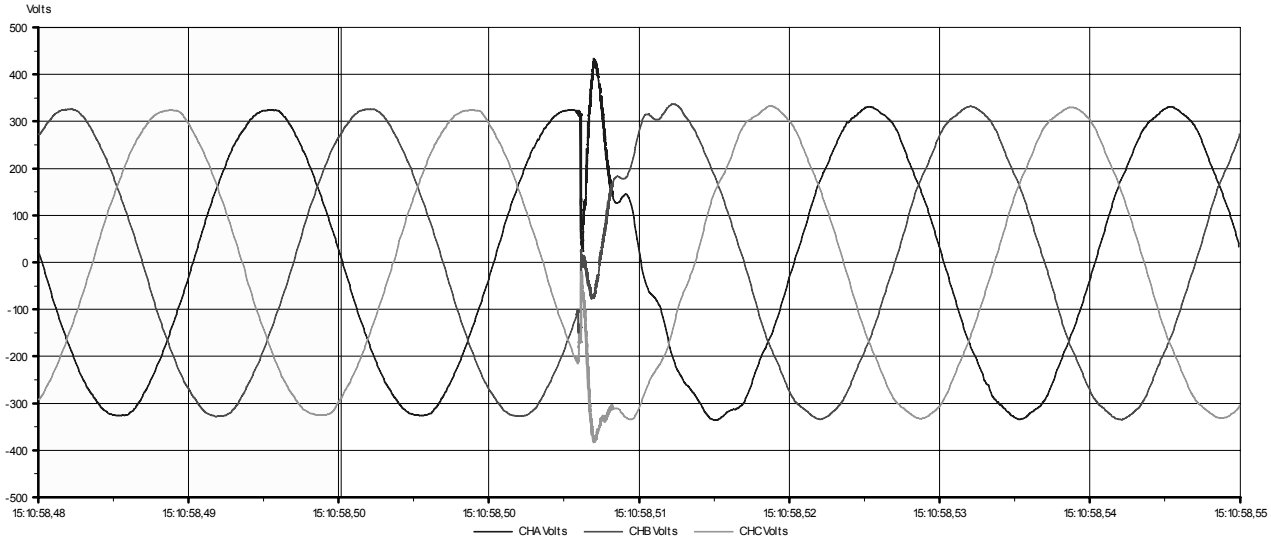
TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Sähkövoimatekniikka

Antti Mäkinen, Ari Nikander, Jouni Pylvänäinen

Sähköverkkojen häiriöiden ja sähkölaitteiden yhteensopivuuden hallinta



Tampere 2007, Finland

Antti Mäkinen, Ari Nikander, Jouni Pylvänäinen

Sähköverkkojen häiriöiden ja sähkölaitteiden yhteensopivuuden hallinta
Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2007
Tutkimusraportti / Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkövoimatekniikka

ALKUSANAT

Tämä julkaisu on Tampereen teknillisen yliopiston Sähkövoimatekniikan laitoksella toteutetun hankkeen ’Sähköverkkojen häiriöiden ja sähkölaitteiden yhteensopivuuden hallinta’ (SäHLY) loppuraportti.

Tutkimuksen rahoitukseen lupautui lähes 20 jakeluverkkoyhtiötä, Sähkötekniikan edistämiskeskus (STEK) sekä Sähkövoimatekniikan pooli (SVK-pooli). Koillis-Satakunnan Sähkö Oy ja Tampereen sähkölaitos osallistuivat lisäksi erittäin merkittävällä työpanoksella käytännön verkkokokeiden toteuttamiseen.

Toteutuksesta on vastannut Tampereen teknillinen yliopistossa professori Pertti Järventaustan johdolla toiminut tutkimusryhmä, johon ovat kuuluneet TkL Antti Mäkinen, TkT Ari Nikander ja DI Jouni Pylvänäinen.

Kiitämme kaikkia hanketta edesauttaneita henkilöitä sekä yrityksiä ja organisaatioita.

