusmuutokset ovat suuria, jos verkkojen väliset yhdysjohdot irtoavat verkosta ollessaan raskaasti kuormitettuja tai suuret voimalaitokset irtoavat verkosta /4,3/. Verkossa voi tapahtua taajuusromahdus ja sen seurauksena laaja häiriö, jos verkon taajuus on ensin laskenut jonkin muun häiriön takia, eikä taajuuden laskua onnistuta estämään. Suuressa verkossa romahdus on mahdollista, jos verkko on ensin jakautunut osiin. /4/

## 2.1 Taajuus ja pätöteho

Verkon taajuuden nopeuden muutos riippuu verkon liike-energiasta ja pätötehon muutoksen suuruudesta. Taajuuskuoppa ja taajuuden laskun nopeus on generaattorin irrottua isompi, mikäli yhteiskäyttöverkko on jakautunut eri osiin kuin jos verkko olisi yhtenäinen. Saarekekäytössä riski verkon romahtamiseen on suurempi, mikäli taajuus laskee liikaa eikä saarekkeessa ole tarpeeksi tehonsäätökapasiteettia, joka voisi palauttaa taajuuden ennalleen. /4,3/

Pyörivän massan liike-energia  $W_k$  (tässä verkon liike-energia) on

$$W_k = \frac{J\omega^2}{2} \quad (1)$$

missä  $J$  = pyörivän massan hitausmomentti

$\omega$  = pyörivän massan kulmanopeus

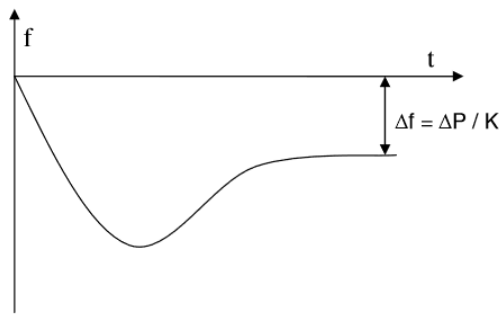
Verkon pätötehon muutos  $\Delta P_k$  on liike-energian  $W_k$  derivaatta.

$$\Delta P_L = \frac{dW_k}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

Ratkaistaan yhtälöstä (2) kulmataajuuden derivaatta ajan suhteen ja sen perusteella nähdään verkon taajuuden muutoksen  $df/dt$ , pätötehon muutoksen  $\Delta P_L$  ja verkon liike-energian  $W_k$  välinen yhteys:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta P_L}{J\omega} = \frac{2\Delta P_L\omega}{2J\omega^2} = \omega \frac{\Delta P_L}{2W_k} \Leftrightarrow \frac{df}{dt} = f \frac{\Delta P_L}{2W_k} \quad (3)$$

Ison generaattorin irrottua verkosta, taajuus laskee aluksi lineaarisesti (**Kuva 1.**). Tästä lineaarisesta osasta voidaan laskea verkon liike-energia yhtälön (3) avulla. Kuvassa 1 verkon taajuus jää muutoksen jälkeen alkuperäistä taajuutta pienemmäksi. Säätoivoima  $K$  esitellään seuraavassa kappaleessa. /4,5/



**Kuva 1.** Verkon taajuus, kuormituksen tai sähköntuotannon muutos. /5/

Esimerkiksi ison 1200 MW:n generaattorin irrotessa pohjoismaisesta verkosta ja taajuuden laskiessa nimellisestä 50 Hz:stä 49,5 Hz:iin 5 sekunnissa, verkon liike-energia on 300 GWs /4, s.348/.

$$W_k = \frac{1}{2} \frac{dt}{df} * f * \Delta P_L = \frac{5s}{2 * (-0,5Hz)} * 50Hz * (-1200MW) = 300GWs \quad (4)$$

Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon liike-energia on yllä olevan esimerkin luokkaa, eli 300 GWs, ja se vaihtelee tietysti hetkittäin sen mukaan, kuinka paljon generaattoreita on kytketty verkkoon /4/. Reaalielämässä 1200 MW:n tehonlasku pohjoismaisessa yhteiskäyttöverkossa tarkoittaisi vaikkapa Ruotsin Forsmarkin ydinvoimalan kolmosreaktorin irtoamista verkosta (teho 1230 MW) /6/.

Kun liike-energian suuruus on tiedossa, voidaan tietyn kuorman tai tuotannon irrotessa verkosta laskea taajuuden muutosnopeus heti kuorman tai tuotannon irtoamisen jälkeen. Normaalisissa tilanteissa generaattorien tehonsäätäjät alkavat korjata tilannetta joko nostamalla tai laskemalla tehoa, kun taajuus poikkeaa asetelluista parametreista.

## 2.2 Taajuuden säätö

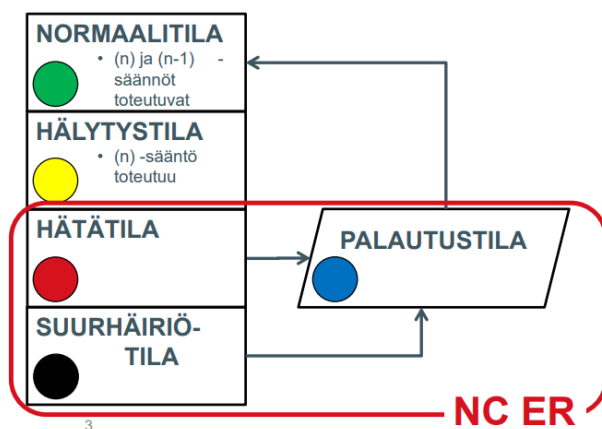
Normaalisti kuormien ja tuotannon muutokset ovat verkon liike-energiaan verrattuna niin pieniä, että niiden vaikutus taajuuteen on pieni. Normaalitylanteessa verkon taajuus pidetään välillä 49,9 -50,1 Hz, eli vaihtelu pyritään pitämään korkeintaan 0,1 Hz:n suuruisena. Standardin SFS-EN 50160 mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa pien- ja keskijänniteverkon perustaajuuden (mitattuna 1s aikavälein,

10s:n keskiarvo) tulee olla 99,5 % ajasta vuoden aikana välillä 49,5 – 50,5 Hz, eli vaihtelu on korkeintaan 0,5 Hz. Tätä suurempi poikkeama sallitaan normaaleissa käyttöolosuhteissa 0,5 % ajasta ja tällöin maksimipoikkeama saa olla +4 % ja minimipoikkeama -6 %. Erillisverkon (saareke) taajuudessa standardi sallii suurempia poikkeamia (**Taulukko 1.**). /4,7/ Tässä työssä keskitytään yhteiskäyttöverkkoon.

**Taulukko 1.** SFS-EN 50160 taajuuden rajat normaaleissa käyttöolosuhteissa. /7/

Pien- tai keskijänniteverkko	SFS-EN 50160: perustaaajuuden keskiarvon rajat
Yhteiskäyttöverkko	<ul style="list-style-type: none"> <li>50 Hz <math>\pm</math> 1 % (eli 49,5 - 50,5 Hz) 99,5 % vuodesta</li> <li>50 Hz – 6 % / + 4% (eli 48 - 52 Hz) 100 % ajasta</li> </ul>
Erillisverkko	<ul style="list-style-type: none"> <li>50 Hz <math>\pm</math> 2 % (eli 49 - 51 Hz) 95 % viikosta</li> <li>50 Hz <math>\pm</math> 15 % (eli 42,5 - 57,5 Hz) ajasta</li> </ul>

Meneillään on parhaillaan EU:n verkkosäännöksiin liittyviä muutoksia ja Fingrid on ehdottanut suomalaiseksi tulkinnaksi EU:n NC ER (Network Code for Emergency and Restoration) -verkkosääntöön perustuen sähköjärjestelmän häiriötilalle kolmea eri tilaluokitusta: hätätila, suurhäiriötila ja palautustila (**Kuva 2.**).



**Kuva 2.** Fingrid sähköjärjestelmän tilat. /1/

Taajuuden kannalta hätätilassa taajuus on ollut yli 15 minuuttia alueen  $50 \pm 0,5$  Hz ulkopuolella tai taajuus on alueen  $50 \pm 1,0$  Hz ulkopuolella. Suurhäiriötilassa yli 50% Suomen kulutuksesta on ilman sähköä tai kantaverkko on ollut

jännitteettömänä yli 3 minuuttia. Kuvassa 2 nähdään myös normaali- ja hälytystilan kriteerit. /1/

Koska taajuuden täytyy pysyä lähellä vakiota, tarvitaan verkossa taajuudensäätöä. Sitä tehdään sekä taajuusohjatuilla että käsin käynnistettävillä *käyttö-* ja *häiriöreserveillä*. Normaalitilan säätöä tehdään taajuusohjatulla käyttöreservillä ja tarvittaessa otetaan käyttöön myös käsin käynnistettävää käyttöreserviä. Taajuusohjatut reservit ovat ns. pyörivää reserviä, eli voimalaitoksia, jotka reagoivat taajuuden muutoksiin automaattisesti. Niiden generaattorit alkavat säätää tehoa, kun taajuus poikkeaa nimellisestä 50 Hz:stä. Kokonaan ne ovat käytössä, kun taajuuspoikkeama on  $\pm 0,1$ . Etenkin vesivoimalaitoksia käytetään pyörivinä reserveinä, mutta säätövoimaa tuotetaan myöskin lauhdevoimalaitoksilla sekä tuodaan ulkomailta (Ruotsi, Norja, Venäjä). Valtaosa Suomen säätövoimasta tuotetaan kotimaisella vesivoimalla tai tuodaan muista Pohjoismaista, joissa on helposti säädettävää vesivoima-tuotantoa. /4,8/

Mikäli taajuus laskee alle 49,9 Hz, alkavat taajuusohjatut häiriöreservit säätää tehoa. Kaikkien taajuusohjattujen häiriöreservien tulee olla käytössä, jos taajuus laskee 49,5 Hz:iin. Häiriöreservejä pidetään pohjoismaisessa verkossa sen verran, että järjestelmä kestää vakavimman N-1 vian ilman, että taajuus laskee pysyvästi alle 49,5 Hz. Taajuuden kannalta pahin N-1 vika pohjoismaisessa verkossa on verkon suurimman tuotantoyksikön irti kytkeytyminen (Ruotsin Forsmark 3 ~1200MW) /4/. N-1 periaate tarkoittaa sitä, että verkko kestää yhden samanaikaisen vakavan vian, esim. johto-, asema- tai generaattorivian ilman laajenevia vaikutuksia /9/.

Taajuusohjattua häiriöreserviä ovat vesi- ja lauhdevoimaloiden generaattorit ja ali-taajuudesta irtoaviksi säädetyt kuormat. *Nopeat häiriöreservit* ovat käsin käynnistettäviä reservejä, esim. nopeasti käynnistyvät kaasuturbiinit. Niiden pitää käynnistyä 15 minuutin kuluessa taajuuspoikkeaman synnystä. Myös käsin irti kytkettäviä kuormia käytetään nopeina häiriöreserveinä. Kun nopeat häiriöreservit on otettu käyttöön, vapautuu taajuusohjattu häiriöreservi uuden häiriön varalle. Nopeiden häiriöreservien lisäksi voidaan ottaa käyttöön myös *hitaita häiriöreservejä*, joiden



käynnistäminen kestää yli 15 minuuttia. Käynnistyttyään ne puolestaan vapauttavat nopeita reservejä taas uudelleen käytettäviksi. /4/

Pyörivien ja käsikäyttöisten reservien lisäksi verkossa on luonnollista säätövoimaa. Tämä johtuu siitä, että osa verkon kuormasta on taajuudesta riippuvaista ja pienenee taajuuden pienentyessä. Taajuus verkossa voi siis laskea tiettyyn arvoon, mutta ei jatka enää laskuaan, kun tämä arvo on saavutettu. Tätä kutsutaan verkon luonnolliseksi säätövoimaksi,  $K_v$  (yksikkö %/Hz tai MW/Hz). Suomen verkon luonnollinen säätövoima on n. 200 MW/Hz ja pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon säätövoima n. 1000 MW/Hz. Luonnollinen säätövoima pienentää reservitarvetta. Taajuuden muutos ajan funktiona  $\Delta f(t)$  ilman turbiinien tehonsäätöä on

$$\Delta f(t) = -\frac{\Delta P_L}{K_v} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (5)$$

missä  $\Delta P_L$  = kuorman muutos

$K_v$  = verkon luonnollinen säätövoima

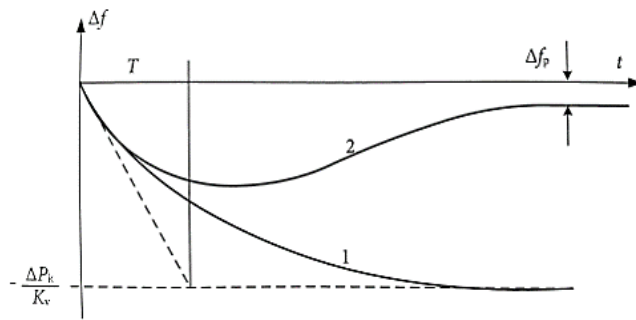
$T = \frac{2W_k}{f_N K_v}$  on verkolle tyypillinen aikavakio,  $f_N$  on verkon nimellistaajuus

Pohjoismaisessa verkossa aikavakio  $T$  on 5-10 sekuntia, riippuen verkon kuormituksesta. Suomessa satunnainen kuormitusmuutos voi olla esimerkiksi +100 MW. Ilman taajuussäätöä ja verkon luonnollisen säätövoiman ollessa pohjoismaisessa verkossa 1000 MW/Hz, on taajuuspoikkeama tällaisen kuormitusmuutoksen jälkeen

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{K_v} = -\frac{100 \text{ MW}}{1000 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}} = -0,1 \text{ Hz} \quad (6)$$

Kuvassa 3 on esitetty verkon taajuus kuormitusmuutoksen jälkeen ilman säätöä ja säädön kanssa. Käyrä 1 kuvaa verkon taajuutta, kun taajuussäätöä ei ole tehty. Taajuus laskee ajassa  $T$  taajuuspoikkeamaan, jonka suuruus on  $-\frac{\Delta P_L}{K_v}$ . Kuvassa 3

$-\frac{\Delta P_L}{K_v}$  on merkitty  $-\frac{\Delta P_k}{K_v}$  ( $l = \text{load}$ ,  $k = \text{kuorma}$ ).



**Kuva 3.** Verkon taajuus ilman säätöä (1) ja säädön kanssa (2). /4/

Kuten aiemmin on mainittu, osalla verkon generaattoreista on tehonsäätäjät, jotka säätävät turbiinin tehoa automaattisesti, mikäli verkon taajuuspoikkeama on suurempi kuin 0,1 Hz tai pienempi kuin -0,1 Hz. Säättäjät ovat P-säättäjiä, jotka ohjaavat säätösuuretta sitä enemmän, mitä suurempi ero ohjearvon ja mitatun arvon välillä on. Voimakoneen tehon muutos muuttaa generaattorin sisäisen jännitteen kulmaa. P-säättäjä jättää aina pienen poikkeaman, eli taajuutta ei saada täsmälleen samaksi kuin ohjearvo. Tämä nähdään kuvassa 3, missä käyrä 2 kuvaa kuormitusmuutosta säädön kanssa. Säädön jälkeen pieni pysyvä taajuuspoikkeama on  $\Delta f_p$ . Verkon säätövoima  $K$  määräytyy turbiinien statiikasta (säättäjien herkkyys taajuuden muutokseen) ja säätöön liitettyjen koneiden tehosta. Kuorman muutos  $\Delta P_L$  on

$$\Delta P_L = K * \Delta f_p \quad (7)$$

Pohjoismaisen verkon säätövoima on tyypillisesti 8000 MW/Hz. Tällöin 800MW:n tehovajaus tarkoittaa 0,1 Hz:n taajuuspoikkeamaa. /4/

Turbiinin antama teho pienenee sen taajuuden laskiessa. Mikäli pyörivää reserviä ei ole tarpeeksi ja taajuus pääsee laskemaan liikaa, pienenee generaattoreiden verkoon antama teho. Tarpeeksi matalalla taajuudella ei ole enää merkitystä olisiko voimakoneessa tai generaattorissa vielä tehoreservejä jäljellä, mikäli pienemmällä taajuudella annettu teho on liian pieni. Tämän vuoksi pelkkä pyörivä reservi ei riitä, vaan verkossa pitää olla myös alitaajuudesta irtoavaa kuormaa tai muita verkkosuojia. Toisaalta, mitä enemmän verkossa on pyörivää reserviä, sitä stabiilimpi verkko on, eli sitä vähemmän taajuus laskee äkillisten kuorman kasvun tai generaattoreiden irtoamisen jälkeen. /4/

### 2.3 Verkon taajuusstabiilius

Sähköverkko on lineaarinen ja dynaaminen järjestelmä, jossa tuotanto, kuorma ja siirtotilanteet muuttuvat ajan suhteen. Stabiilissa voimajärjestelmässä tahti-generaattorit pysyvät tahdissa ja jännite ja taajuus pysyvät hyväksyttävällä tasolla verkon muutoksista ja vikatilanteista huolimatta. Mikäli hyväksytyistä tahti-, jännite- ja taajuusrajoista poiketaan, on kyseessä stabiiliushäiriö. Stabiiliushäiriö voi romahduttaa koko verkon tai sen osan. Stabiilius voidaan jakaa kolmeen eri osaluokkaan: kulma-, jännite- ja taajuusstabiiliuteen. Tässä keskitymme taajuusstabiiliuteen. /4/

Taajuusstabiiliudella tarkoitetaan sitä, että voimajärjestelmä kykenee pitämään taajuutensa vakaana senkin jälkeen, kun kuormitus- tai tuotantomuutos on aiheuttanut merkittävän epätasapainon tuotannon ja kuorman välille. Alitaajuus on verkon stabiiliuden kannalta kriittisempää kuin ylitaajuus. Mikäli alitaajuustilanteessa sähkötehon lisääminen ja/tai kuormien irrottaminen ei tuo tehotasapainoa takaisin, verkko voi romahtaa. Jos generaattori on irronnut verkosta ja verkon taajuus on laskenut liian alas, joudutaan turbogeneraattorit irrottamaan verkosta. Tämä laskee verkon taajuutta vielä lisää. Taajuusromahdus tapahtuu, jos verkon taajuus on ensin laskenut jonkin muun häiriön takia, eikä taajuuden laskua onnistuta estämään. Suurissa yhteiskäyttöjärjestelmissä taajuusromahdus voi tapahtua, jos verkko hajoaa pienempiin osiin, joissa epätasapaino tuotannon ja kulutuksen välillä on suuri. Näin on käynyt esimerkiksi marraskuussa 2006, kun Manner-Euroopan yhteiskäyttöverkko UCTE (nykyään ENTSO-E) jakautui kolmeen osaan ja n. 15 miljoonaa ihmistä jäi ilman sähköä. Häiriön aiheutti huonosti valmisteltu käyttökatkos saksalaisella 380 kV:n johdolla. N-1 ehdot eivät täyttyneet johdon irtikytkennän jälkeen. Irtikytkennän jälkeen kahden eri verkkoyhtiön välisen johdon tehonsiirto oli liian suuri ja johto laukaistiin irti verkosta. Tämän jälkeen muitakin johtoja laukesi irti verkosta ja verkko jakaantui kolmeen eri osaluokkaan. Kahden alueen taajuus laski ja yhden nousi. Alitaajuusalueella tuotantoa irtosi liian pienen taajuuden takia (49 Hz ja 49,8 Hz). Irtoavasta osasta 40 % oli tuulivoimaa ja 30 % yhdistettyä sähkön ja lämmön tuotantoa. Osa kuormasta irrotettiin automaattisesti alitaajuuden vuoksi. Ylitaajuusalueilla taajuus oli korkeimmillaan 51,4 Hz johtuen ylituotannosta.

Taajuutta pienennettiin automaattisesti irrottamalla generaattoreita verkosta ja pienentämällä muuta sähköntuotantoa. Koko Keski-Euroopan laajuiselta suurhäiriöltä kuitenkin välttyttiin. Häiriötilanne kesti 47 minuuttia. /4/

Verkon taajuus pienenee sitä nopeammin, mitä vähemmän verkossa on liike-energiaa (generaattorin pyörivät massat), kuten kappaleen 2.1 yhtälön (3) mukaan voidaan todeta. Taajuus pienenee myös sitä nopeammin, mitä vähemmän verkossa on pyöriviä reservejä. Suuri yhteiskäyttöverkko on siten stabiiliuden kannalta parempi vaihtoehto kuin pienet saarekejärjestelmät, sillä suuressa verkossa on enemmän liike-energiaa tahtigeneraattoreiden pyörivissä massoissa ja usein myös enemmän reservejä. Pohjoismaisessa yhteiskäyttöverkossa taajuuden säätöön voidaan tarvittaessa käyttää myös vaihtosähköverkkojen välille kytkettyä tasasähköyhteyttä (esim. Etelä-Suomen ja Etelä-Ruotsin välillä oleva tasasähköyhteys Fenno-Skan). Tasasähköyhteydellä voidaan verkon pätötehoa nostaa nopeasti. /4/

Jos taajuus nousee yli nimellistaajuuden, se ei yleensä aiheuta verkon stabiiliusongelmaa. Jos taajuus verkossa nousee liikaa, voidaan verkosta irrottaa generaattoreita tai vähentää niiden antamaa tehoa. /4/

### 3 TAAJUUSUOJAUS SUOJARELEILLÄ

Taajuussuojausta käytetään eri suojauskohteissa eri tarkoituksiin. Taajuussuojauksen pääsovelluksia ovat generaattorisuojaus (ali- ja ylitaajuussuoja) sekä johtolähtösuojaus tehonvaja- ja eroonkytkeytymissuojaus (alitaajuus- ja taajuuden muutossuoja).

Generaattorin taajuussuojaus toteutetaan generaattorin jännitteeseen kytketyllä suojaareleella. Suojaarele erottaa generaattorin verkosta ja pysäyttää sen, mikäli taajuus ylittää asetellun rajan. Ylitaajuus voi johtua kuorman äkillisestä häviämisestä tai generaattorin säätäjä voi olla vioittunut. Alitaajuuden tapauksessa generaattori erotetaan ensin verkosta ja mikäli taajuus edelleen pienenee omakäytössä, generaattori pysäytetään. Esimerkkinä: turbogeneraattorilla käytetään kaksi- tai kolmiportaista alitaajuussuojaa. Kolmiportaisen suojan ensimmäisellä portaalla voidaan antaa hälytys pienellä alitaajuudella, toisella portaalla erottaa generaattori verkosta ja kolmannella portaalla pysäyttää se. /10, 2/

Verkon tehonvajausta ilmenee taajuuden laskemisena. Myös verkon jännite saattaa paikallisesti heilahdella, etenkin kun tehonvajaussuojaus alkaa irrottaa kuormia verkosta. Taajuuden muutosnopeus on tyypillisesti 0,1...1,0 Hz/s ja aika, jossa tehonvajaushäiriö kehittyy, on n. 2...10 sekuntia /2/. Mikäli tehonvajaussuojauksen tekemät toimenpiteet (säätöreservien aktivoinnit) eivät ole riittävät taajuuden nostamiseksi hyväksyttävälle tasolle, toimii eroonkytkeytymissuojaus. Tällöin suojaareleiden ohjaamina verkosta irtoavat saarekkeiksi ne osat, joilla on omaa voimalaitoskapasiteettia. Saarekekäytössä ainakin osalle kuluttajista saadaan toimitettua sähköä, vaikka häiriö olisi iso. /2/

Meneillään olevat verkkosäätömuutokset vaikuttavat suomalaisiin jakeluverkonhaltijoihin ja heidän taajuussuojaukseensa, sillä nämä yhtiöt veloitetaan osallistumaan järjestelmän varautumissuunnitelmaan. Varautumissuunnitelmassa alitaajuussuoja (tehonvajaussuoja) on merkittävässä asemassa. Varautumissuunnitelma on tehty yhdessä muiden Pohjoismaiden kanssa. Suomen osalta vaatimus on, että 30% Suomen hetkellisestä kokonaiskuormasta (km. 3000 MW) on oltava alitaajuussuojan piirissä. Nykyinen suoja kattaa vain alle 10% kuormasta. Tämä

tarkoittaa jakeluverkonhaltijoille ja suoraan kantaverkkoon kytkeytyneiden teollisuusasiakkaiden osalta uutta alitaajuussuojan asettelua, taulukon 2 mukaisesti.