Tampereella maaliskuussa 2007

Tekijät

TIIVISTELMÄ

Sähköverkkojen häiriöiden ja sähkölaitteiden yhteensopivuuden hallinta

Antti Mäkinen, Ari Nikander, Jouni Pylvänäinen
Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkövoimatekniikan laitos

Raportissa esitetään sähköverkkojen häiriöiden ja sähkölaitteiden yhteensopivuuden hallintaa käsitelleen projektin tulokset. Tavoitteena on ollut saada käytännön tasolla kaivattua informaatiota sähköverkossa esiintyvistä ilmiöistä ja häiriöiden etenemisestä sähköverkossa erityisesti pienjänniteverkkoon liitettävien yksivaiheisten kulutuskojeiden kokemien ylijännitteiden kannalta tarkasteltuna. Tutkimuskohteita ovat olleet lähinnä aihepiiriin liittyvien standardien keskeinen sisältö, keskijänniteverkon maasulkuviat sekä keskijänniteverkossa ja pienjänniteverkossa tehtävät kondensaattorien kytkennät. Ylijännitteet voivat myös vahvistua edetessään verkkotasolta toiselle, johtuen kondensaattorien ja verkon impedanssien muodostamista resonanssipiireistä. Lisäksi on selvitetty suppeasti rakennuksissa esiintyviä vaara- ja häiriöjännitteitä, salaman vaikutuksia, laitteiden vikaantumis- ja häiriintymismekanismeja, suojautumista häiriöiden varalle sekä elektroniikkalaitteiden suojausta.

Pääpaino on ollut maasulkujen aiheuttamissa ylijännitteissä ja kondensaattorien kytkentöjen aiheuttamissa ylijännitteissä. Verkon vikoihin liittyviä ilmiöitä selvitettiin maaseudun avojohtoverkossa tehdyillä verkkokokeilla ja niihin liittyvillä mittauksilla sekä simuloinneilla. Kaupungin kaapeliverkon osalta tarkastelut tehtiin pelkästään simuloimalla. Kondensaattorien kytkentöjen osalta tehtiin verkkokokeita sekä keskijänniteverkossa että pienjänniteverkossa. Suurimpia pienjänniteverkossa mahdollisesti esiintyviä ylijännitteitä arvioitiin tämän jälkeen simulointien avulla.

Esimerkkiverkoissa tuloksena saatujen ylijännitetasojen todettiin olevan vaihejännitteiden osalta huippuarvoiltaan selvästi pienempiä kuin turvallisuus- ja EMC-standardeissa niille asetetut vaatimukset, mutta toisaalta pidempikestoisia.

Absoluuttisen transientin suuruutena selvästi lähimmäksi EMC-standardien häiriöiden sietotasorajaa päädyttiin sähköasemakondensaattorin kytkennän aiheuttaman transientin vahvistuttua edetessään pj-verkkoon, jossa oli kondensaattori. Pienjänniteverkossa olevan kondensaattorin aiheuttaman vahvistumisen seurauksena keskijännitekondensaattorin kytkentä voi aiheuttaa yhteensopivuustasoa suurempiakin ylijännitteitä pääjännitteiden osalta. Kaapeloidussa kaupunkiverkossa vahvistumisen seurauksena tämä on myös mahdollista maasulunkin yhteydessä.

Pienjänniteverkossa kondensaattorin kytkennän aiheuttamia voi vaimentaa merkittävästi verkossa jo kytkettynä olevat kondensaattorit.

Estokelaparistojen yhteydessä muutosilmiöt jäivät selvästi pienemmiksi kuin tavallisten rinnakkaiskondensaattoriparistojen yhteydessä eikä mahdollisesti haitallisia vahvistumisia havaittu.

Standardien vaatimukset on esitetty varsin lyhytkestoisille transienteille ja käytännössä energiasisältö voivat olla standardiarvoja suurempia. Tällä on myös vaikutuksensa laitehäiriöiden esiintymiseen, mutta asiaa ei pyritty selvittämään tarkemmin tässä tutkimuksessa..