**Taulukko 2.** Tehonvajaussuojan nykyiset ja uudet portaat. /1/

						Uusi		
						f (Hz)	Viive(s)	%
						Porras	Nopea	kuormasta
Nykyinen						1	48.8	0.15
						2	48.6	0.15
						3	48.4	0.15
						4	48.2	0.15
						5	48	0.15
								10

						Uusi		
						f (Hz)	Viive(s)	%
						Porras	Nopea	kuormasta
Nykyinen						1	48.8	0.15
						2	48.6	0.15
						3	48.4	0.15
						4	48.2	0.15
						5	48	0.15
								10

Nykyisen kahden portaan sijaan alitaajuusportaita on taulukon 2 mukaisesti viisi ja ensimmäinen alitaajuusporras on 48,8 Hz, jolloin suojan toimintaviiveellä 0,15 ms irrotetaan 5% kuormasta. Portaita voidaan hajauttaa eri asemille ja jos asemia on vähän, sallitaan viidestä portaasta poikkeama. Ääritapauksessa portaita on vain yksi, 48.8 Hz, joka laukaisee kerralla 30% kyseenomaisen jakeluverkon kokonaiskulutuksesta. Suojauksen kokonaistoiminta-aika saa olla enintään 150 ms siitä, kun taajuus alittaa asettelun /1/. Tämä on tiukka aika, sillä pelkästään katkaisijan toiminta-aika voi olla 35-100 ms (100 ms vanha katkaisija) /11/ ja useissa suojareleissä taajuussuojauksen minimitoiminta-aika on 100 ms.

Muita tarkkaa taajuusmittausta tarvitsevia suojaus- ja ohjaussovelluksia ovat generaattorin, moottorin ja muuntajan ylimagnetointisuojaus (rautasydämen kyllästyminen ja nopea lämpeneminen  $U/f$  suhteen ollessa liian suuri) ja tahdistustoiminto (generaattorin tahdistus verkkoon tai verkon eri osien tahdistus ennen niiden yhdistämistä). /2/

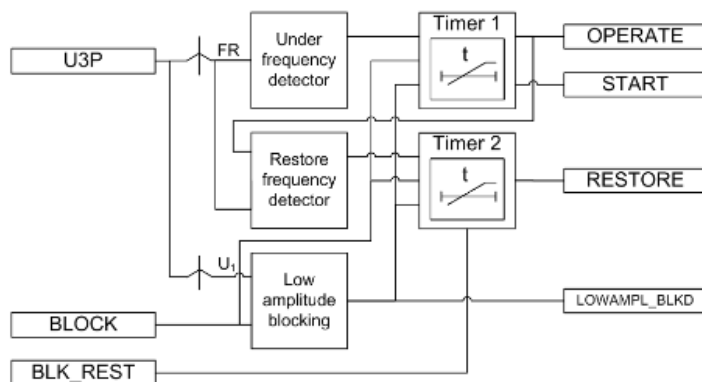
Taajuusmittauksen tarkkuus on tärkeää myös suojareleen muiden suojaustoimintojen kannalta. Suojareleen taajuusmittauksen ja taajuuden mukaan vaihtelevan näytteenottotaajuuden (frequency tracking) epätarkkuus voi aiheuttaa muissa suojaustoiminnoissa käytettävien jännite- ja virtaosoittimien vääristymää ja siten heikentää osoitinlaskentaan perustuvan suojauksen oikeaa toimintaa. /10/

Kaikissa suojaussovelluksissa toimintaperiaate on sama: suojareleen suoja havahduu, mikäli aseteltu suureen arvo ylittyy tai alittuu. Mikäli ylitys tai alitus kestää

tarpeeksi kauan, suojariele toimii asetellun ajan kuluttua, eli antaa asettelun mukaisesti joko hälytyksen, laukaisukäskyn katkaisijalle tai pysäytyskäskyn generaattorille. Mikäli suureen arvo palautuu asetteluarvojen sisälle suojarieleen toiminta-aikaa lyhyemmässä ajassa, suojariele palautuu eikä anna laukaisukäskyä. /2/

### 3.1 Alitaajuussuoja $f <$

Alitaajuussuojaa käytetään tunnistamaan sähkövoimajärjestelmän liian matala taajuus ja antamaan hälytys ja/tai toimintakäsky riippuen suojarieleen asettelusta. Esimerkkinä alitaajuussuojan toimintaperiaatteesta kuvassa 4 on esitetty ABB:n Relion 630 -sarjan alitaajuussuojan DAPTUF toimintaperiaate.



**Kuva 4.** ABB 630 alitaajuussuojan DAPTUF toimintadiagrammi. /12/

Mitattu taajuus on kolmen vaiheen jännitetulojen (jännitteiden myötäkomponentit) yhdistetty signaali, U3P. Mitattua taajuutta verrataan aseteltuun taajuusrajaan (under frequency detector). Mikäli taajuus alittaa asetellun arvon (REF630 oletusarvo 48,80Hz), toiminta-ajastimelle Timer 1 lähetetään aktivointisignaali. Timer 1 aktivoi START lähdön. Timer 1:llä on käyttäjän määrittelemä vakio-toiminta-aika (definite time DT, oletusarvo 80 ms). Kun Timer 1 saavuttaa asetellun toiminta-ajan, OPERATE -lähtö aktivoituu ja suojariele antaa asetusten mukaan hälytyksen tai laukaisukäskyn. Mikäli vika häviää ennen kuin toiminta-ajastimen vakioaika on kulunut, toiminta-ajastimen resetointi aktivoidaan erillisellä resetointiajastimella (ei kuvassa 4). Mikäli resetointiajastin saavuttaa sille asetetun ajan (oletusarvo 20 ms), Timer 1 resetoituu ja START aktivointi poistuu. Suojan toiminta voidaan estää

BLOCK –tulolla: kun se aktivoituu, toiminta- ajastin resetoituu ja START ja OPERATE -lähdöt deaktivoituvat. /12/

Kun OPERATE on aktivoitunut, restoring frequency detector –toiminto käynnistyy. Kun tämä toiminto on käynnissä, mitattua taajuutta verrataan aseteltuun arvoon (oletusasetus 49,90 Hz) jotta takaisinkytkentä voidaan tehdä taajuuden noustessa uudelleen sallittuihin rajoihin. Kun taajuus on yli asetellun arvon, toiminta-ajastin Timer 2 käynnistyy. Kun Timer 2 saavuttaa asetellun arvon RESTORE -lähtö aktivoituu, eli suoja-alue antaa jälleenkytkentäkäskyn. Timer 2 toimii asetellulla vakio-toiminta-ajalla (oletusarvo 0 s). RESTORE -lähtö pysyy aktivoituna 100 ms. Mikäli mitattu taajuus tippuu alle asetteluarvon ennen kuin RESTORE on aktivoitu, Timer 2:n resetointiajastin aktivoituu. Mikäli resetointiajastin saavuttaa sille asetellun arvon (resetoinnin viiveajan oletusasetus 20 ms), Timer 2 resetoituu.

BLOCK –lähdön aktivoituminen peruu jälleenkytkentätoiminnon. Mikäli jälleenkytkentäkäske on peruttu, RESTORE -lähtö voidaan uudelleen aktivoida vai kun seuraava kuormanirrotoiminto on havaittu, eli OPERATE -lähtö on aktivoitunut uudelleen. /12/

BLK\_REST -tulo poistaa RESTORE -lähdön aktivoinnin. Jälleenkytkentätoiminto liian alhaisella taajuudella voidaan myös estää asettamalla resetoinnin viiveajaksi 0 s. /12/

Mitatun jännitteen amplitudia verrataan aseteltuun minimijännitteeseen. Mikäli jännite on matalampi, kuin aseteltu arvo, LOWAMPL\_BLKD lähtö aktivoituu ja tämä reseto ajastimet Timer 1 ja Timer 2. Taajuussuojan toiminta estetään, mikäli jännite on liian matala. Jos BLOCK aktivoituu, LOWAMPL\_BLKD lähdön aktivointi poistuu. /12/ Jännitteen minimitasoa voidaan käyttää alitaajuussuojan toiminnan edellytyksenä muissakin suoja-alueissa. Tällä vältetään aiheettomilta hälytyksiltä, mm. silloin kun suojauskohde on jännitteetön.

Eri suoja-aluevalmistajien malleissa alitaajuuden vakiona olevien suojaportaiden määrä vaihtelee. Esimerkiksi Arcteqin AQ 300 -sarjan suoja-alueissa suojaportaita alitaajuudelle on vakiona 2,  $f < f_{<}$  ja  $f_{<} < f_{<}$ , ABB:n 630 –sarjassa on vakiona yksi portas

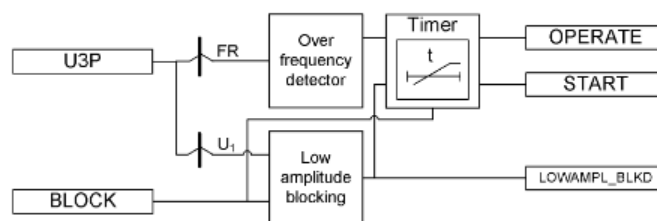


$f <$ . Yleensä suojarileissä portaita voi lisätä itse konfiguroitavan logiikan avulla. /13, 12/.

Alitaajuussuojan lähtösignaalia voidaan käyttää tuotetun sähkötehon ja kuorman epätasapainotilanteissa nostamaan generaattoreiden tuottamaa pätötehoa, kuormien erotuksessa, asetteluarvojen muuttamiseen siirtoverkon sisäisissä tasasähköjärjestelmissä ja kaasuturbiinien käynnistyksessä /12/. Mikäli tehon nostaminen ja kuormien irrotus ei nosta verkon taajuutta tarpeeksi, taajuuden laskiessa liian alhaiseksi täytyy turbiinit irrottaa verkosta. Tähän voidaan myös käyttää alitaajuussuojaa. Alitaajuussuojaa on mahdollista käyttää myös havaitsemaan suunnittelematon saarekekäyttö hajautetun tuotannon verkossa. Ajatuksena on, että verkon osan ajautuessa suunnittelemattomasti saarekekäyttöön saarekkeessa tuotettu teho on todennäköisesti riittämätön kulutukseen verrattuna ja taajuus saarekkeessa laskee. /3, 14/

### 3.2 Ylitaajuussuoja $f >$

Ylitaajuussuojaa käytetään tunnistamaan sähkövoimajärjestelmän liian korkea taajuus ja antamaan hälytys ja/tai toimintakäske suojarileeseen määritellyn asettelu mukaisesti. Esimerkkinä ylitaajuussuojan toimintaperiaatteesta kuvassa 5 on esitetty ABB:n Relion 630 -sarjan ylitaajuussuojan DAPTOF toimintaperiaate.



**Kuva 5.** ABB 630 ylitaajuussuojan DAPTOF toimintadiagrammi. /12/

Toimintalogiikka on alitaajuussuojan kanssa samantyyppinen. Jännitesignaalista U3P mitattua taajuutta verrataan aseteltuun taajuusrajaan (over frequency detector). Mikäli taajuus ylittää asetellun arvon tai oletusarvon (REF630 51,20 Hz), ajastimelle Timer 1 lähetetään aktivointisignaali ja START -lähtö aktivoituu. Kun Timer 1 saavuttaa asetellun toiminta-ajan, OPERATE -lähtö aktivoituu ja suojarile antaa asettelu mukaisesti hälytyksen tai laukaisukäskyn. Mikäli taajuus palaa

normaaliksi häviää ennen kuin vakioaika on kulunut, Timer 1:sen resetointiajastin aktivoidaan. Mikäli resetointiajastin saavuttaa erikseen asetetun ajan tai oletusajan 20 ms, Timer 1 resetoituu ja START aktivointi poistuu. Suojan toiminta voidaan estää BLOCK –tulolla samoin kuin alitaajuussuoja. /12/

Mitatun jännitteen amplitudia verrataan aseteltuun minimijännitteeseen ja samoin kuin alitaajuussuojassa, taajuussuojan toiminta estyy, mikäli jännite on liian matala. /12/

Ylitaajuussuojaa voidaan käyttää pienentämään tuotettua sähkötehoa, jotta verkon taajuus saadaan takaisin normaalille tasolle. Tämä tapahtuu laskemalla verkossa olevien generaattorien tehoa tai poistamalla generaattoreita verkosta. Generaattorin tehonsäätäjä huolehtii yleensä tehon laskemisesta, joten ylitaajuussuoja on verkkoon kytketyn generaattorin tehon säädön kannalta varasuoja. Ylitaajuussuojaa voidaan käyttää myös kuormien takaisinkytkennässä alitaajuudesta johtuneiden kuormien irrotuksien jälkeen. Samoin kuin alitaajuussuojaa, ylitaajuussuojaa voi käyttää hajautetun tuotannon verkossa suunnittelemattoman saarekekäytön havaitsemiseen, mikäli saarekkeessa on ylitaajuutta. Ylitaajuussuojaa käytetään myös generaattorin ja verkkoon suoraan kytketyn moottorin nopeussuojana. /3,12/

Kuten alitaajuussuojan osalta, myös ylitaajuuden vakiona olevien suojaosien määrä vaihtelee eri suojausvalmistajien malleissa ja niitä voidaan lisätä konfiguroitavan logiikan avulla

### **3.3 Taajuusmittaus ja kytkentä**

Voimansiirtojärjestelmässä taajuuden mittaus tehdään yleensä jännitesignaalista, koska se on virtasignaalia stabiilimpi /10/. Perinteisesti taajuussuojaukseen tarvittava mittaus on suositeltu tekemään pääjännitteistä, jotka ovat vähemmän riippuvaisia vaihejännitteiden epäsymmetriasta eivätkä niin herkkiä harmonisille yliaalloille. Esimerkiksi kolmatta yliaaltoa ei pääjännitteissä ole. Nykyisellä suojaus tekniikalla taajuussuojaus tehdään kuitenkin myös vaihejännitteillä, jopa yhdellä vaihejännitteellä. /12/

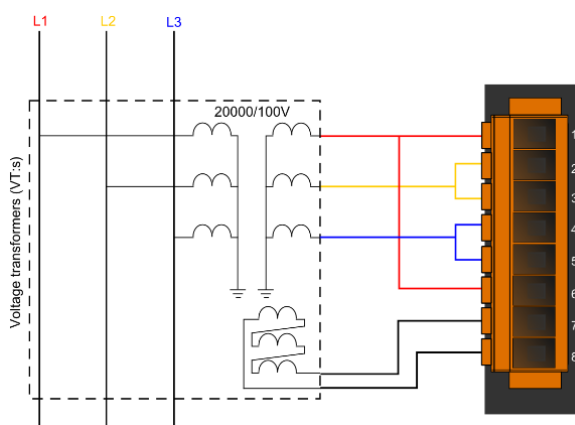
Taajuusmittaus on toteutettu hieman eri tavalla eri valmistajien suojarileissä. Joissakin suojarileissä taajuus mitataan kahdesta ensimmäisestä jännitetulosta, joko pääjännitteistä tai vaihejännitteistä. Joissakin suojarileissä taajuusmittaus perustuu kolmeen jännitetuloon.

Arcteqin AQ300 -sarjassa taajuusmittaus perustuu sovelluksen mukaan joko pääjännitteeseen  $U_{12}$  (kuvassa 6 tulo VT1) ja kiskojännitteeseen (kuvassa 6 tulo VT4) tai vaihejännitteiden painotettuun summaan /14/. ABB:n 630 -sarjassa taajuuden mittaus saadaan kolmen vaihejännitteen yhdistetystä signaalista. /15/

"D" VT+/2211		VT+ 2211
No.	Name	
1	U L1->	VT1 VT2 VT3 VT4
2	U L1<-	
3	U L2->	
4	U L2<-	
5	U L3->	
6	U L3<-	
7	U Bus->	
8	U Bus<-	

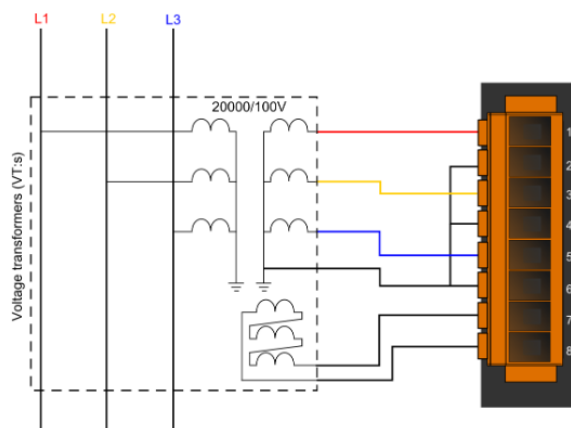
**Kuva 6.** AQ300 jännitemittausmoduuli. /14/

AQ300 – sarjan suojarileessä on kolme pääjännitemittausta  $3LL+U_0$ . Kuvassa 7 on tämän mittauksen kytkentä.



**Kuva 7.** AQ300 pääjännitteiden ja nollajännitteen mittaus  $3LL+U_0$ . /14/

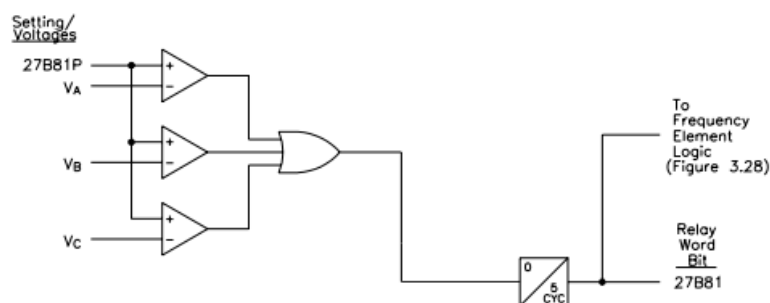
Vaihejännitteiden mittauskytkentä  $3LN+U_0$  on AQ300:ssa kuvan 8 mukainen.



**Kuva 8.** AQ300 vaihejännitteiden ja nollajännitteen mittaus  $3L_N + U_0$ . /14/

AQ300:ssa taajuusmittaus tehdään mittaamalla aikajakso jännitesignaalin kahden nousevan reunan nollakohtien välillä. Jotta mitattu taajuus voidaan vahvistaa oikeaksi, tarvitaan ainakin 4 perättäistä identtistä mittausta. Perusedellytys on, että mitattu jännite on yli 30% nominaalijännitteestä. /14/ Joidenkin muiden valmistajien suojarileissä minimijännite voidaan määrittää itse suojan vakioasettelussa tai logiikan avulla. Alla kuvassa 9 on esimerkkinä Schweitzer Engineering Laboratoriesin SEL-351A:n alijänniteblokkauk.

#### Frequency Element Settings



**Kuva 9.** SEL-315A taajuussuojan toiminnan esto alijännitteellä. /16/

Mikäli jokin mitatuista vaihejännitteistä  $V_A$ ,  $V_B$  tai  $V_C$  on minimijänniteasettelua 27B81P pienempi, suojarileen WB (Word Bit) 27B81 muuttuu 1:ksi ja estää taajuussuojan toiminnan. Tarkoitus on estää suojan tarpeeton toiminta esimerkiksi hetkellisessä verkon vikatilanteessa. /16/

### 3.4 Taajuuden mittausalgoritmeja

Taajuuden mittaukseen soveltuvia mittausalgoritmeja on useita. Aiemmin käytössä olleissa staattisissa suojareleissa taajuutta mitattiin laskemalla jännitesignaalin kahden nollakohdan välisiä pulsseja ja taajuus laskettiin pulssimäärän avulla. Tällä tavalla päästiin niinkin hyvään tarkkuusluokkaan kuin  $\pm 1\sim 2$  mHz normaalitaajuisen tai lähellä normaalia taajuutta olevan signaalin osalta. Nollakohtien ylitykseen (*zero-crossing*) perustuva mittausmetodi, tosin useana modifioituna versiona, on myös edelleen käytössä nykypäivän mikroprosessorireleissä (kuten AQ300:ssa). Sen rinnalle on myös tullut useita muita numeerisia algoritmeja /14, 10/.

Suojareleeseen mittaama signaali sisältää usein jännitesignaalin taajuutta vääristäviä elementtejä. Tehoelektroniikka ja epälineaarinen kuorma tuottavat jännitesignaaliin parittomia harmonisia komponentteja. Sarjakompensoidussa voimajärjestelmässä jännitesignaalin voi esiintyä matalataajuinen komponentti, koska turbiinigeneraattorin ja sarjakondensaattoreiden välille voi syntyä alisynkroninen resonanssi. Vikatilanteet, kytkentämuutokset, tehoheilahtelut ja elektroniikkapiirit aiheuttavat myöskin häiriöitä signaaliin: jännitteen tasakomponentin, amplitudin ja taajuuden heiluntaa sekä sähköistä kohinaa (yksittäisiä häiriöpiikkejä tai jatkuvaa vaihtelevataajuista kohinaa, *white noise*). /10/

Kasztenny et al. ovat vertailleet eri taajuudenmittausalgoritmien suorituskkyä simuloimalla MATLAB -ohjelmalla erilaisia häiriöitä jännitesignaalin taajuuteen ja vertaamalla kuinka kukin algoritmi toistaa testijännitesignaalin taajuuden. Mittausalgoritmit ovat:

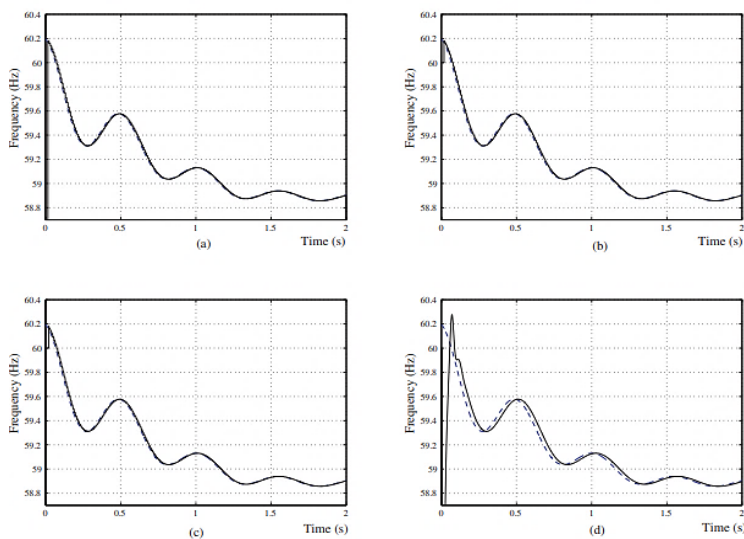
- ZC (lineaarisesti interpoloitu zero-crossing)
- SDFT (Smart DFT)
- SCD (Decomposition)
- SDM (Signal Demodulation).

Suurimmat erot algoritmien suorituskkyssä ovat näissä simulointitesteissä: harmoniset komponentit, signaali, jossa on matalataajuinen komponentti, häiriöpiikit ja kohina. Tämän työn kannalta olennaisimmat ovat kuitenkin mittauskyyvyn erot

seuraavissa testeissä: dynaamisesti laskeva taajuus, taajuuden ja jänniteamplitudin yhtäaikainen muutos, jännitesignaalin sisältämä dc-komponentti ja voimajärjestelmän taajuusmuutoksen simulointi (sis. myös harmoniset komponentit ja kohinan).

/10/

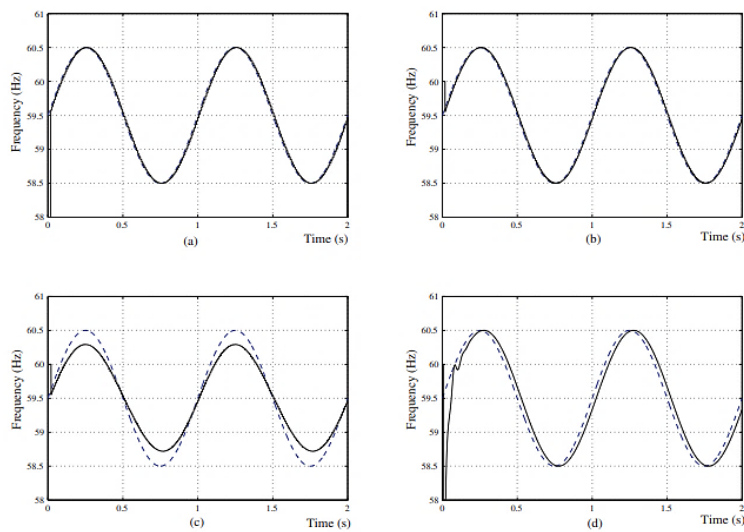
Dynaamisesti laskevan taajuuden osalta ZC, SDFT ja SDC toistavat signaalin taajuuden tarkemmin kuin SDM (**Kuva 10.**).



**Kuva 10.** Dynaamisesti laskeva taajuus a) ZC, b) SDFT, c) SDC, d) SDM. /10/

SDM:n tapauksessa algoritmin kanssa täytyy käyttää alipäästösuodatinta, joka aiheuttaa algoritmin toistamaan signaaliin viivettä, kuten kuvan 10 tuloksesta d) nähdään.

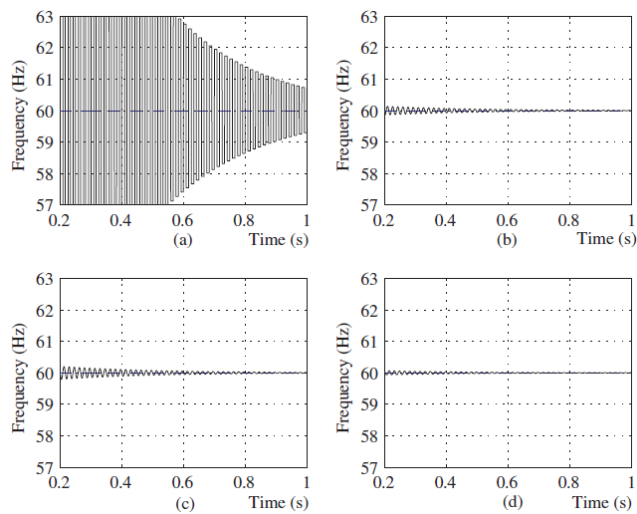
Taajuuden ja jännitesignaalin amplitudin yhtäaikainen muutos aiheuttaa suurimman virheen SDC algoritmissa (**Kuva 11.**).



**Kuva 11.** Taajuus ja amplitudi ajan suhteen a) ZC b) SDFT, c) SDC, d) SDM. /10/

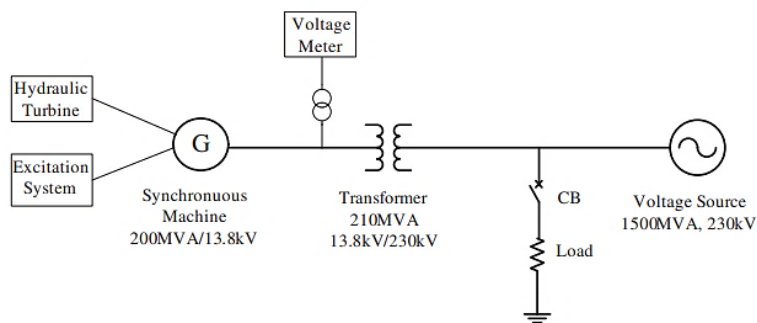
Tässä tapauksessa kuvan 11 tulos c) on se, että toistetun signaalin amplitudi poikkeaa testisignaalin amplitudista. SDM:n toistamassa signaalissa d) nähdään sama viive, kuin edellisessä kohdassa.

Tasakomponentin osalta nähdään, että sillä voi olla suuri vaikutus ZC -algoritmin tuottamaan mittaustulokseen, sillä tasakomponentti muuttaa merkittävästi nollakohdan ylityksien välistä aikaintervallia. Tämä nähdään selvästi kuvasta 12, missä ZC:n tuottama mittausta a) poikkeaa huomattavasti oikeasta taajuudesta, joita muut mittausalgoritmit b), c) ja d) kuvaavat hyvin. Useimmissa reaalielämän sovelluksissa dc-komponentti suodatetaan pois sopivalla suodattimella (kaistanpäästösuodatin) /10/.



**Kuva 12.** Signaali jossa tasakomponentti a) ZC b) SDFT, c) SDC, d) SDM. /10/

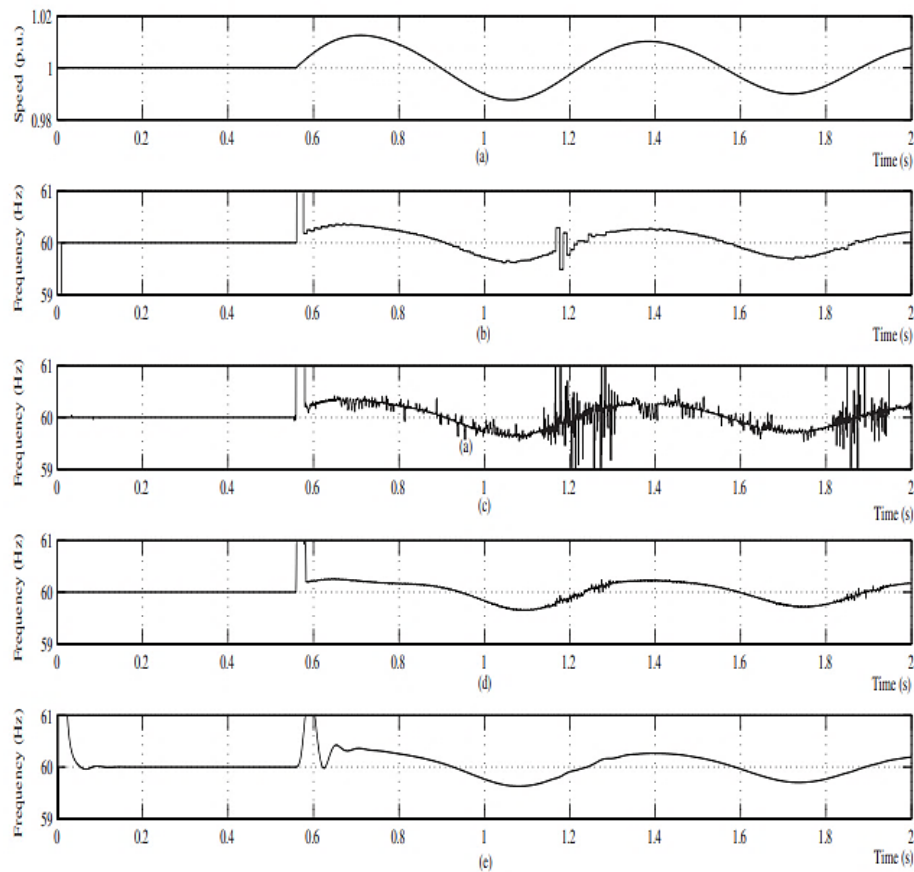
Voimajärjestelmän simulointi on toteutettu kuvan 13 mukaisella simulointimallilla. Mallissa on kaksi syöttöä: 200 MVA generaattori ja 1500 MVA:n jännitelähde.



**Kuva 13.** Voimajärjestelmän simulointimalli. /10/

Simuloinnin alussa kuorman katkaisija (CB) on kiinni. 0,55 sekuntia simuloinnin aloituksen jälkeen katkaisija avataan. Kun generaattorilta katoaa kuorma, sen roottorin nopeus ja jännite alkavat oskilloida, kunnes generaattorin ohjausjärjestelmä vaimentaa oskilloinnin. Roottorin nopeus ja sitä vastaavat algoritmien taajuusmitaukset näkyvät kuvassa 14.





**Kuva 14.** a) Generaattorin roottorin nopeus b) ZC c) SDFT, d) SDC, e) SDM. /10/

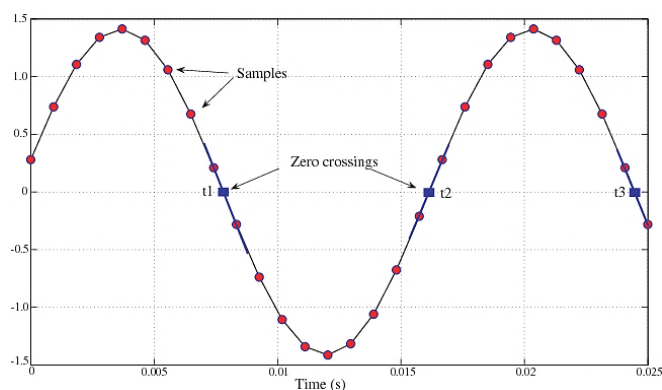
Kuvasta 14 nähdään, että SDM e) antaa parhaimman tuloksen, mutta samalla sen toipuminen katkaisijan avaamisesta aiheutuneesta ”hypystä” mittauksessa on hitain. Algoritmeista huonoimman mittaustuloksen antaa selkeästi SDTF c), koska se on hyvin herkkä reagoimaan signaalin sisältämien harmonisten komponenttien ja kohinan suhteen. /10/

Suojareleissä käytetään filttäreitä ja algoritmin tuottamaa mittaussignaalia jälkikäsitellään, jotta erilaisten häiriöiden vaikutus taajuusmittaukseen ei aiheuttaisi tarpeettomia laukaisukäskyjä. Filtröinti ja jälkikäsitely ei välttämättä poista mittauksesta kaikkia häiriöitä, joten taajuusmittauksen oikeellisuuden varmistamiseksi käytetään myös erilaisia varmistuksia suojan ohjelmoinnissa. Ehtoja voivat esimerkiksi olla se, että kaksi perättäistä mittausta täytyy olla tarpeeksi lähellä toisiaan ja useamman mittauksen otoksen arvojen täytyy olla johdonmukaisia. Järjestelmän pyörivien koneiden inertian vuoksi järjestelmän taajuus ei voi kasvaa tai laskea isoa

askelmaa kerralla, eikä kovin nopeasti. Myös syötettävän signaalin ensimmäiset mittaukset hylätään, sillä numeerinen algoritmi tarvitsee mittauksia muutaman jakson ajalta ennen kuin mittaus (tai tarkemminkin arvio taajuudesta) stabiloituu. /10/

Kasztenny et al. esittelevät myös kaksi testitulosta ZC- algoritmiin perustuvan suojareleen taajuusmittauskyvystä. Ensimmäinen testisignaali on äärimmäistapaus, jonka tarkoitus on haastaa suojareleen toiminta. Signaali sisältää dc-komponentin, kohinaa, häiriöpiikkejä, 3., 5. ja 7. harmonista komponenttia, taajuus- ja amplitudivaihtelua ajan suhteen. Filtterien ja jälkikäsitteilyn/ehtojen vaikutus näkyy testituloksissa: algoritmien testituloksiin verrattuna suojareleen mittauksessa ei taajuudessa näy äärimmäisiä muutoksia eikä epänormaaleja taajuuden arvoja. Toinen testisignaali on tehty kuvan 13 voimajärjestelmän simulointimallilla samalla tavalla kuin aiemmin on esitelty. Katkaisijan avaamisen yhteydessä suojareleen taajuusmittauksessa ei näy hyppyä, kuten algoritmien testaustuloksissa näkyi. Muutoinkin taajuus on suojareleen mittaamana vakaa läpi koko tehoheilahduksen. /10/

Zero-crossing (ZC) on yksinkertaisuutensa vuoksi yleisin taajuusmittauksen metodi. Jaksollisen signaalin taajuus voidaan mitata signaalin nollakohtien välisistä ajoista. Ohjelmoinnillisesti nollakohta voidaan tunnistaa vierekkäisten mitattujen näytteiden etumerkistä. Kuvassa 15 on esimerkki signaalin nollakohdista.



**Kuva 15.** Nollakohtien tunnistus, zero-crossing. /10/

Nollakohtien välinen aika saadaan laskettua näytteiden määrästä ja näytteenottotaajuudesta. Zero-crossing -algoritmin haasteet liittyvät sen häiriösietoisuuteen ja dynaamiseen vastekykyyneen. Mittauksen tulokseen ja tarkkuuteen vaikuttavat mm.

signaalinkäsittelyn virheet, harmoniset komponentit, kohina ja signaalin vääristyminen. Yleensä häiriöiden vaikutusten osalta käytetään liikkuvaa keskiarvon filttä parantamaan mittaustulosta. ZC -algoritmi tarvitsee useampia näytteenottojaksoja, jotta mittaustarkkuus on riittävän hyvä. Mittauksen dynaaminen vaste kärsii tästä viiveestä. /10/

### 3.5 Taajuussuojan testaus

Suojareleen taajuussuojan testauksen perustarkoitus on varmistaa taajuusmittauksen ja toiminta-ajan tarkkuus sekä suojan varma toiminta verkon oikeassa ali- tai ylitaajuustilanteessa. Yhtä tärkeää olisi varmistaa, että taajuussuojan toiminta on vakaata eivätkä tilapäiset häiriöt aiheuta vikalaukaisuja.

Jotta testaus on tarpeeksi kattava, Kasztenny et. al suosittelevat seuraavia viittä testikohtaa:

- 1) Pysyvän tilan (taajuus pysyy vakiona koko mittauksen ajan) mittaustarkkuus eri taajuuksilla, kattaen koko mittausalueen. Mittaustarkkuus pitäisi olla johdonmukainen/sama kaikilla taajuuksilla.
- 2) Porrastetusti alenevan taajuuden mittaustarkkuus, aleneminen 0,1 Hz askelmilla. Tarkistetaan suojareleen mittaama taajuus ja taajuuden muutosnopeus.
- 3) Käytetään samaa testiä kuin kohdassa 2 taajuussuojan toiminta-ajan mittaamiseen. Alenevia askelmia voidaan myös vaihdella 0,1 Hz -0,3 Hz välillä, jotta nähdään, pysyykö toiminta-ajan tarkkuus sallituissa rajoissa kaikissa tapauksissa.
- 4) Syötetään suojareleelle vääristynyt signaali, joka sisältää 3., 5. ja 7. harmonista komponenttia. Mikäli mahdollista, lisätään signaaliin myös dc-komponentti ja häiriöpiikkejä.
- 5) Mahdollisuuksien mukaan testataan erilaisia äärimmäisiä tilanteita simuloivia testisignaaleja, joita voidaan luoda MATLABilla, MATHCADilla tai muulla sopivalla ohjelmalla.

Koska taajuussuoja tarvitsee useamman jakson mittauksen ennen kuin mittaus on stabiloitunut, on suositeltavaa antaa suojareleen mitata ainakin 10 jaksoa (200 ms) ennen kuin taajuussignaali tapahtuu muutoksia ja/tai suojareleen mittaustarkkuutta arvioidaan. /10/

## 4 KESKIJÄNNITEVERKON KESKEYTYKSET JA VIAT

Valtaosa Suomen sähköjakelun keskeytyksistä johtuu keskijänniteverkon vioista. Suomessa keskijänniteverkkoa on yli 150 000 kilometriä. Siitä n. 68 % on avojoh-toa /17/. Eri johtotyyppien osuudet kilometreissä vuoden 2019 lopussa ovat taulu-kossa 3.

**Taulukko 3.** Johtoverkon tyyppien osuudet Suomessa. /17/

Johtoverkko 1 - 70 kV	Avojohto	Ilmakaapeli	Maakaapeli	Vesistökaap.	Yhteensä
Yhteensä *)	102969	370	46668	1410	151418

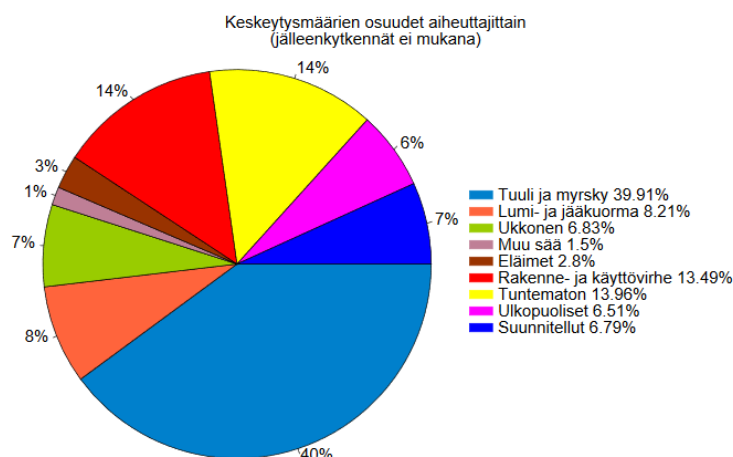
\*) Lähde: Energiavirasto 1.1.2019 ennakkotieto

Maaseudulla ja haja-asutusalueella tyypillisesti käytettävä avojohto on luontaisesti alttiimpi ulkoisten tekijöiden aiheuttamille vioille kuin kaupungissa suosittu maa-kaapelointi. Avojohto sijaitsee Suomessa usein metsässä, joten avojohdot ovat alttiina kaatuville puille, oksille sekä eläinten toimille. Avojohto on myös altis sääolo-suhteille, kuten ukkoselle ja lumen ja jään aiheuttamalle kuormalle. Avojohtoilla luonnonilmiöt ovatkin ylivoimaisesti suurin keskeytysten aiheuttaja, aiheuttaen 49 % keskeytyksistä, kun mukaan lasketaan myös kyseisen verkon suunnitellut keskeytykset (**Taulukko 4.**).

**Taulukko 4.** Keskeytysten aiheuttajien osuudet, vikoja kpl/100km. /17/

AIHEUTTAJA	Avojohto	PAS	Ilmakaapeli	Maakaapeli
Luonnonilmiöt yhteensä	8.27	3.64	23.26	0.06
Tekniset syyt yhteensä	1.36	1.59	6.98	0.56
Muut syyt yhteensä	1.44	0.31	13.18	0.72
Oman verkon vikakeskeytykset	11.06	5.54	43.41	1.35
Oman verkon suunnitellut keskeytykset	5.71	1.98	32.04	3.08
YHTEENSÄ	16.77	7.52	75.45	4.43

Asiakkaiden lukumäärään suhteutettuna (keskeytysmäärä per asiakas) yleisimmät keskeytysten aiheuttajat ovat tuuli ja myrsky (39,91 % keskeytyksistä), lumi- ja jääkuorma (8,21 %) sekä ukkonen (6,83 %). Nämä osuudet on esitetty kuvassa 16. /17/



**Kuva 16.** Keskijänniteverkon keskeytysten aiheuttajien osuudet. /17/

Sähkötoimituksen luotettavuuden parantamiseksi on verkossa lisätty maakaapelointia: esimerkiksi 2001 vuoden lopussa kaapelointiaste oli 8,6 % (**Taulukko 5.**) ja vuoden 2019 alussa puolestaan 30 % keskijännitejohtoverkosta on toteutettu maakaapeloinnilla (**Taulukko 3.**).

**Taulukko 5.** Keskijännitelinjojen 0,5 -70kV johtopituudet. /18/.

	Avo- johto	Riippu- johto	Maa- kaapeli	Vesistö- kaapeli	Yhteensä
Vuonna 1997	120930	416	11287	543	133176
Vuonna 2001	121331	377	11489	630	133827

Maakaapelointi parantaa sähkön toimitusvarmuutta huomattavasti, sillä vikatiheys on avojohdoilla noin kahdeksankertainen maakaapeliin verrattuna (11,06 kpl vuodessa/100 km avojohdo vs. 1,35 kpl vuodessa/100 km maakaapeli) /17/.

#### 4.1 Tavallisimmat viat

Tavallisimpia keskijänniteverkon vikoja ovat oiko- ja maasulut ja tässä työssä vikatapaukset rajataan niihin. Oikosulut ovat vaiheiden välisiä vikoja ilman maakosketusta, maasulussa vikavirtapiiriin kuuluu maa. Vika voi olla myös vaiheiden välinen oikosulku, jossa on myös maakosketus.

Myrskyt ja puiden lumikuormat aiheuttavat avojohdoilla oiko- ja maasulkuja. Puut ja oksat taipuvat, puut kaatuvat ja katkeavat oksat putoavat johtojen päälle. Pylväät voivat katketa tai sortua, esimerkiksi myrskyn tai lumi- ja jääkuorman aiheuttaman

kuormituksen vuoksi. Salamaniskut aiheuttavat verkkoon suuria ylijännitteitä ja johdovikoja, jotka puolestaan aiheuttavat maa- ja oikosulkuja. /3,4/ Kaapeloidussa verkossa puolestaan suurin osa vioista on maasulkuvikoja.

## 4.2 Vikojen vaikutus verkon taajuuteen

Viat saavat voimansiirtojärjestelmässä aikaan normaalista poikkeavia virtoja ja jännitteitä. Vian alussa vika aiheuttaa verkkoon muutosilmiön. Muutosilmiö vaimenee pois oman aikavakionsa mukaisesti. Tämän jälkeen vika on staattisessa tilassa, kunnes se poistuu tai se poistetaan. /4/

Oikosulku- ja maasulkuviat aiheuttavat muutoksia verkon jännitteiden aaltomuotoon, amplitudiin ja taajuuteen. Suojareleen taajuusmittaus mitataan yleensä verkon jännitteistä. Varsinkin vian alussa muutosilmiöt voivat olla niin suuria, että ne merkittävästi vaikuttavat jänniteisiin.

Oikosulussa verkon virta on suuri ja jännite pieni. Oikosulku voi olla kaksi- tai kolmevaiheinen /19/. Kolmivaiheinen vikavastukseton oikosulku johtaa useimmiten suurimpaan vikavirtaan. Vikavastuksen ollessa  $0 \Omega$  vaihejännitteet tippuvat vikapaikassa nolnaan. Riippuen oikosulun tapahtumahetkestä oikosulkuvirta on joko symmetrinen tai epäsymmetrinen. Vian syntyhetki vaikuttaa symmetrisyyteen. Jos vika syntyy hetkellä, jolloin jännitteen ja oikosulkupiirin impedanssin vaihekulmien erotus on  $0^\circ$  tai  $180^\circ$ , ei tasavirtakomponenttia esiinny ja oikosulkuvirta on symmetrinen. Epäsymmetrinen oikosulkuvirta, joka sisältää tasakomponentin, syntyy jos vika saa alkunsa hetkellä, jolloin jännitteen ja oikosulkupiirin impedanssin vaihekulmien erotus on  $\pm 90^\circ$ . Tasavirtakomponentti vaimenee eksponentiaalisesti alkuhetkestä lähtien nolnaan verkon aikavakion  $\tau$  mukaisesti.

$$\tau = \frac{X}{\omega R} \quad (8)$$

missä  $X$  = piirin oikosulkureaktanssi

$R$  = oikosulkuresistanssi

Oikosulkupiirin reaktanssin ja resistanssin suhde määrää tasavirtakomponentin vaimenemisajan. Mitä suurempi suhde on, sitä nopeammin tasavirtakomponentti vaimenee. Oikosulkuvirran suurin mahdollinen hetkellinen arvo on sysäysoikosulkuvirta, joka saavutetaan n.10 ms vian syntyhetkestä. Muutosilmiö verkossa on suurin, kun tasavirtakomponenttia esiintyy oikosulkuvirrassa suurin mahdollinen määrä. Oikosulkuvirran muutosilmiö aiheuttaa lyhyen poikkeaman niin pää- kuin vaihejännitteissäkin. /20/

Maasulussa vikaimpedanssin ollessa  $0\Omega$  viallisen vaiheen jännite laskee nolleen ja terveet vaihejännitteet kasvavat maan suhteen pääjännitteen suuruiseksi. Viallisen vaiheen maakapasitanssien kautta maahan kulkeva varausvirta on nolla, terveiden vaiheiden varausvirrat kiertävät muuntajien sekä generaattoreiden kautta vialliseen vaiheeseen ja vikakohtaan. Mikäli vikavastus on suurempi kuin  $0\Omega$ , varausvirta kulkee myös viallisen vaiheen maakapasitanssien kautta. /21/

Maasulku saa verkossa aikaan muutosilmiön, kun viallisen vaiheen maakapasitanssit purkautuvat ja terveiden vaiheiden kapasitanssit varautuvat. Viallisen vaiheen varauksen purkautuminen aiheuttaa verkkoon transientin: varaus purkautuu värähdellen sekä maasulkukohdan, että verkon kautta. Purkaustransientin värähtelyn taajuus voi olla 500 Hz – useita kHz:jä. Terveiden vaiheiden varausvirta kulkee muuntajan kautta vikakohtaan ja tämän varaustransientin taajuus jää matalammaksi, tyypillisesti välille 150...1000 Hz. Dominoiva komponentti kokonaistransientissa on tavallisesti terveiden vaiheiden (sis. taustaverkon) varaustransientti. Transientit ovat suurimmillaan, kun vika syntyy lähellä vioittuvan vaiheen vaihejännitteen hetkellistä huippuarvoa. Vikaresistanssi vaimentaa transientteja, samoin kuormituksella on muutosilmiöitä (alkutilan transientti) vaimentava vaikutus. /21/

Maasulun aiheuttama muutosilmiö näkyy transienttina vaihejännitteissä. Suurimmillaan se on, kun vikaresistanssi on mahdollisimman pieni, maasulku on lähellä syöttävää sähköasemaa, maasulku tapahtuu vaihejännitteen huippukohdassa ja verkon kapasitiivinen maasulkuvirta on suurimmillaan. Verkon vaiheiden välisiin pääjännitteisiin maasulku ei vaikuta merkittävästi. Sammutetussa ja maasta erotetussa verkossa maasulun alkutilan transientit ovat suuruusluokaltaan samat, jos verkot



muutoin kuin maadoitustavan osalta ovat toisiaan vastaavat. /21/ Sammutuskelalla ei siis ole vaikutusta vian alkuhetken purkaus- ja varaustransienttien suuruuteen, vaan ne ovat samanlaisia maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa.