Kondensaattorien kytkennän aiheuttamien transienttien yhteydessä absoluuttisten ylijännitteiden huippuarvojen lisäksi ongelmia voivat aiheuttaa myös ylijännitteiden kestoaika, jännitteen liiallinen hetkellinen romahtaminen sekä jännitteen liiallinen loveentuminen ja ylimääräiset nollakohdat.

EMC-standardien raja-arvojen puitteissa sähkölaitteiden tulisi toimia riittävän hyvin häiriintymättä. Toisaalta standardeista ei löydy tarkempaa tietoa siitä, kuinka paljon suurempia transienttiylijännitteitä (mm. absoluuttinen hetkellinen huippuarvo ja energiasisältö) laitteet niiden komponenttien ja sähköisten piirien osalta sietävät rikkoontumatta. Tämän asian tarkempi selvittäminen edes jonkin laitetyypin osalta vaatisi ilmeisestikin laajahkoja laboratoriotestejä

Tulokset tukevat myös sähköverkon vikatilanteiden hallintaa. Mm. keskijänniteverkon johdinkatkokset ovat perinteisillä menetelmillä olleet usein vaikeasti havaittavissa keskijänniteverkon suojareleistyksellä. Pienjänniteverkossa vikapaikan takana katkos näkyy kuitenkin selvästi jännitemuutoksina. Simulointitulokset tukevat osaltaan tarvittavien päättelyalgoritmien muodostamista ja muutosten raja-arvojen valintaa.

Sähkö- ja televerkkojen välisten häiriöriskien osalta keskeisiä asioita ovat potentiaalin tasaus ja oikein toteutetut maadoitukset sekä mahdollisesti tarvittavan ukkossuojauksen toteutus.

SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat i
Tiivistelmä iii
Sisällysluettelo v
1. JOHDANTO 1
2. DIREKTIIVIT JA STANDARDOINTI 3
2.1 Direktiivien ja standardien keskeinen sisältö 3
2.2 Ylijännitekestoisuusvaatimusten huomioonotto ja sähkölaitteiden yhteensopivuus 9
2.2.1 Turvallisuusvaatimukset 9
2.2.2 EMC vaatimukset 10
3. KESKIJÄNNITEVERKON MAASULUT 13
3.1 Maasulkuilmiö keskijänniteverkossa 13
3.2 Mittaustulokset maasta erotetussa verkossa ja sammutetussa verkossa 17
3.3 Maasulkujen simulointi 19
3.3.1 Mallinnettu avojohtoverkko 19
3.3.2 Mallinnettu maakaapeliverkko 20
3.3.3 Maasta erotetun maaseutuverkon maasulkujen simulointitulokset 22
3.3.4 Sammutetun maaseutuverkon maasulkujen simulointitulokset 32
3.3.5 Johtopäätökset maaseutuverkon maasuluista 33
3.3.6 Maasta erotetun kaupunkiverkon simulointitulokset 34
3.3.7 Sammutetun kaupunkiverkon simulointitulokset 41
3.4 Yhteenveto ja johtopäätökset maasulkujen vaikutuksista 43
4. KONDENSAATTORIEN KYTKENNÄN VAIKUTUKSET 45
4.1 Kondensaattorien kytkentään liittyvät ilmiöt 45
4.2 Kondensaattorien kytkentöihin liittyvät mittaukset ja simuloinnit 46
4.3 Käytännön häiriötapaus 53
5. YLIJÄNNITTEIDEN ARVIOINTI JA SYYT LAITEHÄIRIÖIHIN 55
6. SÄHKÖ- JA TELEVERKKOJEN YHTEENSOPIVUUS 61
7.2 Vaara- ja häiriöjännitteet sekä niiden vaikutukset laitteistoille 62
7.2 Häiriöiltä suojautuminen 66
7. YHTEENVETO 71
Lähdeluettelo 73
LIITE 1 ELEKTRONIIKKALAITTEEN SUOJAUS JA TIETOKONEEN RAKENNE 75