## 5 KOESTUSDATAN GENEROINTI

Ali- ja ylitaajuussuojan toiminnan testausta varten luotiin reaalielämän keskijänniteverkkoa vastaavat verkkomallit Omicronin Relay SimTest -simulointiohjelmalla. Ennen simulointia suojaileasettelujen oikeellisuus ja suojaileiden oikea toiminta varmistettiin Omicronin Test Universe - ohjelman QuickCMC -moduulilla.

Asemien ja verkon lähtötiedot verkkomallien rakentamiseen saatiin Loiste Energia Oy:ltä /22/. Liitteessä 1 on Loiste Energialle lähetetty kyselylomake verkon tiedoista. Kaapelien ja avojohtojen myötä- ja nolaresistanssit ( $R1'$  ja  $R0'$ ) sekä -reaktanssit ( $X1'$  ja  $X0'$ ) saatiin PSCAD -ohjelmasta. Kuten myös myötä- ja nolla-verkon kapasitanssit ( $C1'$  ja  $C0'$ ). Nämä olisi ollut mahdollista myös laskea riittäväällä tarkkuudella, mutta kaikista kaapeleista ja avojohdoista ei löytynyt tarpeeksi rakenteellisia tietoja.

Simulointimalleiksi valittiin kaksi asemaa ja niiltä lähtevä keskijänniteverkko. Toinen malleista on isohko maaseutuaseama (Asema A) ja keskikokoinen kaupunkiasema (Asema C). Maaseutuasemalta lähtevä 20 kV:n verkko on pääosin avojohtoa. Kaupunkiasemalta lähtevä 10kV:n verkko on kaapeloitu.

### 5.1 Verkkomallien esittely

Kumpikin malleista, sekä maaseutu- että kaupunkisähköaseama ja -verkko, rakennettiin siten, että samalla asemamallilla voidaan testata maasta erotettu verkko ja sammutuskuristimen kautta maadoitettu verkko. Samoilla malleilla voidaan testata myös molemmat suojaileiden kytkennät: pääjännitteiden mittausta (3LN) tai vaihejännitteiden mittausta (2LL/3LL).

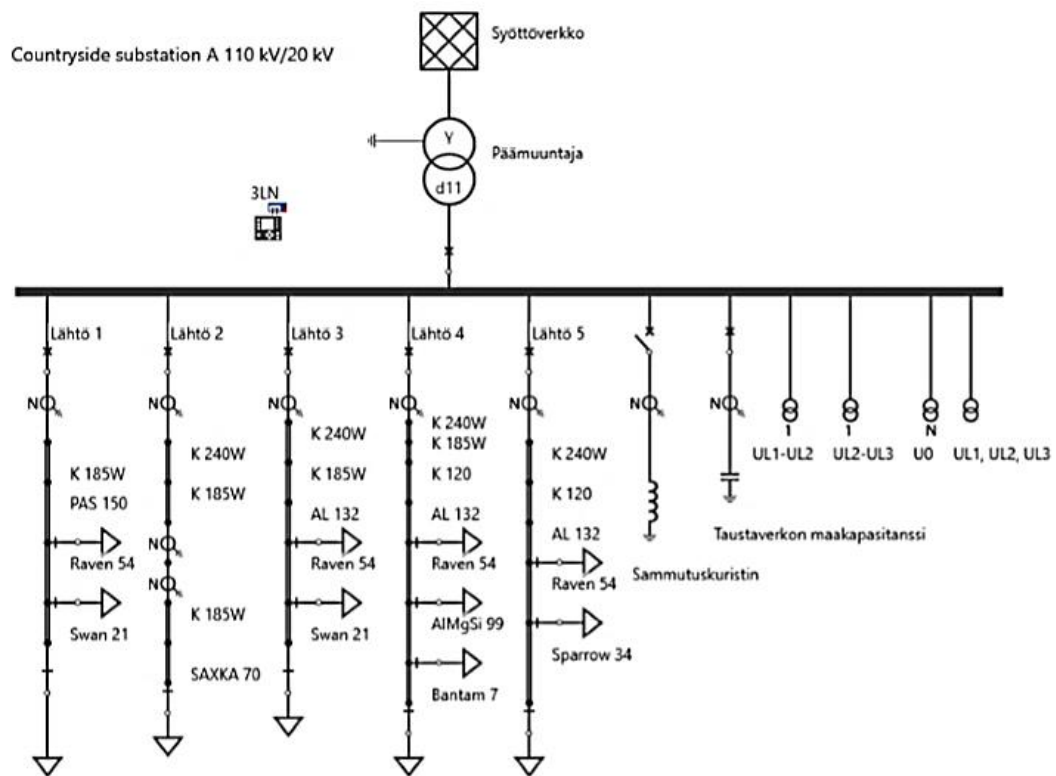
#### 5.1.1 Maaseutuaseama 20 kV sekaverkko

Taulukossa 6 on aseman syöttöverkon ja päämuuntajan tiedot. Asema vastaa Loiste Energian mukaan tyypillistä suomalaista maaseutuverkon sähköasemaa /22/.

**Taulukko 6.** Maaseutusähköasema syöttöverkon ja päämuuntajan tiedot.

<b>Asema A</b>		<b>Sähköasema maaseutu, 5 +1 lähtöä</b>	
<b>Syöttöverkko:</b>		<b>c</b>	<b>1</b> (SimTest c=1)
3-v oikosulkuvirta	<b>Ik</b>	<b>5.1</b>	<b>kA</b>
Kulma		<b>-89.90</b>	<b>°</b>
Oikosulkuteho	<b>Sk</b>	<b>971.68</b>	<b>MVA</b>
Pääjännite	<b>Us</b>	<b>110</b>	<b>kV</b>
<b>Päämuuntaja:</b>		<b>YNd11</b>	
Kytkenä			
Nimellisteho	<b>SN</b>	<b>25</b>	<b>MVA</b>
Kuormitushäviö	<b>PkN</b>	<b>90.01</b>	<b>kW</b>
Oikosulkuimpedanssi	<b>zk%</b>	<b>9.63</b>	<b>%</b>
Oikosulkuresistanssi	<b>rk%</b>	<b>0.36</b>	<b>%</b>
Nimell. ensiöjännite	<b>U1N</b>	<b>110</b>	<b>kV</b>
Nimell. toisiojännite	<b>U2N</b>	<b>20</b>	<b>kV</b>
Magnetointivirta	<b>Im%</b>	<b>0.4</b>	<b>%</b>

Kuvassa 17 on mallinnettu sähköasema ja verkko. Asemalla on todellisuudessa kuusi lähtöä, mutta kuudetta lähtöä käytetään vain varasyöttötilanteessa, joten sitä ei ole otettu malliin mukaan. Verkko on säteittäinen ja jokaisesta lähdöstä on mallinnettu osuus verkon ”kauimmaiseen pisteeseen”, joka sisältää kaikkia lähdön johto/kaapelityyppejä. Mallista pois jäävien johto- ja kaapeliosuuksien maakapasitanssit on laskettu yhteen ja mallinnettu erillisenä kondensaattorina verkkomalliin (”Taustaverkon maakapasitanssi”).



**Kuva 17.** Simulointimalli maaseutuasema 20 kV sekaverkko.

Taulukossa 7 on esitetty aseman lähtöjen kaapeli- ja johtotyypit, pituudet ja vikojen simuloinnissa tarvittavat parametrit. Jokainen lähtö on mallinnettu verkon kauim-paa vikakohtaan, eli lähdön arvioidun kauimmaisen haaran päähän. Asemalta lähtee ensin maakaapeli (Laji: "K"), jotka kytkeytyy runkoverkkoon ("R"). Runkoverkko koostuu erityyppisistä avojohdoista, jotka ovat kytketty sarjaan. Runkoverkon pi-sin samaa johtoa oleva pätkä on lähdöllä 4, 45,63 km Raven -johtoa. Runkoverkosta lähtevät 5-1 km pitkät haarat ("H").

Esimerkkinä kuvan 17 mallissa Lähtö 1 kostuu seuraavista sarjaan kytketyistä kaa-peleista ja avojohdoista:

- 1,43 km AHXAMK-W 185 – asemalta lähtevä maakaapeli
- 0,54 km PAS 150 päällystetty avojohdo, runkojohto
- 33,49 km ACSR 54/9 Raven päällystämätön avojohdo, runkojohto
- 5 km SWAN 3x21/4 Al päällystämätön avojohdo, haara

Lähdöltä 1 lähtevässä verkossa kaapeli ja runko on mallinnettu koko pituudeltaan. Haaroista on mallinnettu vain yksi haara. Muiden haarojen osalta mallissa on laskettu yhteen niiden maakapasitanssi, joka on 0,0846  $\mu\text{F}$  lähdön 1 osalta. Verkko-mallista pois jätettyjen haarojen johto-osuuksien yhteenlaskettu maakapasitanssi on 1,2025  $\mu\text{F}$  ("C0, Taustaverkko").

**Taulukko 7.** Maaseutuaseman kaapeli- ja johtotiedot lähdöittäin.

Laji	Tyyppi	Pituus/ km	Kuorma /MVA	R1' $\Omega/\text{km}$	X1' $\Omega/\text{km}$	R0' $\Omega/\text{km}$	X0' $\Omega/\text{km}$	C1' $\mu\text{F}/\text{km}$	C0' $\mu\text{F}/\text{km}$	Tausta- verkko C0 $\mu\text{F}$	Käytetty pituus/km
LÄHTÖ 1:	K AHXAMK-W 185	1.425		0.169	0.119	2.704	0.12	0.26	0.25		1.43
	R PAS 150	0.535	0.12	0.236	0.277	0.386	1.999	0.013	0.005		0.54
	R ACSR 54/9 Raven	33.494	0.49	0.535	0.368	0.685	1.899	0.01	0.0061		33.49
	H ACSR 34/6 Sparrow	12.684		0.847	0.383	0.997	1.913	0.0095	0.0061	0.0774	
	H SWAN 3x21/4 Al	1.178		1.35	0.398	1.5	1.928	0.0092	0.0061	0.0072	
	H SWAN 3x21/4 Al	14.294	0.01	1.35	0.398	1.5	1.928	0.0092	0.0061		5.00
			0.62							0.0846	40.45
LÄHTÖ 2:	K AHXAMK-W 3x240 + 70	3.248		0.13	0.116	2.08	1.117	0.3	0.29		3.25
	K AHXAMK-W 185	0.086		0.169	0.119	2.704	0.12	0.26	0.25		0.09
	H SAXKA 70	0.6675	1.25	0.446	0.14	0.596	1.896	0.18	0.17		0.67
			1.25								4.00
LÄHTÖ 3:	K AHXAMK-W 3x240 + 70	8.108		0.13	0.116	2.08	1.117	0.3	0.29		8.11
	K AHXAMK-W 185	2.175		0.169	0.119	2.704	0.12	0.26	0.25		2.18
	R Al 132	7.085	0.28	0.128	0.344	0.368	1.875	0.011	0.0061		7.09
	R ACSR 54/9 Raven	2.922	0.19	0.535	0.368	0.685	1.899	0.01	0.0061		2.92
	H Bantam 7/9 Al/Fe	2.9915		4.31	0.413	4.46	1.942	0.0088	0.0061	0.0182	
	H SWAN 3x21/4 Al	9.19	0.01	1.35	0.398	1.5	1.928	0.0092	0.0061		5.00
	H ACSR 34/6 Sparrow	2.897		0.847	0.383	0.997	1.913	0.0095	0.0061	0.0177	
			0.48							0.0359	25.29
LÄHTÖ 4:	K AHXAMK-W 3x240 + 70	0.3765		0.13	0.116	2.08	1.117	0.3	0.29		0.38
	K AHXAMK-W 185	4.973		0.169	0.119	2.704	0.12	0.26	0.25		4.97
	K AHMDMK 120	0.086		0.256	0.111	4.096	0.112	0.21	0.2		0.09
	R Al 132	2.7925	0.07	0.128	0.344	0.368	1.875	0.011	0.0061		2.79
	R ACSR 54/9 Raven	45.626	1.27	0.535	0.368	0.685	1.899	0.01	0.0061		45.63
	R AlMgSi 99	3.6345	0.07	0.332	0.354	0.482	1.885	0.01	0.0061		3.63
	H Bantam 7/9 Al/Fe	27.532	0.01	4.31	0.413	4.46	1.942	0.0088	0.0061		5.00
	H SWAN 3x21/4 Al	50.057		1.35	0.398	1.5	1.928	0.0092	0.0061	0.3053	
	H ACSR 34/6 Sparrow	66.2905		0.847	0.383	0.997	1.913	0.0095	0.0061	0.4044	
			1.42							0.7097	62.49
LÄHTÖ 5:	K AHXAMK-W 3x240 + 70	6.5015		0.13	0.116	2.08	1.117	0.3	0.29		6.50
	K AHMDMK 120	0.7805		0.256	0.111	4.096	0.112	0.21	0.2		0.78
	R Al 132	31.652	0.94	0.128	0.344	0.368	1.875	0.011	0.0061		31.65
	R ACSR 54/9 Raven	17.27	0.40	0.535	0.368	0.685	1.899	0.01	0.0061		17.27
	H Bantam 7/9 Al/Fe	23.2915		4.31	0.413	4.46	1.942	0.0088	0.0061	0.1421	
	H SWAN 3x21/4 Al	43.6255		1.35	0.398	1.5	1.928	0.0092	0.0061	0.2661	
	H ACSR 34/6 Sparrow	57.509	0.01	0.847	0.383	0.997	1.913	0.0095	0.0061		5.00
			1.35							0.4082	61.20
YHT.										1.2025	

Kunkin lähdön kokonaismaksimikuorma on jaettu taulukon 8 mukaan lähdön eri kohtiin. Taulukossa 8 on kaikkien lähtöjen maksimivirroista lasketut kokonaismaksimikuormat per lähtö.

**Taulukko 8.** Lähtöjen virroista lasketut kuormat

Kuorma	I max /A	S max /MVA	Cos phi
LÄHTÖ 1:	18	0.62	0.9
LÄHTÖ 2:	36	1.25	0.9
LÄHTÖ 3:	14	0.48	0.9
LÄHTÖ 4:	41	1.42	0.9
LÄHTÖ 5:	39	1.35	0.9
YHT.		5.13	

Kuvan 17 mallia on käytetty 3LN –mittausmoodissa olevien suojareleiden testaukseen. Kuvassa oikealla puolella olevat virtuaalijännitemuuntajat (”UL1-UL2”, ”UL2-UL3” ja ”UL1, UL2, UL3”) on kytketty simulointimallin virtuaalireleeseen (nimetty ”3LN” tässä tapauksessa, kun on testattu 3LN kytkettyä oikeaa suojarelettä). Virtuaalireleen mittaukset näkyvät simulointimallissa ja niiden avulla nähdään jännitteiden amplitudi, taajuus ja käyrämuoto ennen vikaa ja vian aikana.

Lähtöjen nollavirtamuuntajat, kuten myös nollajännitemuuntaja ”U0” ovat mallissa maasulkuvirtojen sekä nollajännitteen ja maasulkuvirran välisen kulman laske-  
miseksi maasta erotetussa verkossa. Suorassa maasulussa U0 on 11,624 kV kulmassa -151,31°. Maasulkuvirta on 116,81 A kulmassa 116,74°. Tarkistuksen vuoksi maasulkuvirta on laskettu myös koko mallinnetun keskijänniteverkon yhteenlaske-  
tun maakapasitanssin (10,52 µF) avulla kaavalla

$$I_e = \sqrt{3} * \omega * C_0 * U \quad (9)$$

missä  $I_e$  = koko aseman maasulkuvirta  
 $\omega$  = verkon kulmanopeus  $2 * \pi * 50$  Hz  
 $C_0$  = verkon maakapasitanssi  
 $U$  = pääjännite 20 kV

Laskemalla tulos on 114,53 A, joten laskemalla ja mallin antamalla arvolla päästään tarpeeksi lähelle tosiaan. Sammutuskuristimen nollaimpedanssin määrittämiseen käytetään mallin antaman maasulkuvirran loisivirran osuutta, 116,74 A, mikä vastaa verkon kapasitiivista reaktanssia. Maasulkuvirran pätövirta on 3,95 A.

Mallin arvojen antama maasulkuvirta 116,74 A poikkeaa Loiste Energian antamasta arvosta 108 A. Tämä selittyy ainakin osittain sillä, että kaikkien oikean aseman kaapeleiden tyyppien tietoja ei ollut saatavilla PSCADissa. Esimerkiksi alkuperäisten lähtötietojen ”W150 3x150” -kaapeli on korvattu paksumpijohtimisella kaapelilla AHXAMK-W 185. Eri kaapelityypeillä on eri maasulkuvirta. Toinen syy voi olla, että avojohtoverkon nollaimpedanssiin vaikuttaa maalaji. Maapiirin vastus vaihtelee maalajin mukaan ja sitä on vaikea tämän vuoksi laskea/arvioida tarkkaan.

Taulukossa 9 on esitetty kompensointiasteella 1 laskettu kelan nollaimpedanssi,  $Z_0$ , joka on  $296,89 \Omega$  kulmassa  $89,51^\circ$ .

**Taulukko 9.** Maaseutuverkko maasulkuvirta ja sammutuskela  $Z_0$ .

<b>Maasta erotettu verkko, maasulku</b>			
Uo	11624	V	-151.31°
Ie malli	116.81	A	116.75°
Ieq malli	116.74	A	
Iep malli	-3.95	A	
Ie laskettu	114.53	A	
Kompensoitava Ieq	116.74	A	
Haluttu Iep kelasta	1	A	
Kulma kela Ieq Iep	89.51	°	
<b>Sammutettu verkko, kompensointiaste 1</b>			
L	0.315	H	
R	2.54	$\Omega$	
xL	296.88	$\Omega$	mallissa 3 kela
Z0	2.54+296.88i	$\Omega$	
Z0	296.89	$\Omega$	
kulma	89.51	°	

Kelan induktanssi  $L$  on laskettu kaavalla

$$L = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{I_{EM} * 2 * \pi * 50} \quad (10)$$

missä  $I_{EM}$  = kompensoitava  $I_{eq}$

$U$  = pääjännite 20 kV

Sammutuskuristin on kuvassa 17 erotettu verkosta. Kytkemällä se kiinni samalla mallilla voidaan testata sammutetun verkon vikatilanteet. Sammutetun verkon kompensointiaste on mallissa 1, vaikka käytännössä sammutetuissa verkoissa

käytetään pientä vinoviritystä (5-10%). Suomessa viritys on tyypillisesti alikompensoinnin puolella /23/. Koetestatessa simulointimallilla taajuussuojan toimintaa kompensointiasteilla 0,95 ja 1,10 eroa verrattuna kompensointiasteeseen 1 ei havaittu.

### 5.1.2 Kaupunkiasema 10 kV kaapeliverkko

Kaupunkiasema on Suomen mittapuussa keskikokoinen kaupunkiverkon keskijänniteasema. Aseman alajännitepuoli on maaseutuverkosta poiketen 10 kV. Koko keskijänniteverkko on kaapeloitu.

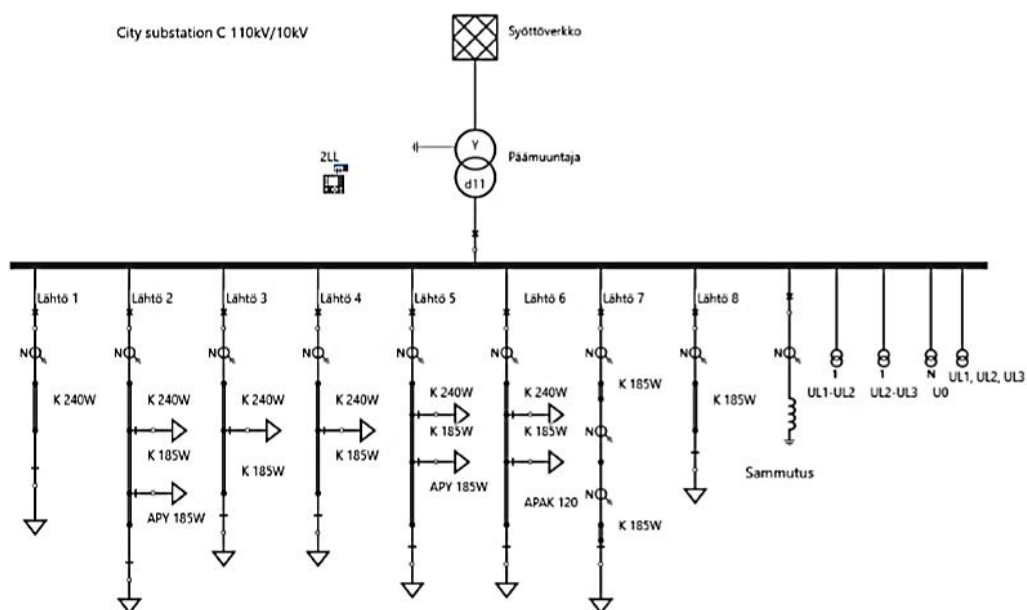
Taulukossa 10 on esitelty aseman syöttöverkon ja päämuuntajan tiedot.

**Taulukko 10.** Kaupunkisähköasema syöttöverkon ja päämuuntajan tiedot.

Asema C		Sähköasema kaupunki, 8 lähtöä	
<b>Syöttöverkko:</b>	c	1.1	(SimTest c=1)
	Ik	10.3	kA
		-89.90	°
	Sk	1962.41	MVA
	Us	110	kV
<b>Päämuuntaja:</b>		YNd11	
	SN	25	MVA
	PkN	56.65	kW
	zk%	9.63	%
	rk	0.23%	
	U1N	110	kV
	U2N	10	kV
	Im%	0.4	%

Kuvassa 18 on mallinnettu kaupunkisähköasema ja -verkko. Asemalla on kahdeksan lähtöä ja maaseutuverkosta poiketen ne on mallinnettu kokonaisuudessaan, kunkin lähdön kaapelit kaikki sarjassa peräkkäin. Taustaverkon maakapasitansseja ei ole siis tarve mallintaa erillisellä kondensaattorilla. Muutoin periaate kaupunkimallissa on sama, kuin maaseutuverkossa. Kuvan 18 malli on kaupunkiasema, jolla on tehty testejä 2LL/3LL -kytkennällä sammutetussa verkossa.





**Kuva 18.** Simulointimalli kaupunkiasema 10 kV kaapeliverkko.

Taulukossa 11 on esitetty aseman lähtöjen kaapeli- ja johtotyypit, pituudet ja vikojen simuloinnissa tarvittavat parametrit.

**Taulukko 11.** Kaupunkiaseman kaapelitiedot lähdöittäin.

Kaapeli	Tyyppi	Pituus/ Kuorma		R0'			C'0		IEM'			
		km	[MVA]	R1' Ω/km	X1' Ω/km	Ω/km	X0' Ω/km	C'1 μF/km	μF/km	A/km	IEM A	
LÄHTÖ 1:	1.1	AHXAMK-W 240 10 kV	1.076	0.398	0.13	0.107	2.08	0.108	0.43	0.42	2.4	2.5824
	Koko lähtö:		1.076	0.398								
LÄHTÖ 2:	2.1	AHXAMK-W 240 10 kV	0.958	0.126	0.13	0.107	2.08	0.108	0.43	0.42	2.4	2.2992
	2.2	AHXAMK-W 185 10 kV	0.841	0.111	0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	1.7661
	2.3.	APYAKMM 185	2.0212	0.266	0.173	0.097	1.038	0.098	0.6	0.59	3	6.0636
	Koko lähtö:		3.8202	0.502								
LÄHTÖ 3:	3.1	AHXAMK-W 240 10 kV	1.029	0.868	0.13	0.107	2.08	0.108	0.43	0.42	2.4	2.4696
	3.2	AHXAMK-W 185 10 kV	0.942	0.795	0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	1.9782
	Koko lähtö:		1.971	1.663								
LÄHTÖ 4:	4.1	AHXAMK-W 240 10 kV	0.02	0.009	0.13	0.107	2.08	0.108	0.43	0.42	2.4	0.048
	4.2	AHXAMK-W 185 10 kV	0.868	0.393	0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	1.8228
	4.3	AHXAMK-W 185 10 kV	0.528	0.239	0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	1.1088
	Koko lähtö:		1.416	0.641								
LÄHTÖ 5:	5.1	AHXAMK-W 240 10 kV	0.11	0.186	0.13	0.107	2.08	0.108	0.43	0.42	2.4	0.264
	5.2	AHXAMK-W 185 10 kV	0.063	0.107	0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	0.1323
	5.3	APYAKMM 185	0.861	1.457	0.173	0.097	1.038	0.098	0.6	0.59	3	2.583
	Koko lähtö:		1.034	1.749								
LÄHTÖ 6:	6.1	AHXAMK-W 240 10 kV	0.575	0.272	0.13	0.107	2.08	0.108	0.43	0.42	2.4	1.38
	6.2	AHXAMK-W 185 10 kV	1.64	0.776	0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	3.444
	6.3	AHXAMK-W 185 10 kV	0.67	0.317	0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	1.407
	6.4	APAK 120	0.373	0.176	0.258	0.076	4.128	0.077	0.41	0.22	1.2	0.4476
	Koko lähtö:		3.258	1.542								
LÄHTÖ 7:	7.1	AHXAMK-W 185 10 kV	1.678		0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	3.5238
	7.2	AHXAMK-W 185 10 kV	1.208		0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	2.5368
	Koko lähtö:		2.886	1.178								
LÄHTÖ 8:	8.1	AHXAMK-W 185 10 kV	1.082		0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	2.2722
	8.2	AHXAMK-W 185 10 kV	0.094		0.169	0.11	2.704	0.12	0.39	0.38	2.1	0.1974
	Koko lähtö:		1.176	0.779								
38.3268												

Tarkistuksen vuoksi kaapeleiden tuottama maasulkuvirta on myös laskettu yhteen. Se on 38,33 A, mikä on hyvin lähellä Loiste Energian antamaa koko aseman maasulkuvirtaa suorassa maasulussa, 38,9 A. Samalla tavalla, kuin maaseutuaseman tapauksessakin, kompensointi/sammutuskelan parametrien laskua varten käytetään kuitenkin simulointimallin arvoista laskettua maasulkuvirtaa. Lasketun maasulkuvirran loiskikomponentti on 37,55 A (**Taulukko 12.**).