1. JOHDANTO

Jakeluverkonhaltijoilla on vastuu verkkojensa hallinnasta ja tulisi olla myös riittävä tietotaito siitä, mitä verkoissa tapahtuu sekä valmius yhteistyössä sähkönkäyttäjien ja laitetoimittajien kanssa varmistaa riittävän hyvälaatuisen sähkön toimitus. Sähkönkäyttäjien laitteiden tulisi sietää rikkoutumatta sähköverkossa normaaliksi katsottavat ilmiöt, kuten esim. jännitevaihtelut, ylijännitteet, jännitekatkot ja jännitekuopat.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut:

- tuottaa käytännön tasolla kaivattua informaatiota sähkönjakeluverkoissa esiintyvistä ilmiöistä ja häiriöiden etenemisestä sähköverkossa erityisesti pienjänniteverkkoon liitettävien sähkölaitteiden kannalta tarkasteltuna
- tukea sähkölaitteiden häiriö- ja vauriotapausten selvittelyä sekä ohjeistamista sähkölaitehäiriöiden ja –vaurioiden ennalta ehkäisemiseksi

Käytännön selvitystyöhön ovat liittyneet keskeisesti:

- sähköverkon häiriöihin ja sähkölaitteiden häiriösietoisuuteen liittyvän standardoinnin sisältö
- keskijänniteverkon maasulkuihin ja kondensaattorien kytkentätapahtumiin liittyvät ilmiöt
- keskijänniteverkon vikoihin liittyvät verkkokokeet ja mittaukset sekä simuloinnit
- kondensaattorien kytkentäkokeet sekä simuloinnit
- sähkö- ja televerkon väliset vaara- ja häiriöjännitteet sekä suojauskysymykset

Mielenkiinnon kohteena on ollut erityisesti pienjänniteverkossa esiintyvien ylijännitteiden tarkastelu.

2. DIREKTIIVIT JA STANDARDOINTI

Verkkoyhtiöiden toimintaa sekä sähkölaitteiden suunnittelua ja käyttöä ohjaavat monet säännökset, standardit ja suositukset:

- kansalliset lait ja asetukset, kuten Sähkömarkkinalaki, Sähkömarkkina-asetus, Sähköturvallisuuslaki, Sähköturvallisuusasetus
- direktiivit ja standardit:
    - Eurooppalaiset direktiivit, EN-standardit ja HD-harmonisointiasiakirjat
    - Suomalaiset SFS-standardit
    - Globaaliset IEC-standardit
    - Muut standardit
- alan yleiset ohjeet ja suositukset, kuten
    - Verkkopalveluehdot
    - Alan järjestöjen verkostosuositukset ja muut suositukset sekä julkaisut
    - Sähköurakointiohjeet, ST-kortisto
    - Verkkoyhtiöiden omat urakointiohjeet ym. ohjeet ja suositukset

2.1 Direktiivien ja standardien keskeinen sisältö

Uusi lähestymistapa ”New Approach” on Euroopassa direktiivien laadinnassa vuodesta 1985 alkaen käytetty periaate. Direktiiveissä esitetään ainoastaan olennaiset vaatimukset. Teknisissä seikoissa viitataan yhdenmukaistettuihin standardeihin. Yhdenmukaistettujen standardien laatiminen on uskottu eurooppalaisille standardointijärjestöille, mutta yhdenmukaistettujen standardien soveltaminen ei ole kuitenkaan pakollisia. Keskeiset sähkölaitteisiin liittyvät direktiivit ovat turvallisuutta koskeva pienjännitedirektiivi ja sähkömagneettista yhteensopivuutta koskeva EMC-direktiivi.

Pienjännitedirektiivi (LVD-direktiivi)

- 73/23/EEC (O.J. no L77, 1973-03-26)
  sekä muutos 93/68/EEC (O.J. no L220, 1993-08-30)
- 2006/95/EY (O.J. no L374, 2006-12-27): EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2006/95/EY, annettu 12 päivänä joulukuuta 2006, tietyllä jännitealueella toimivia sähkölaitteita koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä (kodifioitu toisinto). Kodifioitu direktiivi kumosi 73/23/EEC:n muutoksineen muuttamatta kuitenkaan olennaisia vaatimuksia.

- Direktiivi koskee kaikkia sähkölaitteita, jotka toimivat vaihtovirralla nimellisjännitealueella 50 - 1000 V tai tasavirralla nimellisjännitealueella 75 - 1500 V, lukuun ottamatta alla lueteltuja laitteita ja ilmöitä
- Laitteet ja ilmiöt, jotka eivät kuulu soveltamisalaan:
    - Räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettävät sähkölaitteet.
    - Radiologisiin ja lääketieteellisiin tarkoituksiin suunnitellut sähkölaitteet.
    - Tavara- ja henkilöhissien sähköiset osat.
    - Sähkömittarit.
    - Kotitalouskäyttöön tarkoitetut pistotulpat ja -rasiat.
    - Sähköpaimenet.
    - Radiohäiriöt.
    - Laivoissa, lentokoneissa ja rautateillä käytettävät erikoissähkölaitteet, jotka täyttävät sellaisten kansainvälisten järjestöjen vaatimukset, joiden työskentelyyn jäsenvaltiot osallistuvat.
- Olennaiset turvallisuusvaatimukset ovat:
    - Sähkölaite voidaan saattaa markkinoille vain, jos se on valmistettu yhteisössä voimassa olevan hyvän turvallisuusteknisen käytännön mukaisesti siten, että se ei oikein asennettuna, huollettuna ja käyttötarkoituksensa mukaisesti käytettynä aiheuta vaaraa ihmisille, kotieläimille tai omaisuudelle.
- CE-merkintä on pakollinen 1997-01-01 lähtien
- Standardien käyttö:
    - Käyttämällä pienjännitedirektiivin mukaisesti yhdenmukaistettuja (harmonisoituja) standardeja voi olla varma, että tuote täyttää pienjännitedirektiivin olennaiset turvallisuusvaatimukset ja CE-merkin voi kiinnittää.
    - Harmonisoitujen standardien käyttö on kuitenkin vapaaehtoista, ja muutkin menetelmät ovat mahdollisia.
- Luettelo yhdenmukaistetuista standardeista julkaistaan EU:n virallisessa lehdessä, Official Journal (OJ), ja niitä on kahdenlaisia:
    - yleiset standardit, jotka koskevat koko tuoteperhettä (esim. EN 60947-1)
    - tuotestandardit, jotka koskevat määrättyä tuotetta (esim. EN 60947-4-1)

EMC-direktiivi

- 89/336/EEC - EMC sekä sen muutokset 92/31/EEC ja 93/68/EEC:
- Koskee sähkölaitteita, jotka voivat aiheuttaa sähkömagneettista häiriötä ja jotka voivat olla tällaisten häiriöiden kohteena.
- Laitteet, joita direktiivi ei koske:
    - muiden rinnakkaisten vastaavat EMC-vaatimukset sisältävien direktiivien alaiset laitteet (esim. 90/385/EEC ja 93/42/EEC lääkintälaitteet, 72/245/EEC moottoriajoneuvot)
    - radioamatöörilaitteet