**Taulukko 12.** Kaupunkiverkko maasulkuvirta ja sammutuskela Z0.

<b>Maasta erotettu verkko, maasulku</b>			
Uo	5683.2	V	-152.13°
Ie malli	37.57	A	115.72°
Ieq malli	37.55	A	
Iep malli	-1.41	A	
Ie laskettu	38.33	A	
<b>Kompensoitava Ieq 0,95</b>			
	35.67	A	
Haluttu Iep kelasta	10	A	
Kulma kela Ieq Iep	75.09	°	
<b>Sammutettu verkko, kompensointiaste 0,95</b>			
L	0.515	H	
R	122.73	Ω	
XL	485.37	Ω	mallissa 3 kela
Z0	122.73+485.37i	Ω	
Z0	500.65	Ω	
kulma	75.81	°	

Kaupunkiverkossa on käytetty kompensointiasteena 0,95. Tällöin kelan nollaimpe-danssi on Z0 on 500,65 Ω kulmassa 75,81°.

## 5.2 Suojareleasettelut

Taajuussuojan asettelu tehdään kunkin suojareleen omalla asetteluohjelmalla. Jo-kaisella suojareleellä on samanlainen taajuussuoja-asettelu. Suojareleissä käytetään alla olevia asetteluita:

- Ylitaajuussuoja  $f > 52$  Hz, toiminta-aika  $t = 0,1$ s
- Alitaajuussuoja  $f < 48,8$  Hz, toiminta-aika  $t = 0,1$ s

Kunkin suojareleen asetteluiden oikeellisuus ja suojareleen toimivuus varmistetaan ennen varsinaisen simuloinnin aloitusta Omicronin QuickCMC- ohjelmalla. Ku-hunkin suojareleeseen syötetään nimellisvaihejännitettä  $100/\sqrt{3}$ V sekä normaalitaa-juudella 50Hz, että taajuuksilla hieman yli 52 Hz ja hieman alle 48,8 Hz. Joissakin suojareleissä on mahdollista määrittää erikseen alijännitelukitus, joka estää taajuus-suojan toiminnan liian alhaisella nimellisjännitteellä. Tässä tapauksessa alijännit-teen rajaksi on määritetty 30%. Toisissa suojareleissä puolestaan toiminta liian al-haisella jännitteellä on estetty automaattisesti.

Kukin suojarele on aseteltu siten, että taajuussuojan havahtuessa tai antaessa lau-kaisukäskyn suojareleeseen tallentuu häiriötallenne.

### 5.3 Testitapauksien esittely

Simulointimalleihin generoidut testitapaukset ovat erilaisia oiko- ja maasulkuvi-koja. Testitapauksien rajoittamiseksi ideana on simuloida verkon jännitteissä tapah-tuvien muutosilmiöiden kannalta simulointimallien verkoissa pahimpia ja lievimpiä vikatilanteita. Simulointimallien testitapauksissa muuttujia ovat

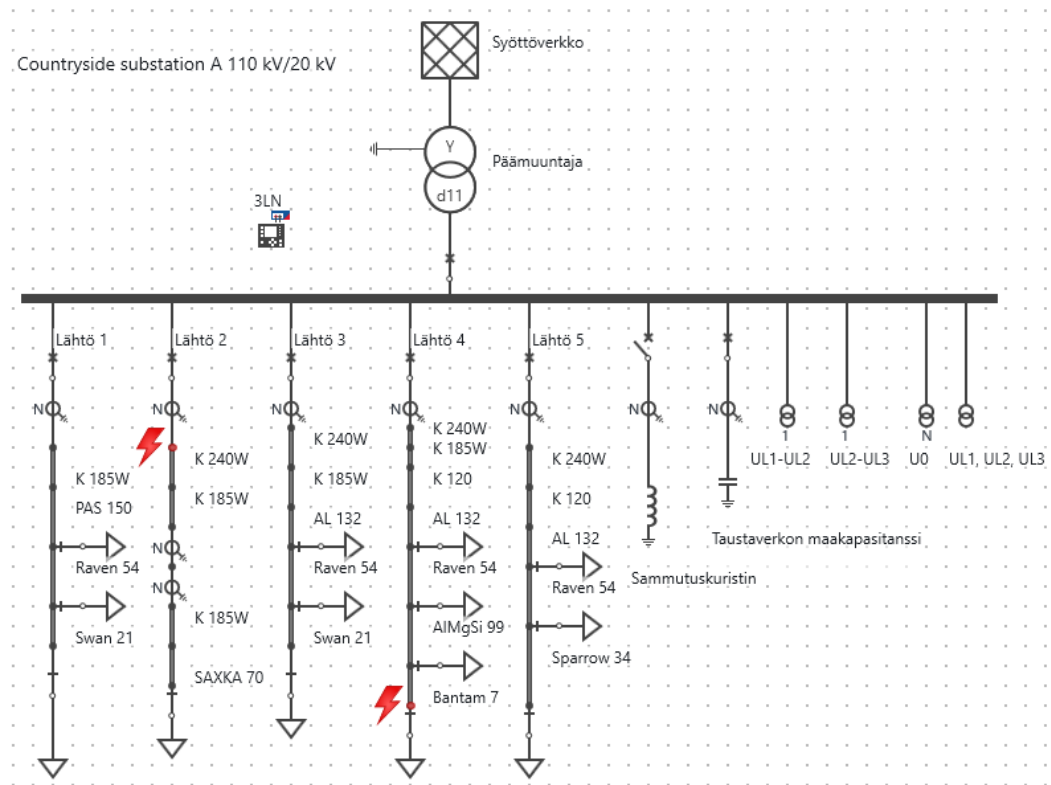
- vikatyyppi
- vian sijainti
- verkon jännitteen kulman arvo vikahetkellä (käytetään tästä eteenpäin nimi-tystä jännitekulma)
- vikaresistanssi
- kuorman suuruus vikahetkellä

Vikatyyppejä ovat kaksivaiheiset oikosulut sekä yksi-, kaksi- ja kolmivaiheiset maasulut. Kolmivaiheisessa oikosulussa verkon vaihejännitteet tippuvat nolnaan ja tällöin taajuussuojan toiminta on estetty (alijännite).

Molemmissa malleissa vikapaikat on määritetty seuraavin kriteerein:

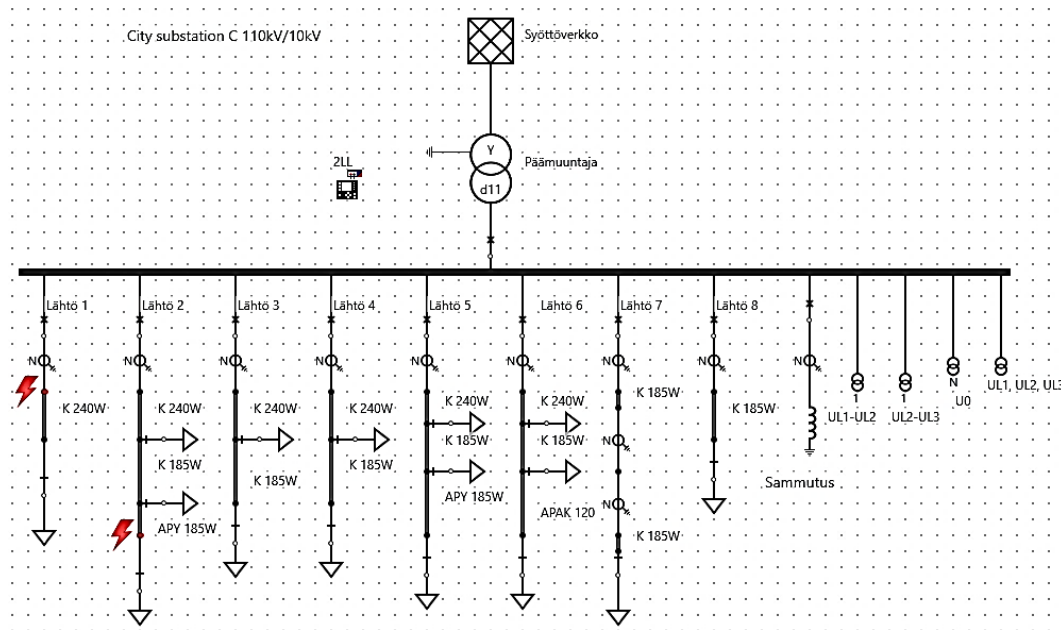
- Vikapaikka lyhyimmällä lähdön ensimmäisellä kaapeliosuudella
- Vikapaikka verkon kauimmaisessa päässä eli pisimmän lähdön päädyssä

Maaseutuverkossa vikapaikat ovat kuvan 19 mukaisissa paikoissa: Lyhimmän läh-dön, lähdön 2, ensimmäisellä kaapeliosuudella (1,43 km AHXAMK-W 185) ja pi-simmän lähdön, lähdön 4 päässä (kokonaispituus 62,49 km, päädyssä avojohto Ban-tam 7/9 Al/Fe 5 km). Lähdöllä 2 vikapaikan sijaintia vaihdellaan testauksen aikana, kohdat ovat 0%, 50% ja 100% ensimmäisestä kaapeliosuudesta.



**Kuva 19.** Maaseutuverkon vikapaikat.

Kaupunkiverkossa viat ovat puolestaan kuvan 20 mukaisissa paikoissa: Lyhim-  
mällä lähdöllä, lähtö 1 (vain 1,08 km AHXAMK-W 240 10 kV) ja pisimmän läh-  
dön, lähtö 2 päässä (kokonaispituus 3,8 km. päädyssä APYAKMM 185 2,02 km).  
Lähdöllä 1 vian paikkaa vaihdellaan samoin, kuin maaseutuverkossa: 0%, 50% ja  
100% kaapelin pituudesta.



**Kuva 20.** Kaupunkiverkon vikapaikat.

Jännitekulman arvot vikahetkellä ovat  $0^\circ$ ,  $33^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $57^\circ$  ja  $90^\circ$ . Vikaresistanssin arvot ovat  $0 \Omega$ ,  $100 \Omega$  ja  $1000 \Omega$ . Kuorman suuruutta vaihdellaan 0- 100% välillä. Tosin normaalikäytössä kuorma ei koskaan ole lähellä 0%, mutta tässä tapauksessa halutaan nähdä, onko kuorman suuruudella vaikutusta taajuussuojan toimintaan vikatilanteessa.

Maalaisverkossa testitapaukset ovat samat niin maasta erotetussa, kuin sammute-tussa verkossa, molemmilla 2LL/3LL - ja 3LN -kytkennöillä. Sama pätee myös kaupunkiverkkoon.

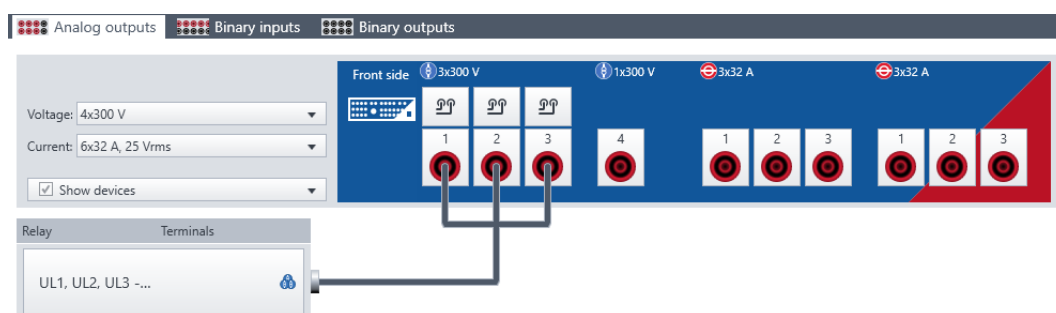
## 6 TAAJUUSSUOJIENTEN KOESTUS

Suojareleet on kytketty Omicron CMC 356 – syöttölähteeseen, jota käytetään suojareleiden koestuksessa. CMC 356 on kytketty PC:hen ja PC:llä oleva Relay SimTest -ohjelma generoi simulointimallien vikatilanteita vastaavat jännitteet, jotka CMC 356 syöttää suojareleille. Jokaisesta suojareleestä kytketään lähtöreleet (binäärilähdöt) Omicron 356:n binäärituloihin. Tiedot binääritulosten tilasta rekisteröityvät Relay SimTest – ohjelman simuloinnin tuloksiin.

### 6.1 Koestuskytkentä

Kaikki suojareleet testataan yhtäaikaan, jännitteet rinnankytkettyinä. Suojareleet testataan kahdella eri kytkennällä, kolmeen vaihejännitteen mittaus 3LN ja kahden tai kolmen pääjännitteen mittaus 2LL/3LL. 3LN -kytkennässä taajuussuojan toiminta perustuu vaihejännitteisiin ja 2LL/3LL -kytkennässä pääjännitteisiin. Esimerkki suojareleen ja Omicronin 3LN-kytkennästä on kuvassa 8. Esimerkki 3LL-kytkennästä on kuvassa 7.

Relay SimTest -ohjelmassa kytkentä esitetään kuvan 21 mukaisella tavalla, mikä on hieman harhaanjohtava.

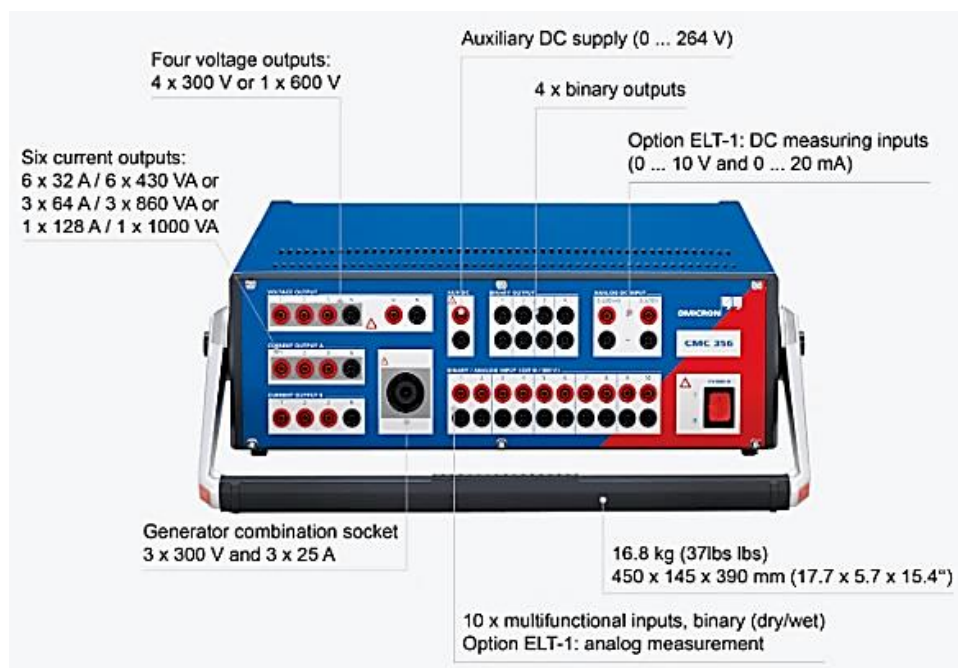


**Kuva 21.** Omicron Relay SimTest jännitekytkentä.

Käytännössä Omicronin ja suojareleen kytkentä tehdään noudattaen 3LN - tai 2LL/3LL – kytkentää. Kuvassa 22 Omicron CMC 356 -syöttölähteen vasemmassa ylänurkassa on jännitekanavat U1, U2 ja U3 sekä maa (N).

Suojareleiden binäärilähdöt kytketään alarivissä oleviin binäärituloihin (kuvassa 22 ”10 x multifunctional inputs, binary”), joita Omicronin tässä mallissa on 10 kpl.

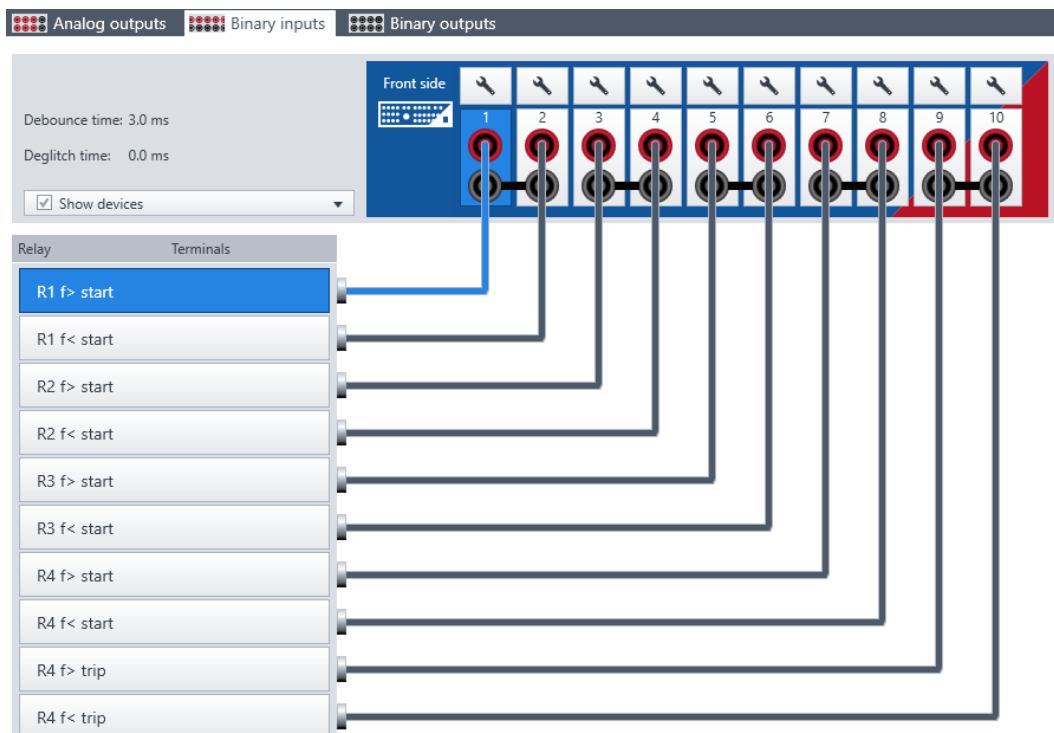
Binäärilähdöt on suojarileissä aseteltu muuttamaan kosketintilansa, mikäli taajuus-suoja aktivoituu.



**Kuva 22.** Omicron CMC 356. /24/

Kuvassa 23 on esimerkki binääritulojen kytkennästä Relay SimTest -ohjelmassa. R1, R2, R3 ja R4 ovat testattavia suojarileitä. Yhden suojarileen, R4, osalta huomattiin toisista poikkeavaa toimintaa jo koetestauksien aikana, joten sen osalta kytkettiin yli- ja alitaajuussuojan startin (aktivoitumisen) lisäksi binääritulot taajuus-suojan laukaisukäskyille (Omicronin binääritulot 9 ja 10, R4 f> trip ja R4 f< trip).

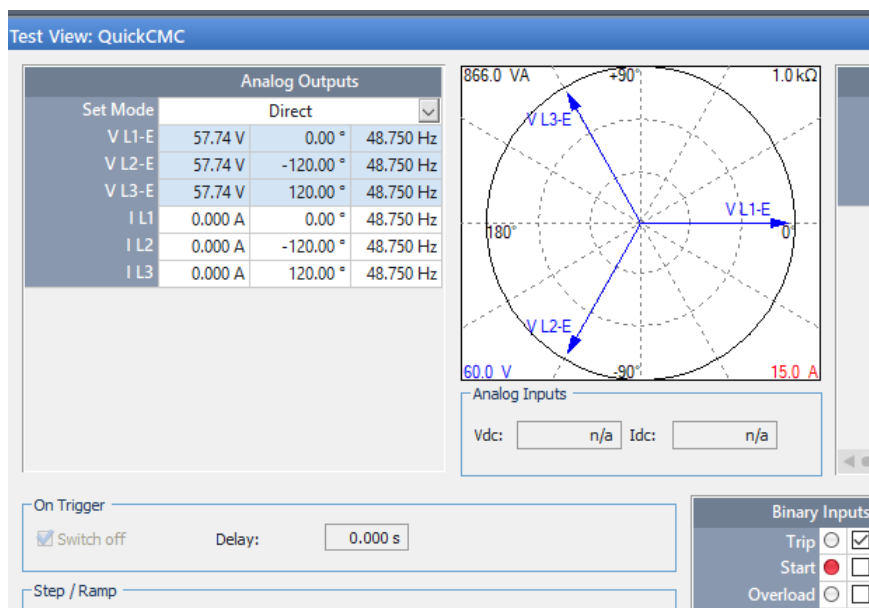




**Kuva 23.** Omicron Relay SimTest binääritulojen kytkennät.

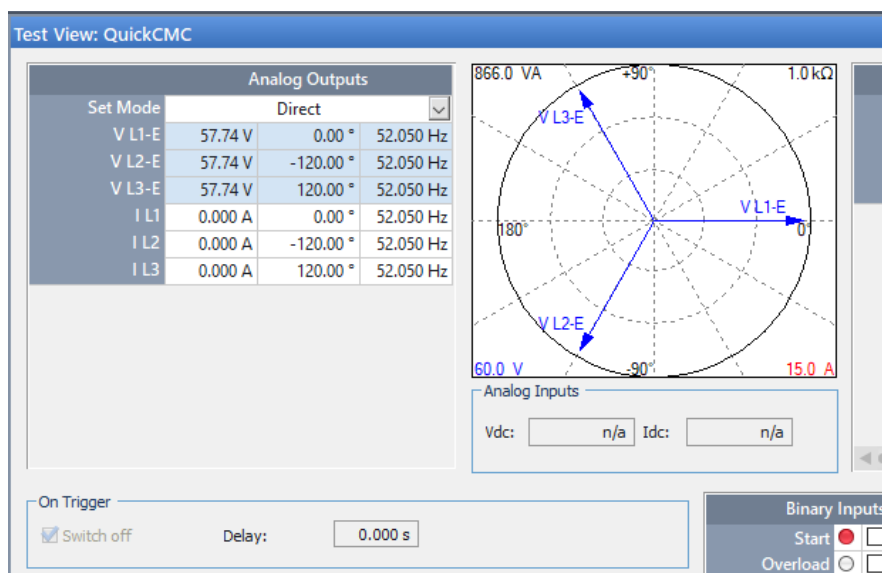
## 6.2 Koestusprosessi

Ennen varsinaisen testauksen alkua jokaisen suojarleen jännitemittauksen ja taa-juussuojan asetteluiden oikeellisuus todennetaan. Suojareleeseen syötetään ensin normaalitaajuudella 50 Hz suojarleen jännitemuuntajan nimellisen jännitteen mukaisesti vaihejännitettä, eli  $100/\sqrt{3}\text{V}$ . Suojareleestä tarkistetaan joko näytöltä tai sen asetteluohjelmasta, että suojarle mittaa verkon jännitteen amplitudin (pääjännitteen 20/10kV ja vaihejännitteet 11 547/5774 V) ja vaiheiden väliset kulmat ( $120^\circ$ ) oikein. Tämän jälkeen syötetään suojarleelle nimellisvaihejännitettä taajuudella 48,7 Hz (**Kuva 24.**), eli hieman alle alitaajuussuojan asettelun. Samalla tarkistetaan, että Omicronin binäärituloon tulee tieto suojan havahtumisesta (kuvassa 24 oikeassa alanurkassa ”Binary Inputs” -kohdassa ”Start” on punainen).



**Kuva 24.** Omicron Test Universe QuickCMC alitaajuus.

Ylitaajuussuojan asettelut todetaan oikeaksi syöttämällä nimellistä vaihejännitettä ylitaajuudella 52,05 Hz. Samalla tarkistetaan myös, että binääritulo aktivoituu ylitaajuussuojan havahtumisesta (kuvassa 25 "Binary Inputs Start" on punainen).



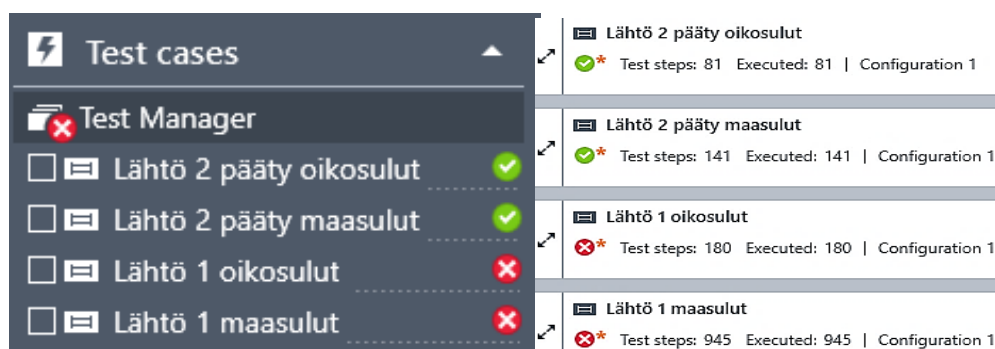
**Kuva 25.** Omicron Test Universe QuickCMC ylitaajuus.

Simulointi tehdään yksi simulointimalli kerrallaan, kaupunki ja maaseutuverkkojen asemat maasta erotettuina ja sammutettuina, kytkennöillä 3LN ja 2LL/3LL. Eli yhteensä erillisiä "testimalleja" on:

$$\begin{array}{l} \text{Maaseutuasema A} \\ \text{Kaupunkiasema C} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Maasta erotettu verkko} \\ \text{Sammutettu verkko} \end{array} \times \frac{3\text{LN}}{2\text{LL}/3\text{LL}} = 8 \text{ testimallia}$$

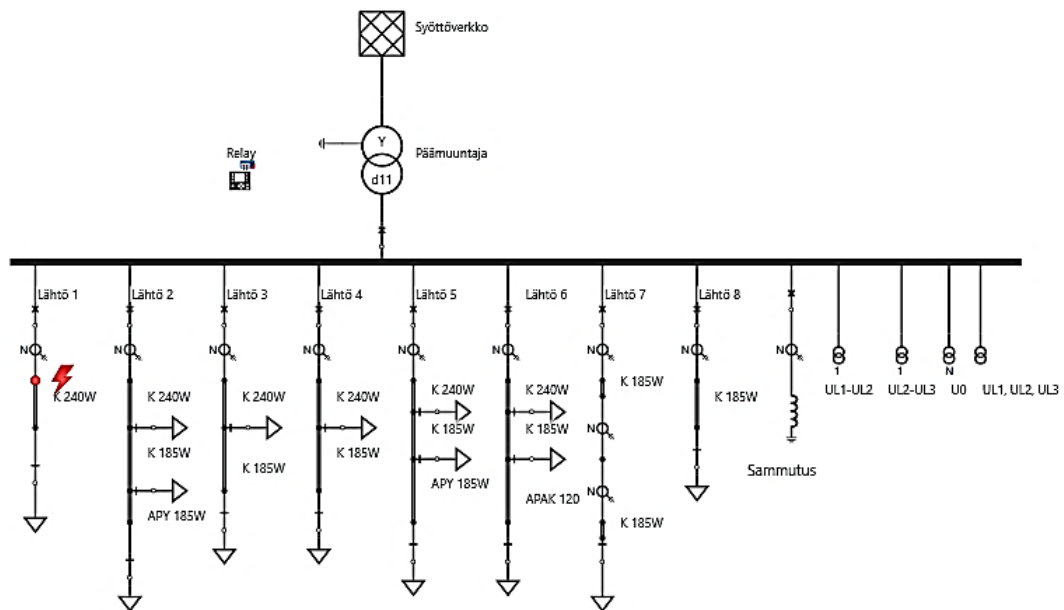
Maaseutuverkon aseman neljässä testimallissa on kaikkiaan eri muuttujien (ks. kappale 5.3) kombinaatioiden vuoksi yhteensä  $4 \times 1042 = 4168$  testitapausta. Kaupunkiverkon neljässä testimallissa testitapauksia on  $4 \times 1347 = 5388$  testitapausta, sillä kaupunkiverkossa kuormaa muutellaan hieman enemmän. Testimallit ajetaan automaattiajolla ja yhden mallin kaikkien testitapausten ajamiseen menee tehokkaalla PC:llä n. 30-60 minuuttia.

Yksi testimalli sisältää lähdön ja vian mukaan ryhmitellyt testisetit. Kuvassa 26 on esimerkki kaupunkiverkon testimallin 4 settiä: Lähdön 2 päädy oiko- ja maasulut sekä lähdön 1 oiko- ja maasulut. Vihreä merkki testisetin oikealla vieressä tarkoittaa, ettei ko. ajossa ole tapahtunut taajuussuojan havahtumista eikä laukaisua. Punainen puolestaan sitä, että jokin taajuussuoja on havahtunut (start) tai antanut laukaisukäskyn (trip).



**Kuva 26.** Kaupunkiverkon testisetit.

Näiden testisettien sisällä on puolestaan eri vaihteleva määrä testitapauksia kappaleen 5.3 muuttujien mukaisesti. Kuvan 26 kaupunkiverkon testiseteissä on yhteensä  $81+141+180+945=1347$  kpl testitapauksia. Kuvassa 27 on testisetin ”Lähtö 1 oikosulut” simulointimalli.



**Kuva 27.** Kaupunkiverkko Lähtö 1 oikosulut.

Esimerkkinä tehdyistä testitapauksista on kuvassa 28 alla, testitapaukset 1-4 lähdön 1 oikosuluista. Vika näissä testitapauksissa on aivan kaapelin K 240W alussa, ”fault location 0%”. Jännitekulma, ”inception angle”, on  $0^\circ$  ja  $33^\circ$ . Vikatyyppi on oikosulku vaiheiden L1 ja L2 välillä, vikaresistanssi  $0 \Omega$ .

Lähtö 1 oikosulut	Line fault 1 - Fault locati...	Line fault 1 - Inception angle	Line fault 1 - Fault type	Line fault 1 - Fault resistance (RF)	Kuorma 1 - Perc...
1 <span>✓</span> Passed	0.00 %	0.00 °	L1-L2	0.0000 $\Omega$	0.00 %
2 <span>✓</span> Passed	0.00 %	0.00 °	L1-L2	0.0000 $\Omega$	50.00 %
3 <span>✓</span> Passed	0.00 %	33.00 °	L1-L2	0.0000 $\Omega$	50.00 %
4 <span>✗</span> Failed	0.00 %	33.00 °	L1-L2	0.0000 $\Omega$	100.00 %

**Kuva 28.** Kaupunkiverkko Lähtö 1 oikosulut testitapauksia.

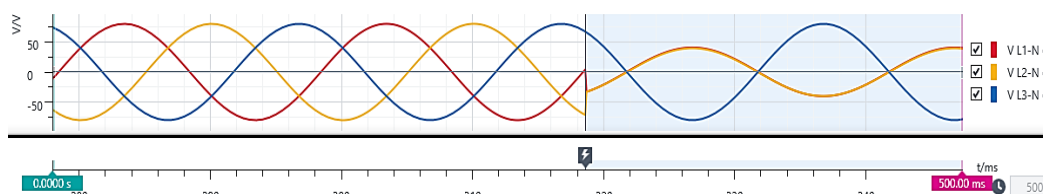
Testitapauksissa 1-3 minkään suojarleen taajuussuoja ei ole aktivoitunut, testitapauksessa 4 yksi suojarleistä on aktivoitunut.

R1 f> start	R1 f< start	R2 f> start	R2 f< start	R3 f> start	R3 f< start	R4 f> start	R4 f< start	R4 f> trip	R4 f< trip
+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞
+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞
+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞
+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	+∞	37.5 ms	+∞	+∞	+∞

**Kuva 29.** R4 f> havahtumisaika vian synnyn jälkeen.

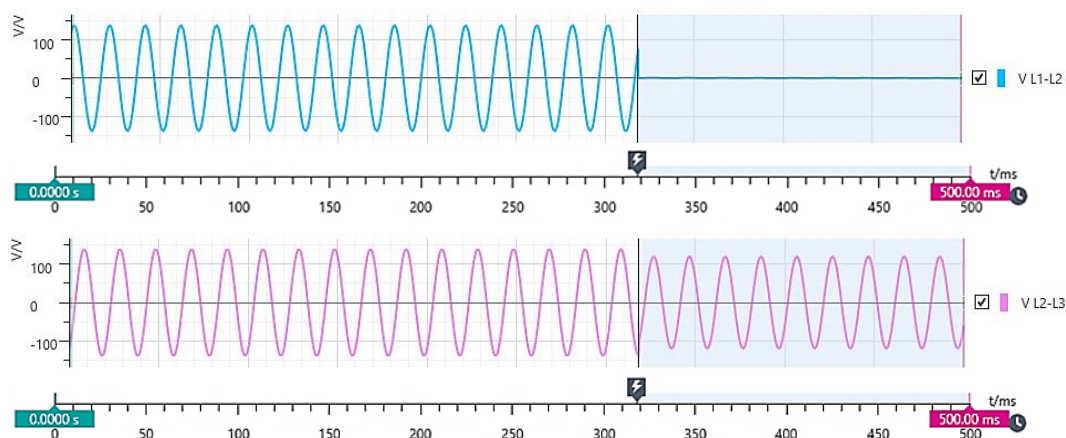
Kuvassa 29 nähdään, että suojarole R4:n ylitaajuussuoja on havahtunut 37,5 ms vian synnyn jälkeen. Se ei ole kuitenkaan antanut laukaisukäskyä, vaan suoja on palautunut ennen toiminta-ajan 0,1 s umpeuduttua.

Jokaisesta testitapauksesta generoituu simulointiohjelmassa kuvaaja virtuaalireleellä ”mitatuista” pää- ja vaihejännitteistä. Testitapauksessa 4 vaihejännitteet ovat kuvan 30 mukaiset.



**Kuva 30.** Relay SimTestin virtuaalireleen mitaamat vaihejännitteet

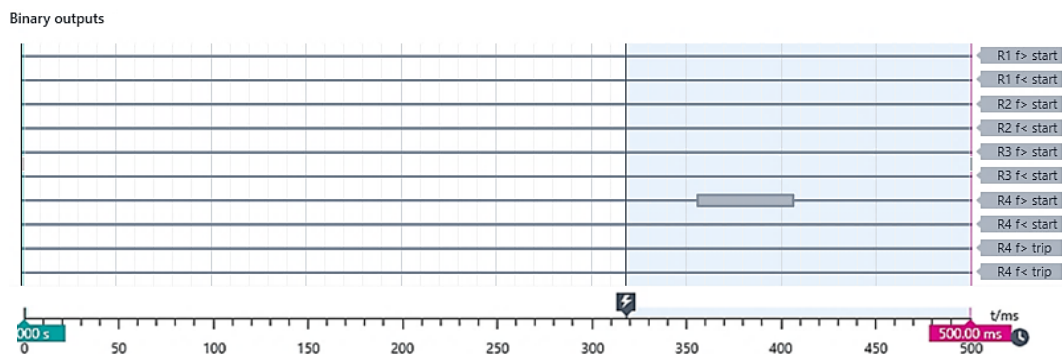
Vika tapahtuu ajanhetkellä 318,60 ms, testitapauksen aloitusajankohta on 0s. Pääjännitteen UL1-UL2 (VL1-VL2) sekä UL2-UL3 (VL2-VL3) kuvaajat näkyvät kuvassa 31.



**Kuva 31.** Relay SimTest virtuaalireleen mitaamat pääjännitteet.

Oikosulkuvian L1-L2 vuoksi pääjännite UL1-UL2 menee nolleen ja UL2-UL3 pienenee hieman. Vika jää kaikissa tapauksissa jatkuvaan tilaan aina testisetin loppuun saakka, eli ajanhetkeen 500 ms saakka. Vika on siis aktiivinen tämän testitapauksen osalta 181,40 ms. Todellisuudessa oikosulkusuojaus asettelusta ja katkaisijan toiminta-ajasta (35-100 ms /11/) riippuen saattaisi laukaista vian tämän ajan sisällä pois.

Myös testattavien suojureiden binäärilähtöjen muutokset rekisteröityvät simulointiohjelmaan, tästä esimerkki kuvassa 32.



**Kuva 32.** Relay SimTest suojureleen R4 binäärilähdön aktivoituminen.

Suojareleen R4 havahtumista vastaava binäärilähtö on aktivoitunut 37,5 ms vian syntymisajankohdasta. Ja ollut aktiivinen n. 47,5 ms. Tarkempaa mittausta havah-  
tumisajan suhteen en simulointiohjelmaan rakentanut (se ei välttämättä ole edes mahdollista). Tarkan ajan saa tarvittaessa suojureleestä.

Kunkin testimallin testisettien ajamisen jälkeen testin tulokset tallennetaan Exceliin, jokaisen mallin kustakin testisetistä generoituu oma Excelinsä. Jos taajuussuoja on aktivoitunut jossakin suojureleessä ajon aikana, niin häiriötallenteet tallennetaan tästä suojureleestä tietokoneelle.

## 7 TULOKSET

Simuloinnin tuloksista tehdään yhteenveto Exceliin. Analysointi tapahtuu Excelin, simulointiohjelman jännitekuvaajien ja suojaareleiden tapahtumalistojen ja häiriötilanteiden avulla. Esimerkki simuloinnin Excel -yhteenvedosta on liitteessä 2.

Testauksen tulos on, että neljästä testatusta suojaareleesta R1-R4 yhdessä (R4), ylitaajuussuoja havahtuu osassa vikatilanteista. Havahtuminen kestää suojaareleen mukaan pisimmillään 80% toiminta-ajasta, eli 0,08s, ennen kuin suojapalautuu. Kertaakaan R4:n ylitaajuussuoja ei anna laukaisukäskyä. Muut suojaareleet R1-R3 eivät havahdu. Alitaajuussuojien osalta havahtumista ei tapahdu minkään suojaareleen osalta.

Havahtuminen tarkalleen tietyssä tilanteessa ei ole johdonmukaisesti toistettavaa. Kun havahtumisen aiheuttavat testitapaukset poimitaan erilleen yhden mallin testisetistä ja ajetaan vain ne uudelleen, R4 ei välttämättä havahdu niissä kaikissa ja voi olla havahtumatta jopa isossa osassa niitä. Ja ajettaessa uudelleen yhden mallin kaikki testisetit havahtumista voi tapahtua sekä samoissa testitapauksissa, joissa R4 havahtui aiemmin, että muissakin testitapauksissa, joissa havahtumista ei tapahtunut aiemmin. Mutta jännitteiden käyrämuoto on näissä uusissa havahtumisissa samantyyppinen kuin aiemmin tapahtuneessa havahtumisessa. Kokonaisuudessaan havahtumisia on kuitenkin määrällisesti lähes sama määrä, kuin aiemmassa ajossa. Tässä tarkemmin käsitelty tulokset ovat ensimmäisestä testiajasta.

### 7.1 Verkkomallin ja suojaarelekytkennän vaikutus

Verkkomallin ominaisuuksilla ja suojaareleen kytkennällä on vaikutusta havahtumisten määrään. Kytkennässä 2LL/3LL ei tapahdu havahtumisia maasuluissa lainkaan, kaikki havahtumiset tapahtuvat oikosuluissa. Tästä syystä 2LL/3LL-kytkennässä havahtumia on huomattavasti vähemmän, kun 3LN – kytkennässä (**Taulukko 13.**). Eniten havahtumisia on tapahtunut 3LN- kytkennässä sammutetussa kaupunkiverkossa (3,12% mallin testitapauksista), vähiten havahtumisia on 2LL/3LL -kytkennässä maasta erotetussa kaupunkiverkossa (0,15%).

**Taulukko 13.** Kaikki havahtumiset testitapauksissa

	2LL/3LL ja 3LN	2LL/3LL		3LN	
Asema	testitapaukset /kpl	R4 f> start /kpl	Osuus %	R4 f> start /kpl	Osuus %
Maaseutu A maasta erotettu	1042	7	0.67%	17	1.63%
Maaseutu A sammutettu	1042	5	0.48%	14	1.34%
Kaupunki C maasta erotettu	1347	2	0.15%	39	2.90%
Kaupunki C sammutettu	1347	5	0.37%	42	3.12%

Verkkomallin osalta havahtumisia tapahtuu 3LN -kytkennässä suhteellisesti enemmän kaupunki- kuin maaseutuverkossa (sekä sammutettu, että maasta erotettu verkko, taulukossa 14). Oikosulkujen osalta tähän todennäköisesti vaikuttaa kaupunkiverkon suurempi oikosulkuvirta, jolloin oikosulussa muutosilmiö on suurempi kuin maaseutuverkossa. Verkon tasavirtakomponentin aikavakiolla  $\tau$  (kaava 8), jonka suuruuteen kaapeli/sekaverkon reaktanssin ja resistanssin suhde vaikuttaa, ei pitäisi olla merkitystä, sillä havahtuminen johtuu aivan vian alussa tapahtuvien muutosilmiöiden vuoksi. Avojohtoilla  $\tau$  on normaalisti suurempi, kun kaapeleilla, eli tasavirtakomponentti vaimenisi nopeammin seka- kuin kaapeliverkossa.

Maasulussa vikavirran suuruuteen vaikuttavat verkon maadoitustapa, galvaanisesti yhteen kytkeytyneen verkon suuruus ja verkon rakenne. Kaapelin maakapasitanssi on paljon suurempi, kuin avojohdon (ks. taulukot 7 ja 11, C'0), joten kaapeli tuottaa suuremman maasulkuvirran. Havahtumisen kannalta olennaista on se, että jännitteeseen vaikuttava muutosilmiökin on suurempi, koska maakapasitanssin suuruus vaikuttaa maasulun alkuvaiheen transienttiin. Tämä näkyy myös tuloksissa, sillä 3LN -kytkennässä kaupunkiverkossa havahtumisia tapahtuu suhteellisesti 1,7 -kertaisesti (maasta erotettu) ja 2,4 -kertaisesti (sammutettu verkko) maaseutuverkkoon nähden (**Taulukko 14.**).

2LL/3LL -kytkennässä puolestaan maaseutuverkossa havahtumisia on enemmän kuin kaupunkiverkossa. Havahtumiset tapahtuvat vain oikosuluissa. Tämä on ristiriidassa 3LN – kytkennän tulosten kanssa. Tässä voi olla kyse sattumasta, sillä havahtumismääriä 2LL/3LL -kytkennässä on vähemmän ja kuten aiemmin mainittu, huojuntaa on testituloksissa eri testikertojen välillä, joten tulosta ei voida pitää kovin luotettavana.



**Taulukko 14.** Havahtumiset eri verkkomalleissa ja kytkennöissä

Kytkenä 3LN			Vikatyyppi							
Asema		Vikapaikka	L1-L2	Osuus%	L1-L2-N	Osuus%	L2-N	Osuus %	L3-N	Osuus %
Maaseutu A maasta erotettu	3LN	Lähtö 2 alkupää	4	0.38%	1	0.10%	9	0.86%	3	0.29%
Maaseutu A maasta erotettu	3LN	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaupunki C maasta erotettu	3LN	Lähtö 1	11	0.82%	2	0.15%	9	0.67%	8	0.59%
Kaupunki C maasta erotettu	3LN	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	6	0.45%	3	0.22%

Maaseutu A sammutettu	3LN	Lähtö 2 alkupää	4	0.38%	-	-	6	0.58%	2	0.19%
Maaseutu A sammutettu	3LN	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	2	0.19%	-	-
Kaupunki C sammutettu	3LN	Lähtö 1	9	0.67%	2	0.15%	13	0.97%	11	0.82%
Kaupunki C sammutettu	3LN	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	4	0.30%	3	0.22%

Kytkenä 2LL/3LL			Vikatyyppi							
Asema		Vikapaikka	L1-L2	Osuus%	L1-L2-N	Osuus%	L2-N	Osuus %	L3-N	Osuus %
Maaseutu A maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 2 alkupää	4	0.38%	3	0.29%	-	-	-	-
Maaseutu A maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaupunki C maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 1	1	0.07%	1	0.07%	-	-	-	-
Kaupunki C maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-

Maaseutu A sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 2 alkupää	1	0.10%	4	0.38%	-	-	-	-
Maaseutu A sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaupunki C sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 1	4	0.30%	1	0.10%	-	-	-	-
Kaupunki C sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-

Maadoitustavalla on vaikutusta vain maasulkujen kannalta, eli 3LN -kytkennässä. Maasta erotettuna maaseutuverkossa on hieman enemmän havahtumisia, kuin sammutetussa maaseutuverkossa. Kaupunkiverkossa havahtumisia on hieman enemmän puolestaan sammutetussa verkossa.

Vaikka sammutuskela pienentääkin maasulkuvirtaa, se ei vaikuta nopeisiin vian alkuhetken transientti-ilmiöihin niitä pienentävästi. Suojareleen taajuusmittaukseen vaikuttavat jännitteen taajuusmuutokset ovat suurimmillaan vian alussa ja täten oikein tehdyllä sammutuksella ei pitäisi olla vaikutusta taajuussuojan toimintaan.

### 7.1.1 Kytkenä 2LL/3LL

2LL/3LL -kytkennässä R4 havahtuu vain lyhyiden lähtöjen L1-L2 oikosuluissa ja L1-L2-N oikosulussa, jossa on maakosketus (**Taulukko 15.**). Pelkässä maasulussa muutos pääjännitteissä ei ole tarpeeksi suuri, jotta havahtuminen tapahtuisi 2LL/3LL -kytkennässä. Tästä syystä 2LL/3LL -kytkennässä on kokonaisuudessaan havahtumisia paljon vähemmän, kuin 3LN -kytkennässä.

### Taulukko 15. Havahtumiset 2LL/3LL -kytkennässä

#### KytKentä 2LL/3LL

Asema	Vikapaikka	Vikatyyppi			
		L1-L2	L1-L2-N	L2-N	L3-N
Maaseutu A maasta erotettu	2LL/3LL Lähtö 2 alkupää	4	3	-	-
Maaseutu A sammutettu	2LL/3LL Lähtö 2 alkupää	1	4	-	-

Kaupunki C maasta erotettu	2LL/3LL Lähtö 1	1	1	-	-
Kaupunki C sammutettu	2LL/3LL Lähtö 1	4	1	-	-

Kuvassa 33 on esimerkki vaihejännitteistä maasulusta L2-N maasta erotetun maaseutuverkon lähdöllä 2 (testitapaus 7). 3LN -kytkennässä R4 on havahtunut vaihejännitteiden muutoksesta.

**KytKentä 3LN**

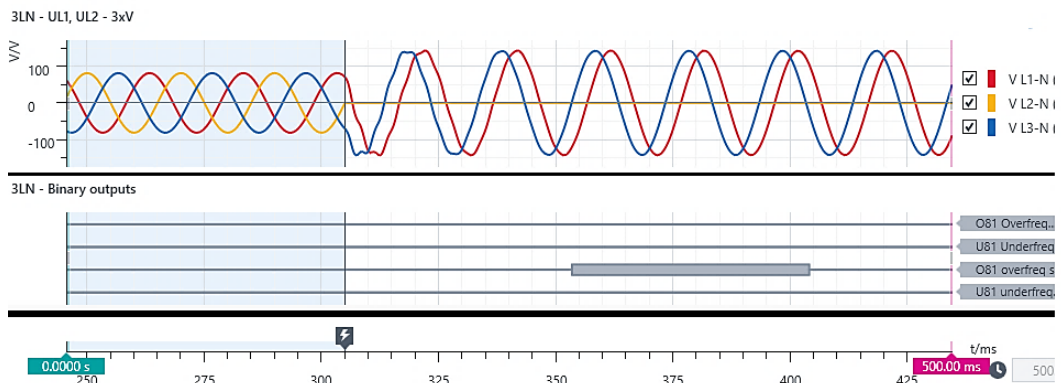
Kyt Kentä 3LN			Vikatyyppi							
Asema	Vikapaikka		L1-L2	Osuus%	L1-L2-N	Osuus%	L2-N	Osuus %	L3-N	Osuus %
Maaseutu A maasta erotettu	3LN	Lähtö 2 alkupää	4	0.38%	1	0.10%	9	0.86%	3	0.29%
Maaseutu A maasta erotettu	3LN	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaupunki C maasta erotettu	3LN	Lähtö 1	11	0.82%	2	0.15%	9	0.67%	8	0.59%
Kaupunki C maasta erotettu	3LN	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	6	0.45%	3	0.22%

Maaseutu A sammutettu	3LN	Lähtö 2 alkupää	4	0.38%	-	-	6	0.58%	2	0.19%
Maaseutu A sammutettu	3LN	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	2	0.19%	-	-
Kaupunki C sammutettu	3LN	Lähtö 1	9	0.67%	2	0.15%	13	0.97%	11	0.82%
Kaupunki C sammutettu	3LN	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	4	0.30%	3	0.22%

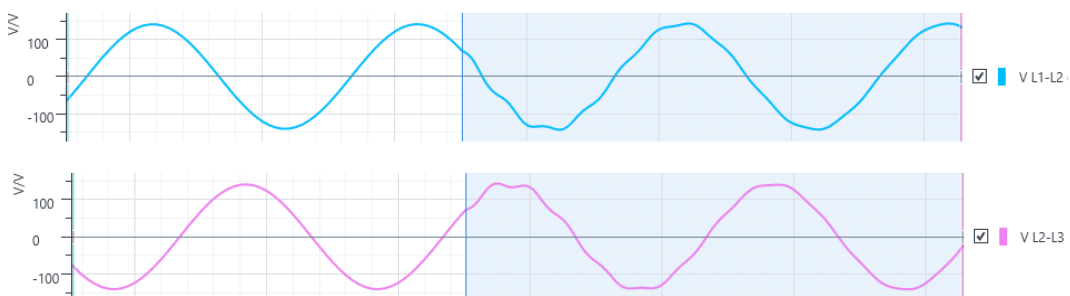
**KytKentä 2LL/3LL**

Kytkentä 2LL/3LL			Vikatyyppi							
Asema	Vikapaikka		L1-L2	Osuus%	L1-L2-N	Osuus%	L2-N	Osuus %	L3-N	Osuus %
Maaseutu A maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 2 alkupää	4	0.38%	3	0.29%	-	-	-	-
Maaseutu A maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaupunki C maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 1	1	0.07%	1	0.07%	-	-	-	-
Kaupunki C maasta erotettu	2LL/3LL	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-

Maaseutu A sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 2 alkupää	1	0.10%	4	0.38%	-	-	-	-
Maaseutu A sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 4 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaupunki C sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 1	4	0.30%	1	0.10%	-	-	-	-
Kaupunki C sammutettu	2LL/3LL	Lähtö 2 pääty	-	-	-	-	-	-	-	-

**Kuva 33.** Maaseutuverkko maasta erotettu 3LN, L2-N lähtö 2.

Kuvassa 34 puolestaan nähdään sama testitapaus 2LL/3LL -kytkennällä. Kun R4 mittaa pääjännitteitä 2LL/3LL, havahtumista ei tule.

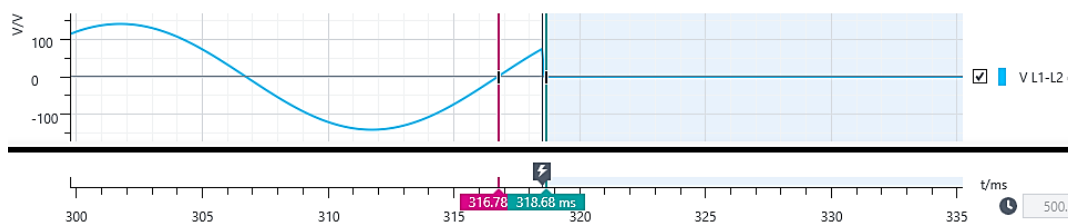


**Kuva 34.** Maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL, L2-N lähtö 2.

Vikakohdan jälkeen (kuvassa 34 vikakohta on pystyviiva) pääjännitteissä on vain hieman muutosta käyrämuodossa.

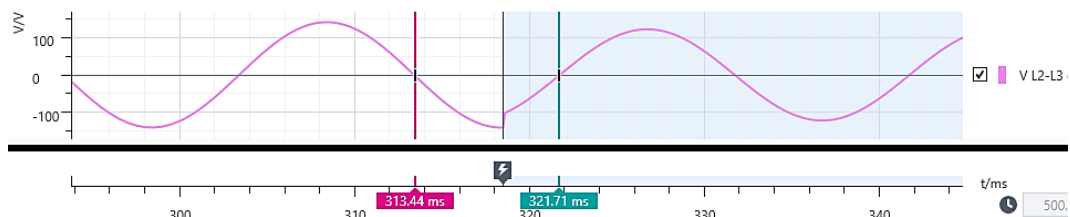
Kuvassa 35 esimerkkinä R4:n havahtumistapauksesta 2LL/3LL -kytkennässä L1-L2 oikosulussa pääjännite VL1-L2 on yhden puolijakson ajan liian lyhyt, 1,9 ms.

Substation	Neutral Earthing	Fault location	VT conn	No. Test case	Status	Fault location [%]	Inception angle [°]	Fault type	Fault resistance (RF) [Ω]	Load [%]	810 f> start [s]
Countryside A	Isolated	beg of 2	2LL	25	Failed	0	33	L1-L2	0	100	0.0414



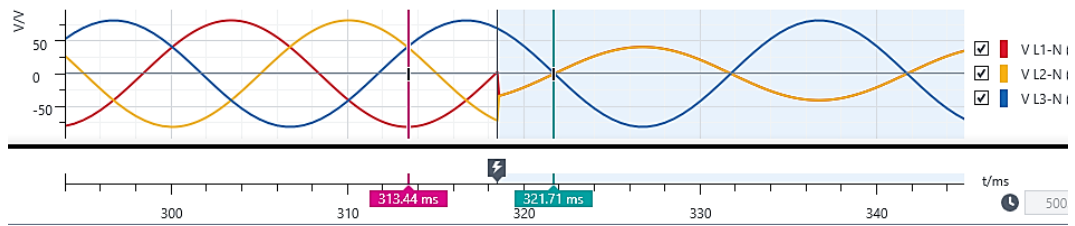
**Kuva 35.** VL1-L2 Maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL, testitapaus 25.

Samassa testitapauksessa pääjännite VL2-L3 on myös 1 puolijakson liian lyhyt, 8,27 ms (nähdään kuvassa 36).



**Kuva 36.** VL2-L3 Maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL, testitapaus 25.

Molemmissa pääjännitteissä VL1-L2 ja VL2-L3 on siis 1 puolijakson ajan ylitaajuutta. VL1-L2 menee nolnaan volttiin heti lyhyen puolijakson jälkeen, kuten nähdään kuvassa 35. Alitaajuusblokin voisi ajatella estävän suojan toiminta, jos jokin mittausta jännitteistä on alle asetellun/vakioarvon.



**Kuva 37.** Vaihejännitteet maaseutuverkko maasta erotettu 2LL/3LL, testitapaus 25.

Nyt näin ei tapahdu VL1-L2:n mennessä nolaksi, vaan suoja havahtuu 41,4 ms vian synnyn jälkeen. Vaihejännitteet ovat kuitenkin kaikki yli 30% nimellisjännitteestä (kuten kuvassa 37 nähdään). Logiikkana alijänniteblokille voi olla se, että blokkausta ei tapahdu, jos jokin/jotkin mitatuista pääjännitteistä ovat yli 30% nimellisestä. Näin on tässä testitapauksessa. Tai sitten R4 suojareleessä sallitaan havahtuminen alijännitteellä, mutta laukaisukäskyn toiminta on estetty.

### 7.1.2 KytKentä 3LN

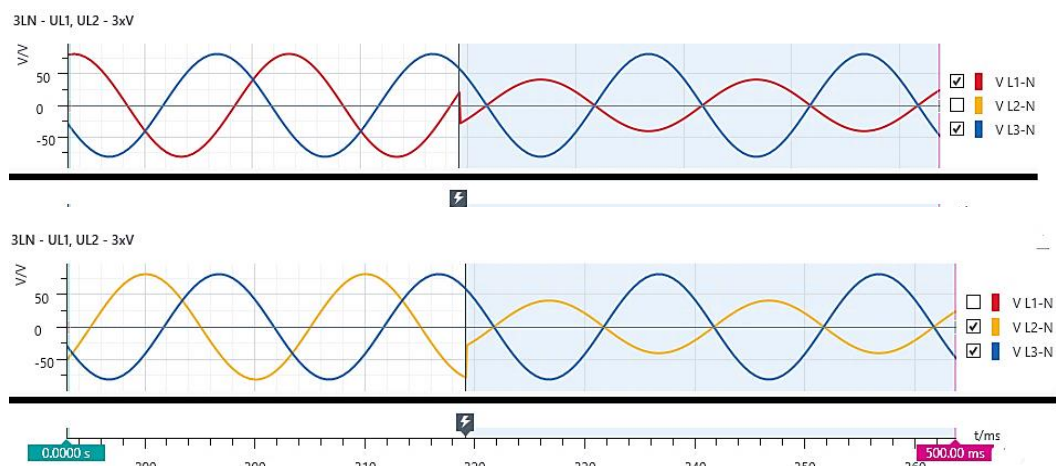
3LN -kytkennöissä R4 havahtuu maaseutu- ja kaupunkiverkossa sekä oikosulkuttä maasulkuvioissa. Oikosulkuviat ovat vaiheiden 1 ja 2 välinen oikosulku (L1-L2) ja sama oikosulku maakosketuksella (L1-L2-N). Maasulkuviat ovat vaiheen 2 (L2-N) ja vaiheen 3 maasulkuvika (L3-N). Taulukossa 16 on esitetty vikojen määrät tyypeittäin.

**Taulukko 16.** Havahtumiset 3LN -kytkennässä

#### KytKentä 3LN

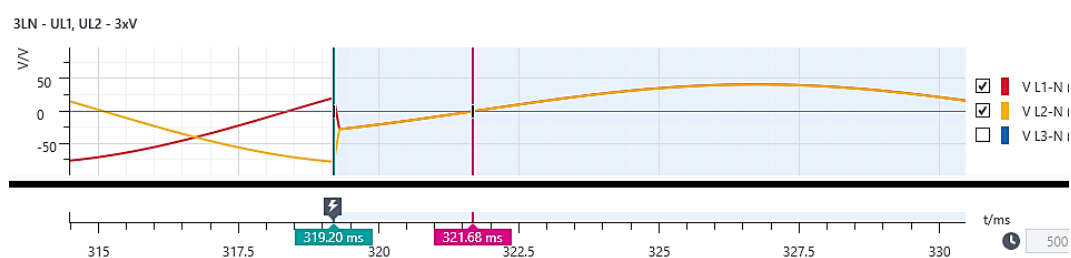
Asema		Vikapaikka	Vikatyyppi			
			L1-L2	L1-L2-N	L2-N	L3-N
Maaseutu A maasta erotettu	3LN	Lähtö 2 alkupää	4	1	9	3
Maaseutu A sammutettu	3LN	Lähtö 2 alkupää	4	-	6	2
Maaseutu A sammutettu	3LN	Lähtö 4 pääty	-	-	2	-
Kaupunki C maasta erotettu	3LN	Lähtö 1	11	2	9	8
Kaupunki C maasta erotettu	3LN	Lähtö 2 pääty	-	-	6	3
Kaupunki C sammutettu	3LN	Lähtö 1	9	2	13	11
Kaupunki C sammutettu	3LN	Lähtö 2 pääty	-	-	4	3

Havahtumiseen vaikuttavat vaihejännitteiden taajuus ja käyrämuoto. Kuvassa 38 nähdään L1-L2 oikosulun (jännitekulma  $45^\circ$ , vikavastus  $0 \Omega$ ) vaikutus vaihejännitteiden VL1-N (punainen) ja VL2-N (keltainen) käyrämuotoon. Vika aiheuttaa hetkellisen vaihejännitteiden VL1-N ja VL2-N taajuuden nousun. VL1-N taajuus on normaalia korkeampi yhden jakson ajan, VL2-N on korkeampi vain puolen jakson ajan.



**Kuva 38.** Vaihejännitteet maaseutuverkko maasta erotettu 3LN, testitapaus 49.

Molemmat ilmiöt ovat ohi 2,48 ms vian synnystä. Kuvassa 39 näkyy vian syntyhetki 319,20 ms ja VL1-N ja VL2-N jatkavat uudelleen normaalia taajuutta ajanhetkestä 321,68 ms, tosin molemmat samassa kulmassa. R4 havahtuu vasta 46,7 ms vian synnyn jälkeen, eli 44,2 ms sen jälkeen, kun ylitaajuus on poistunut.



**Kuva 39.** VL1-N ja VL2-N maaseutuverkko maasta erotettu 3LN, testitapaus 49.

Toisaalta suojariele, jossa on zero-crossing algoritmiin perustuva taajuuslaskenta voi luultavasti todeta taajuuden palanneen normaaliksi vasta aikaisintaan yhden puolijakson jälkeen tai ehkäpä vasta yhden kokonaisen jakson jälkeen. Mutta

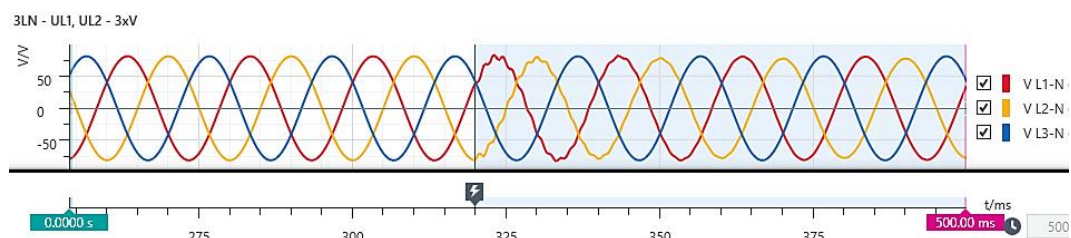
tällöinkin aikaa on kulunut viasta vain  $2,48 + 10 / 20\text{ms} = 12,48/22,48 \text{ ms}$ . Algoritmista/suojan toiminnassa on todennäköisesti viivettä myös mittausten keskiarvoistamisesta, eli tarvitaan useita puolijaksoja/jaksoja, joista otetaan keskiarvo ja tämä myös selittäisi suojan toiminnan viiveen.

Huomioitavaa on, että L2-L3 ja L3-L1 välisissä oikosuluissa vaihejännitteet käyttäytyvät samalla tavalla, kuin L1-L2 oikosulussa, mutta R4:n havahtumisia ei tule näissä oikosuluissa lainkaan (ei myöskään 2LL/3LL -kytkennässä). Eli oikosuluissa vaihejännitteiden osalta vain vaihejännitteen VL1-N poikkeava käyrämuoto aiheuttaa havahtumisen tai vaaditaan kahden tietyn vaihejännitteen ylitaajuus tietyllä aikajaksolla.

## 7.2 Vikapaikan, vikavastuksen ja kuorman vaikutus

Vikapaikka vaikuttaa huomattavasti oikosuluissa muutosilmiön suuruuteen ja täten myös havahtumiseen. Kaikki havahtumisen aiheuttavat oikosulut ovat kummassakin verkossa lyhyimmän lähdöllä, lähellä asemaa. Syynä tähän on se, että pisimmän päädyn oikosulussa oikosulkuvirta on pienempi kuin lähdön alussa johtuen vikaa edeltävien kaapeleiden/johtojen impedanssista. Mitä pienempi oikosulkuvirta, sitä pienempi muutosilmiö sekä verkon virrassa ja jännitteissä.

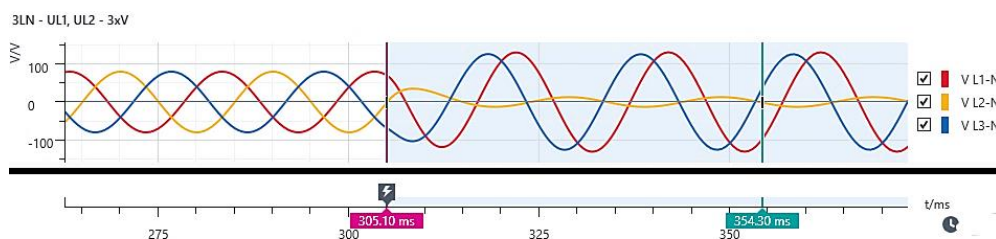
Alla kuvassa 40 on esimerkki maaseutuverkon lähdön 4 päädyn L1-L2 oikosulun vaikutuksesta vaihejännitteisiin, jännitekulma  $57^\circ$  ja vikaresistanssi  $0^\circ$ . Vaihejännitteiden VL1-N ja VL2-N käyrämuodot ”kihartuvat” hieman, mutta muutoksella ei ole taajuusmittauksen kannalta merkitystä.



**Kuva 40.** Vaihejännitteet, L1-L2 oikosulku pitkän lähdön päädyssä.

Maasulku puolestaan aiheuttaa havahtumisia niin lyhyellä lähdöllä, kuin pitkänkin lähdön päässä. Myös maakosketuksessa olevan johtimen oma impedanssi vaikuttaa maasulkuvirran suuruuteen, joten varsinkin maaseutuverkon pisimmän lähdön päässä olevassa maasulkuviassa havahtumisia tapahtuu paljon vähemmän kuin lyhyen lähdön alkupäässä.

Vikavastuksen suuruudella on iso merkitys.  $100\ \Omega$ :n vikavastuksella on ainoastaan 2 havahtumistapausta, muut havahtumiset tapahtuvat vikavastuksella  $0\ \Omega$ .  $1000\ \Omega$ :n vikavastuksella havahtumisia ei enää tule. Molemmat  $100\ \Omega$ :n vikavastuksen havahtumistapaukset ovat maasulku L2-N sammutetussa kaupunkiverkossa, jännitekulma  $0^\circ$ . Toinen on aivan lähdön 1 alussa, toinen puolella välissä tätä lyhyttä lähtöä. Kuvassa 41 on toinen näistä tapauksista. 305,10 ms on vian syntymisaika, 354,30 ms on R4:n havahtumisaika.



**Kuva 41.** Havahtuminen vikavastuksella  $100\ \Omega$ .

Tässä tapauksessa maasulusta johtuen vaihejännitteen L1-N yksi puolijakso on normaalista poikkeava, 8,95 ms (ylitaajuus). L3-N yksi puolijakso on 11,3 ms (alitaajuus) ja L2-N on ylitaajuudella viasta lähtien koko vian ajan. L2-N taajuus kuvasta 41 laskettuna on n. 54.2 Hz. Havahtuminen tässä tapauksessa viittaa siihen, että jo yhden puolijakson ylitaajuus vaihejännitteessä L1-N riittää, kunhan se on riittävän suuri. Tai sitten tarvitaan ylitaajuus kahdessa jännitteessä, kuten todettiin jo aiemmin oikosulkujen yhteydessä.

Testitapauksien eri muuttujista kuorman muutokset eivät vaikuta jännitteiden käyrämuotoihin vian aikana ja havahtumisia tulee kaikilla kuormilla. Teorian mukaan kuormituksella on maasuluissa alkutilan transienttia vaimentava vaikutus, mutta ehkäpä kuorman ja sen muutosten pitäisi olla suurempi. Toinen, joskin huono



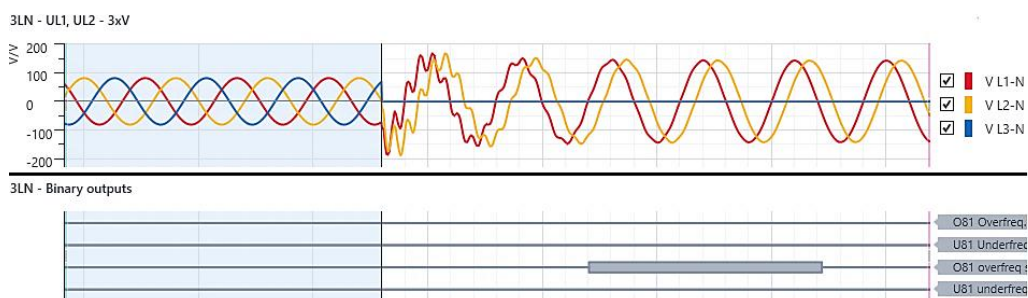
vaihtoehto on se, ettei simulointiohjelma pysty mallintamaan alkutilan transientteja tarpeeksi tarkasti.

### 7.3 Jännitekulman vaikutus

Vian syntyhetken jännitekulma vaikuttaa myös jännitteiden käyrämuotoon. Maasu-  
luissa havahtumisia tapahtuu kaikilla jännitekulmilla ( $0^\circ$ ,  $33^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $57^\circ$  ja  $90^\circ$ ). Oi-  
kosuluissa havahtumisia tapahtuu 3LN -kytkennässä kaikilla muilla jännitekul-  
milla, mutta ei  $90^\circ$  jännitekulmalla. 2LL/3LL -kytkennässä oikosukuhavahtumi-  
sissa jännitekulmat ovat  $0^\circ$ ,  $33^\circ$  ja  $45^\circ$ .

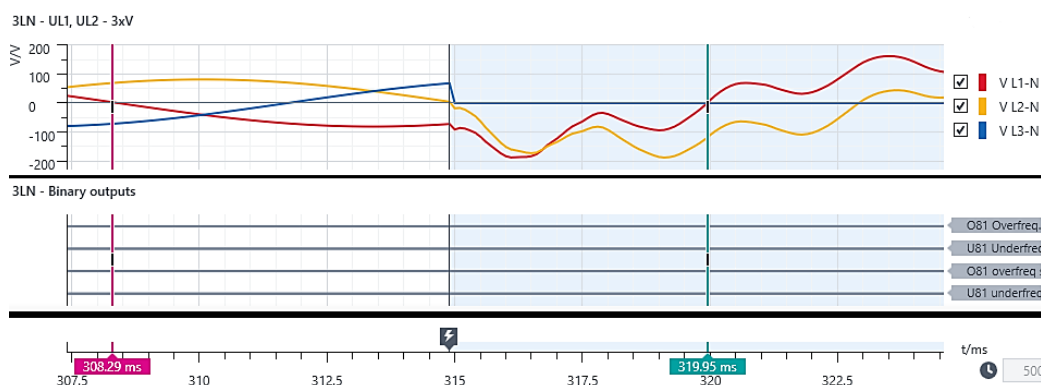
Maaseutuverkon maasulkuviassa L3-N jännitekulmassa  $57^\circ$  R4 havahtuu (kuvassa  
42 testitapaus 139), mutta samoilla muuttujilla muilla jännitekulmilla havahtumista  
ei tapahdu. Havahtuminen tapahtuu 45,3 ms vian synnyn jälkeen (testitapaus 139).

Substation	Neutral Earthing	Fault location	VT conn	No. Test case	Status	Fault location [%]	Inception angle [°]	Fault type	Fault resistance (RF) [Ω]	Load [%]	810 f> start [s]
Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	13	Passed	0	0	L3-N	0	100	Positive infinity
Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	55	Passed	0	33	L3-N	0	100	Positive infinity
Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	97	Passed	0	45	L3-N	0	100	Positive infinity
Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	139	Failed	0	57	L3-N	0	100	0.0453
Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	181	Passed	0	90	L3-N	0	100	Positive infinity



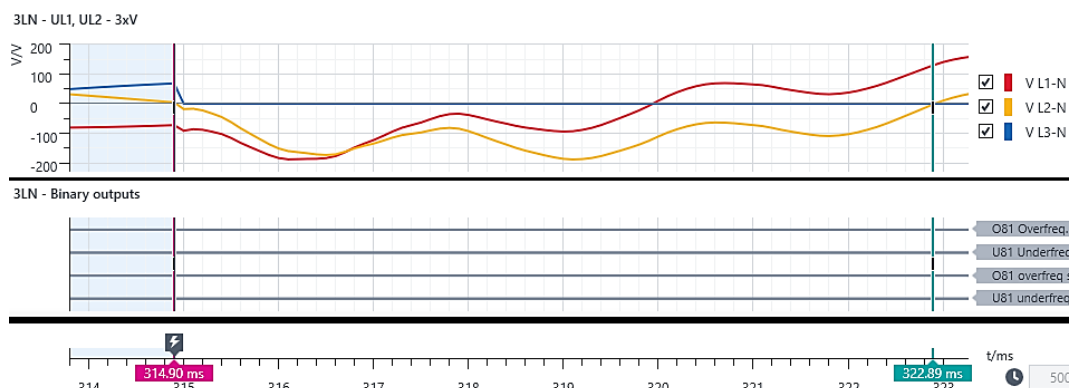
**Kuva 42.** Vaihejännitteet, maasulku L3-N jännitekulma  $57^\circ$ , testitapaus 139.

Kuvassa 43 nähdään, että testitapauksessa 139 vaihejännitteessä VL1-N on yksi puolijakso liian pitkä, 11,66 ms (alitaajuus).



**Kuva 43.** VL1-N alitaajuus maasulku L3-N jännitekulma  $57^\circ$ , testitapaus 139.

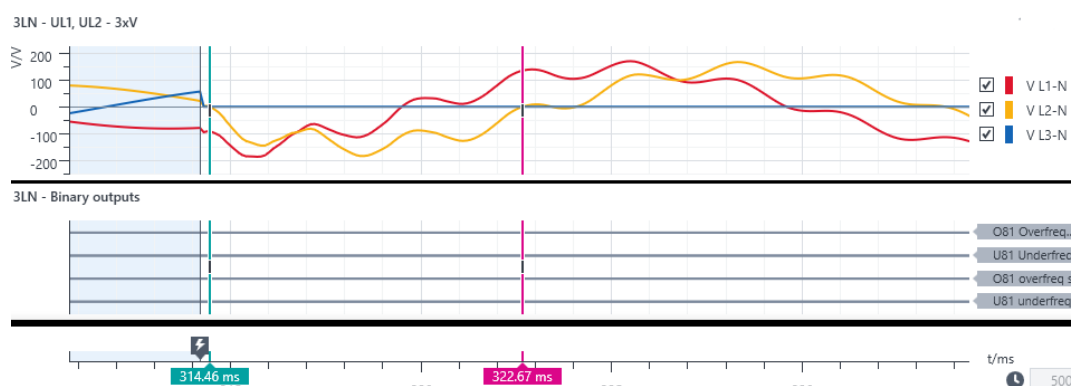
Kuvassa 44 nähdään, että testitapauksessa 139 vaihejännitteessä VL2-N on yksi puolijakso puolestaan liian lyhyt, 7,99 ms (ylitaajuus).



**Kuva 44.** VL2-N ylitaajuus maasulku L3-N jännitekulma  $57^\circ$ , testitapaus 139.

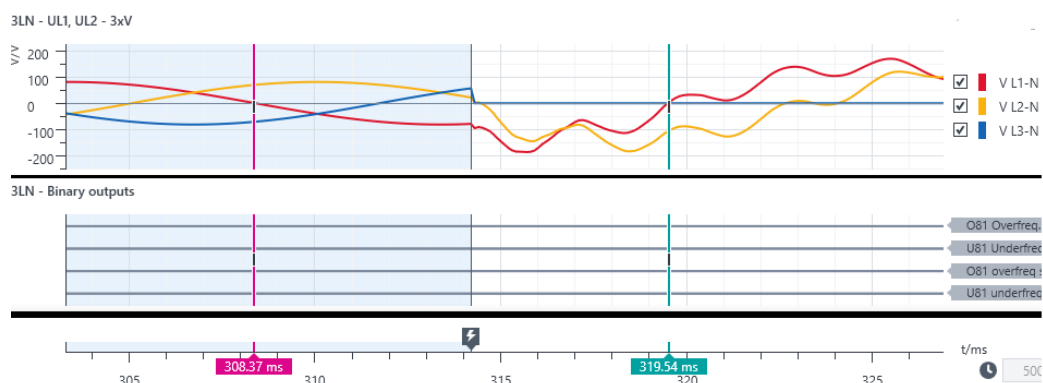
Tässä tapauksessa (testitapaus 139) R4:n havahtumiseen on riittänyt maasulussa ylitaajuus yhden puolijakson ajan vain yhdessä vaihejännitteessä, joka on VL2-N. Tämä poikkeaa aiemmista havainnoista.

Jännitekulmalla  $45^\circ$  (muuttujat muutoin samat) ylitaajuutta on usean puolijakson ajan vaihejännitteessä VL2-N. Ensimmäisen puolijakson pituus on 8,21 ms (kuvan 45 mukaisesti). R4 ei kuitenkaan havahdu tässä tapauksessa. Osa VL2-N puolijaksoista on todella lyhyitä, vähän yli 1ms.



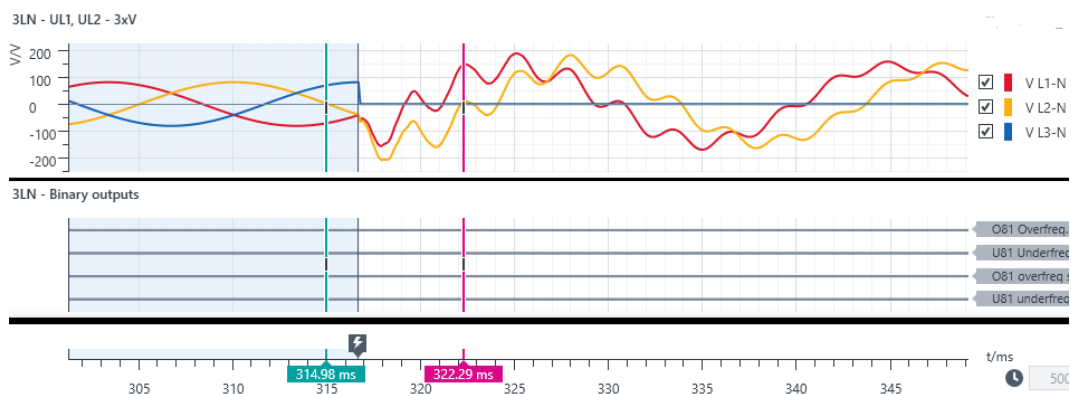
**Kuva 45.** VL2-N ylitaajuus maasulku L3-N jännitekulma  $45^\circ$ , testitapaus 97.

Kuvassa 46 nähdään, että VL1-N vaihejännitteessä on yhden jakson verran alitaajuutta, kuten testitapauksessa 139. Puolijakson pituus on 11,17 ms.



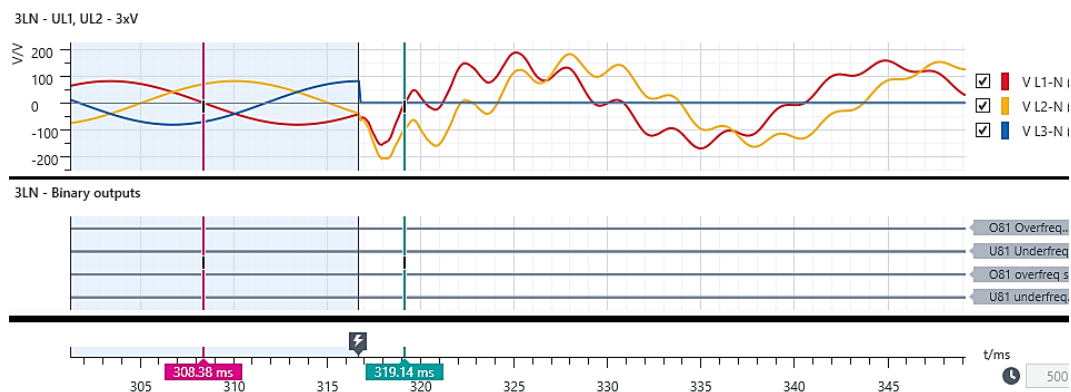
**Kuva 46.** VL1-N alitaajuus maasulku L3-N jännitekulma  $45^\circ$ , testitapaus 97.

Jännitekulmalla  $90^\circ$  jännitteiden käyttäytyminen on samankaltaista, kuin jännitekulmalla  $45^\circ$ . VL2-N vaihejännitteessä on ylitaajuutta ja siinä taajuus oskilloi yhtä lailla, osa puolijaksoista on hyvin lyhyitä, n.1 ms (**Kuva 47.**).



**Kuva 47.** VL2-N ylitaajuus maasulku L3-N jännitekulma  $90^\circ$ , testitapaus 181.

Ja vaihejännitteessä VL1-N on alitaajuutta, puolijakson pituus 10,76 ms (**Kuva 48.**).



**Kuva 48.** VL1-N alitaajuus maasulku L3-N jännitekulma  $90^\circ$ , testitapaus 181.

Tarkastellessa testitapauksia 97 ja 181 (kuvissa 45-48) nähdään, että näissä tapauksissa ylitaajuus on vain vaihejännitteessä VL2-N, kuten testitapauksessa 139. Mutta näissä tapauksissa taajuus jää oskilloimaan siten, että osa puolijaksoista on todella lyhyitä. Kun taas testitapauksessa 139 vain yksi VL2-N puolijakso on liian lyhyt. Liian lyhyet puolijaksot voi aiheuttaa sen, että suojarule huomaa taajuuden olevan liian korkea ja ei huomioi tätä mittausta.

## 7.4 Yhteenveto tuloksista

Yhteenvetona tuloksista voidaan todeta, että

1. Havahtumiseen vähimmillään riittää se, että
  - Yksi vaihejännitteiden puolijaksoista on sopivan lyhyt yhden puolijakson ajan
2. Kytkenä/mittaustapa vaikuttaa havahtumisien määrään eniten
  - 2LL/3LL -kytkennässä maasulkuviat eivät aiheuta havahtumista sillä maasulkujen vaikutus pääjänniteisiin on pieni
3. Vikavastuksen suureneminen vähentää havahtumisia
  - Maasuluissa 2 havahtumista 100  $\Omega$  vikavastuksella, suuremmalla ei yhtään
  - Oikosuluissa havahtumisia on vain 0  $\Omega$  vikavastuksella
4. Vikapaikan merkitys on suuri etenkin oikosuluissa
  - Oikosulku aiheuttaa havahtumisen vain lyhyen lähdön alussa, eli lähellä syöttävää asemaa
  - Maasulussa havahtumisien määrä on huomattavasti pienempi pitkän lähdön päädyssä
5. Kaapeloidussa kaupunkiverkossa maasulusta aiheutuvia havahtumisia tapahtuu enemmän kuin maaseutuverkossa
6. Maadoitustavalla ei pitäisi olla vaikutusta havahtumisiin
7. Jännitekulmalla ei ole vaikutusta maasuluissa
  - Maasulut aiheuttavat havahtumisia kaikilla jännitekulmilla
  - Oikosuluissa suurimmat jännitekulmat eivät aiheuta havahtumista
8. Kuormalla ei ole vaikutusta havahtumisiin
  - Havahtumisia tapahtuu kaikilla kuormilla tasaisesti

Yllä olevan yhteenvedon ja aiemmin esitettyjen havahtumismäärien perusteella otollisin tilanne havahtumisen kannalta on se, kun R4 on 3LN -kytkennässä, vika on maasulku kaapeloidussa kaupunkiverkossa lähellä asemaa ja vikavastus on 0  $\Omega$ .

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA ARVIOINTI

Työn tavoitteeseen nähden tehtävä on suoritettu. Simulointia varten on tehty reaalielämän verkkoihin perustuvat simulointimallit, joilla voidaan myöhemminkin testata suojausjärjestelmän käyttäytymistä niin normaali- kuin vikatilanteessa. Simulointimalleja voidaan hyödyntää taajuussuojauksen testauksen lisäksi myös suojausjärjestelmien muiden suojien testauksessa.

Testauksen tuloksena huomataan, että yksi testatuista suojausjärjestelmistä toimii muista poikkeavasti ylitaajuuden havahtumisen osalta. Havahtuminen voi kestää jopa 80% toiminta-ajasta (suojausjärjestelmän itsensä ilmoittama aika), mutta yhtään kertaa kyseinen suojausjärjestelmä ei suorita laukaisua, vaan suoja palautuu. Havahtumistapaukset on analysoitu ja havahtumiseen vaikuttavat tekijät on identifioitu.

Suojausjärjestelmän käyttäjälle havahtumisella voi olla merkitystä, mikäli hän käyttää havahtumista esimerkiksi hälytykseen. Tämän työn puitteissa tehdyt kaksi verkkomallia ja niissä simuloitavat viat ovat rajallinen otos reaalielämän verkoista ja niiden tilanteista. Joten on vaikea sanoa, voisiko jossakin tapauksessa havahtuminen kestää 100% toiminta-ajasta ja aiheuttaa verkon vikatilanteessa virhelaukaisun.

Mahdollisia lisätutkimusaiheita voisivat olla testauksen laajentaminen muihinkin, kuin työn puitteissa testattuihin vikatilanteisiin. Relevantteja vikoja voisivat olla esimerkiksi vaihekatkos, kaksoismaasulku (jossa toinen maasulku syntyy nopeasti ensimmäisen jälkeen) ja katkeileva maasulku. Katkeileva maasulku olisi etenkin relevantti testattava vikatyyppeiksi verkon lisääntyvän maakaapeloinnin vuoksi. Muita jatkotutkimusaiheita voisi olla sen testaus, ehtiikö taajuussuoja reagoida vikaan, mikäli oiko- tai maasulkusuojaus on käytössä. Mielenkiintoista olisi myös tutkia, millä ylitaajuusasettelulla suojausjärjestelmä ei enää havahdu jo tehdyissä testeissä ja onko pidemmällä toiminta-aika-asettelulla looginen vaikutus havahtumisaikaan.

Testauksen tuloksia voidaan pitää luotettavina, sillä simulointimallien rakentamiseen on käytetty reaalielämän verkkojen tietoja. Simulointimallien parametrien oikeellisuus on myös varmistettu käsin/Excelissä laskemalla niiltä osin, kuin se lähtötiedosta/mallista saaduista arvoista on mahdollista. Pahimpia vikatilanteita on

etsitty teoriatiedon pohjalta yksittäisillä koetestauksilla ennen varsinaisen testin aloittamista. Suojareleiden oikea asettelu on varmistettu ennen simulointia Omicronin QuickCMC -testausmoduulilla.

Muuttuvat verkkosäännökset luovat painetta ainakin Suomen/Pohjoismaiden markkinoilla myös suojarelevalmistajille. Etenkin alitaajuussuojan toimintavarmuuden ja hetkellisten vikojen sietoisuuden suhteen, mutta myös suojan lyhyen kokonais-toiminta-ajan osalta. Tässä tilanteessa täytyy myös ylitaajuussuojan toiminnan olla varmaa ja häiriösietoista. Generaattorin vikalaukaisu tehonvajaustilanteessa yhtäaikaaisesti tapahtuvan hetkellisen vian takia voi heikentää verkon taajuusstabiiliutta häiriötilanteessa entisestään.

## LÄHTEET

- /1/ Ajankohtaispäivä 11.9.2019, Käytön verkkosäännöt ja päivitetty palveluehdot sekä tekniset tiedot. Fingrid. Viitattu 3.8.2020. [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/20190911\\_ajankohtaispaiva\\_esitykset..pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/20190911_ajankohtaispaiva_esitykset..pdf)
- /2/ Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. 1.painos. Helsinki. Otatieto.
- /3/ Network Protection & Automation Guide. 2016. Schneider Electric. Viitattu 15.2.2020. <https://www.se.com/ww/en/tools/npag-full-online-unlocked-1130re14y/>
- /4/ Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I. Järjestelmä ja sähköverkon laskenta. 1. painos. Helsinki. Otatieto Helsinki University Press.
- /5/ Mörsky J. & Mörsky J. 1994. Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka. Helsinki. Otatieto Oy.
- /6/ Kärnkraft i Sverige. Wikipedia. Viitattu 9.3.2020. [https://sv.wikipedia.org/wiki/K%C3%A4rnkraft\\_i\\_Sverige](https://sv.wikipedia.org/wiki/K%C3%A4rnkraft_i_Sverige)
- /7/ Sähkötöimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. 17.11.2014. Energiateollisuus ry. Viitattu 27.3.2020. [https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen\\_laatu\\_ja\\_toimitustapavirheen\\_sovellusohje\\_2014.pdf](https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf)
- /8/ Energiateollisuus ry:n verkkosivut. Viitattu 27.3.2020 <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot> ja <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima>
- /9/ Kekkonen, J. 2004. Sähköjärjestelmän varautuminen vakaviin normaaliajan häiriöihin ja poikkeusoloihin ja sen nykytila . Fingrid Oyj. Viitattu 16.2.2020. <https://docplayer.fi/1167916-Sahkojarjestelman-varautuminen-vakaviin-normaaliajan-hairioihin-ja-poikkeusoloihin-ja-sen-nykytila-juha-kekkonen-fingrid-oyj.html>
- /10/ Kaszteny, B., Oyenuga, D., Voloh, I. & Xue, S. *Power System Frequency Measurement for Frequency Relaying*. Konferenssipaperi. Western Protective Relay Conference. 20.10.2007. [https://www.researchgate.net/publication/321255243\\_Power\\_System\\_Frequency\\_Measurement\\_for\\_Frequency\\_Relaying](https://www.researchgate.net/publication/321255243_Power_System_Frequency_Measurement_for_Frequency_Relaying)
- /11/ Vedenjuoksu, T. 2006. Relesuojauksen perusperiaatteet. ABB Oy SA-tuotteet.
- /12/ RELION® PROTECTION AND CONTROL 630 series Technical Manual. Versio F. 25.2.2019. ABB. Vaasa. <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS756508&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>



- /13/ AQ 300 product flyer. Viitattu 11.4.2020. <https://arcteq.fi/wp-content/uploads/2016/11/aq300-series-flyer-en1.1.pdf>
- /14/ Instruction Manual AQ L310–Line protection IED. Versio 1.01. 18.12.2019. Arcteq Oy. Vaasa. <https://arcteq.fi/wp-content/uploads/2019/12/AQ-L310-Instruction-manual-v1.01EN.pdf>
- /15/ RELION® 630 SERIES Generator Protection and Control REG630 Application Manual. 25.2.2019. Versio C. ABB. Vaasa. <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS757582&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- /16/ SEL-351A Distribution Protection System (Directional overcurrent Relay, Reclosing Relay, Fault Locator, Integrated Element Standard), Instruction Manual. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. WA, USA. [https://sertecrelays.net/wp-content/uploads/2019/02/351A\\_IM\\_20010808.pdf](https://sertecrelays.net/wp-content/uploads/2019/02/351A_IM_20010808.pdf)
- /17/ Keskeytystilasto 2018. Energiateollisuus ry. Viitattu 16.2.2020. Helsinki. Energiateollisuus ry ET. [https://energia.fi/files/3854/Sahkon\\_keskeytystilasto\\_2018.pdf](https://energia.fi/files/3854/Sahkon_keskeytystilasto_2018.pdf)
- /18/ Alanen, R. & Hätönen, H. 2006. VTT Working Papers 52. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, State of art -selvitys. Viitattu 16.2.2020. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>
- /19/ Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 1. painos. Helsinki. Otatieto Helsinki University Press.
- /20/ Salminen, P. 2008. *Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut*. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. [http://www.tut.fi/eee/opus/pdf%20julkiset%20dyot/Salminen\\_Petri\\_julk.pdf](http://www.tut.fi/eee/opus/pdf%20julkiset%20dyot/Salminen_Petri_julk.pdf)
- /21/ Mäkinen, A., Nikander, A. & Pylvänäinen J. 2007. Sähköverkkojen häiriöiden ja sähkölaitteiden yhteensopivuuden hallinta. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkövoimatekniikka. [https://energia.fi/files/878/Sahkoverkkojen\\_hairioiden\\_ja\\_sahkolaitteiden\\_yhteensopivuuden\\_hallinta.pdf](https://energia.fi/files/878/Sahkoverkkojen_hairioiden_ja_sahkolaitteiden_yhteensopivuuden_hallinta.pdf)
- /22/ Nyman, T. Käyttöinsinööri. Loiste Energia Oy. Sähköposti 7.4.2020 ja haastattelu 12.5.2020.
- /23/ Nikander, A. & Mäkinen, A. 2017. Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset – suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laboratorio
- /24/ Omicron Energy Solutions verkkosivut. Viitattu 22.7.2020 <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-356>

## LIITE 1. Kyselylomake verkon lähtötiedot (ote kyselystä)

<b>Syöttö:</b>		c	1,1			
	3-v oikosulkuvirta	Ik		kA		
	Pääjännite	U <sub>s</sub>	110	kV		
	Phase angle		0			
	kulma			oletusarvo 89,90		
<b>Päämuuntaja:</b>	Kytkenä					
	Nimellisteho	SN		MVA		
	Kuparihäviöt/nimellinen virtalämpöhäviö	P <sub>KN</sub>		kW		
	Oikosulkuimpedanssi	z <sub>k</sub> %		%		
	Nimell. ensiöjännite	U <sub>1N</sub>	110	kV		
	Nimell. toisiojännite	U <sub>2N</sub>		kV		
	Magnetointivirta	I <sub>m</sub> %		%		
	Koko aseman maasulkuvirta	I <sub>EM</sub>		A		
<b>Lähtö 1:</b>	<b>Johto 1</b>				<b>Johto 2</b>	
	Tyyppi			Valmistaja ja tyyppi	Tyyppi	Valmistaja ja tyyppi
	Pituus	I		km	Pituus	I km
	Etäisyys maanpinnasta			m	Etäisyys maanpinnasta	m
	Etäisyys toisesta vaihejohtimesta			m	Etäisyys toisesta vaihejohtimesta	m
	<b>Kaapeli 1</b>				<b>Kaapeli 2</b>	
	Tyyppi			Valmistaja ja tyyppi	Tyyppi	Valmistaja ja tyyppi
	Pituus	I		km	Pituus	I km
	<b>Kuorma</b>					
	Nimellistehon min -max	SN		MVA		
	cos phi			oletusarvo 0,95		
<b>Lähtö 2:</b>	<b>Johto 1</b>				<b>Johto 2</b>	
	Tyyppi			Valmistaja ja tyyppi	Tyyppi	Valmistaja ja tyyppi
	Pituus	I		km	Pituus	I km
	Etäisyys maanpinnasta			m	Etäisyys maanpinnasta	m
	Etäisyys toisesta vaihejohtimesta			m	Etäisyys toisesta vaihejohtimesta	m
	<b>Kaapeli 1</b>				<b>Kaapeli 2</b>	
	Tyyppi			Valmistaja ja tyyppi	Tyyppi	Valmistaja ja tyyppi
	Pituus	I		km	Pituus	I km
	<b>Kuorma</b>					
	Nimellistehon min -max	SN		MVA		
	cos phi			oletusarvo 0,95		
<b>Lähtö 3:</b>	<b>Johto 1</b>				<b>Johto 2</b>	
	Tyyppi			Valmistaja ja tyyppi	Tyyppi	Valmistaja ja tyyppi
	Pituus	I		km	Pituus	I km
	Etäisyys maanpinnasta			m	Etäisyys maanpinnasta	m
	Etäisyys toisesta vaihejohtimesta			m	Etäisyys toisesta vaihejohtimesta	m
	<b>Kaapeli 1</b>				<b>Kaapeli 2</b>	
	Tyyppi			Valmistaja ja tyyppi	Tyyppi	Valmistaja ja tyyppi
	Pituus	I		km	Pituus	I km
	<b>Kuorma</b>					
	Nimellistehon min -max	SN		MVA		
	cos phi			oletusarvo 0,95		

## LIITE 2. Simuloinnin tulosten yhteenveto (ote yhteenvedosta)

Test case nr	Substation	Neutral Earthing	Fault location	VT connection	No.	Status	Line fault 1 - location [%]	Line fault 1 - Inception angle [°]	Line fault 1 - Fault type	Line fault 1 - resistance (Rf) [Ω]	Kuorma 1 - Percentage load [%]	810 f> Trip [s]	81U f< Trip [s]	810 f> start [s]	81U f< start [s]	Executed
1	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	1	Passed	0	0	L1-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
2	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	2	Passed	0	0	L1-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
3	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	3	Passed	0	0	L1-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
4	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	4	Passed	0	0	L1-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
5	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	5	Passed	0	0	L1-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
6	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	6	Passed	0	0	L1-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
7	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	7	Failed	0	0	L2-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
8	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	8	Failed	0	0	L2-N	0	0	Positive ir	Positive ir	0,0484 Positive ir	0,0475 Positive ir	25.5.2020 18:21
9	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	9	Passed	0	0	L2-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
10	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	10	Passed	0	0	L2-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
11	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	11	Passed	0	0	L2-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:21
12	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	12	Passed	0	0	L2-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
13	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	13	Passed	0	0	L3-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
14	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	14	Passed	0	0	L3-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
15	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	15	Passed	0	0	L3-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
16	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	16	Passed	0	0	L3-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
17	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	17	Passed	0	0	L3-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
18	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	18	Passed	0	0	L3-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
19	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	19	Passed	0	0	L1-L2-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
20	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	20	Passed	0	0	L1-L2-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
21	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	21	Passed	0	0	L1-L2-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
22	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	22	Passed	0	0	L1-L2-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
23	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	23	Passed	0	0	L1-L2-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
24	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	24	Passed	0	0	L1-L2-N	1000	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
25	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	25	Passed	0	0	L2-L3-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
26	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	26	Passed	0	0	L2-L3-N	0	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:22
27	Countryside A	Isolated	beg of 2	3LN	27	Passed	0	0	L2-L3-N	100	0	Positive ir	Positive ir	Positive ir	Positive ir	25.5.2020 18:23