- Olennaiset vaatimukset ovat, että sähkölaitteen on rakenteeltaan oltava sellainen, että
    - sen synnyttämä sähkömagneettinen häiriö ei ylitä tasoa, joka sallii radio- ja telelaitteiden ja muiden laitteiden toimimisen suunnitellulla tavalla
    - sillä on riittävä sähkömagneettisten häiriöiden sietokyky, joka tekee mahdolliseksi sen toimimisen suunnitellulla tavalla
- CE-merkintä: Kyllä
- Standardien käyttö:
    - Harmonisoitujen standardien mukaiset laitteet täyttävät direktiivin vaatimukset. Kuitenkin harmonisoitujen standardien käyttö on vapaaehtoista ja direktiivin vaatimukset voi täyttää useilla eri tavoilla.
- Standardeja on 4 erilaista luokkaa:
    - Perusstandardit määrittelevät mittausmenetelmät (niitä ei ole tarkoitus harmonisoida eli luetella EYVL:ssä)
    - Yleiset standardit antavat olennaiset vaatimukset kaikille laitteille, jotka on tarkoitettu toimimaan tietyissä ympäristöissä.
    - Tuoteperhestandardit määrittelevät EMC-vaatimukset tietyille tuoteryhmille.
    - Tuotestandardit määrittelevät yksittäisiä tuotteita koskevat EMC-vaatimukset.
- Sopivan harmonisoidun tuoteperhestandardin (esim. EN 55014) tai tuotestandardin (esim. EN 61036) puuttuessa on noudatettava yleisiä standardeja.

Laitteet on suunniteltava ja valmistettava siten, että silloin, kun ne on asianmukaisesti asennettu ja kunnossapidetty ja niitä käytetään siinä ympäristössä ja siihen tarkoitukseen, mihin ne on valmistettu:
1) niiden synnyttämät sähkömagneettiset häiriöt eivät ylitä tasoa, joka estäisi tele-, telepääte- ja radiolaitteita sekä muiden laitteiden toimimisen tarkoitetulla tavalla, ja
2) ne sietävät riittävästi sähkömagneettisia häiriöitä toimiakseen tarkoitetulla tavalla siinä sähkömagneettisessa ympäristössä, jossa ne on tarkoitettu toimimaan.

Sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (EMC) on säädetty direktiivissä 89/336/ETY. Valmistaja voi osoittaa tuotteen täyttävän direktiivin tekniset vaatimukset noudattamalla tuotetta koskevia yhdenmukaistettuja standardeja. Luettelo yhdenmukaistetuista standardeista julkaistaan EU:n virallisessa lehdessä (Official Journal). Vaatimustenmukainen tuote varustetaan CE-merkinnällä ja valmistajan tai sen Euroopan talousalueella olevan edustajan on annettava vaatimustenmukaisuusvakuutus (Declaration of Conformity). Jos yhdenmukaistettuja standardeja ei ole käytetty, on valmistajan tai sen Euroopan talousalueella olevan edustajan laadittava tuotetta koskeva tekninen rakennetiedosto. Teknisen rakennetiedoston on oltava pätevän tarkastuslaitoksen (Competent Body) hyväksymä.

Uusi EMC-direktiivi 2004/108/EY kumoaa direktiivin 89/336/ETY 20. heinäkuuta 2007 alkaen. Siirtymäaika, jonka jälkeen direktiivin 89/336/ETY mukaisia laitteita ei enää saa saattaa markkinoille, päättyy 20. heinäkuuta 2009. Myös uusi EMC-direktiivi noudattaa uuden lähestymistavan mukaista periaatetta, jossa yhdenmukaistetuilla standardeilla on

merkittävä rooli vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa. Uuden direktiivin mukaan valmistajan on kuitenkin aina laadittava tekninen tiedosto EMC-suojauksen toteuttamisesta.

EMC-direktiivin alaisten laitteiden EMC-vaatimuksina sovelletaan yleisten (generic) EMC-standardien vaatimuksia, mikäli ei ole olemassa erityistä tuote- tai tuoteperhestandardia. Käytännössä näissä sovelletaan esim. ylijännitesietoisuuden osalta yleisesti samoja vaatimuksia, mutta kerrotaan tarkemmin, miten laitteiden toimintaa tulee kontrolloida testien aikana. Yleisstandardien merkitys on kuitenkin vähentynyt, sillä niitä sovelletaan sellaisenaan vain silloin, kun laitekohtaista standardia ei ole ja laitekohtaisten standardien valikoima on jo melko kattava.

Pienjänniteasennuksia koskeva standardisarja SFS 6000

Pienjänniteasennuksia koskeva standardisarja SFS 6000 perustuu pääasiassa kansainväliseen standardisarjaan IEC 60364 (Electrical installations of buildings) ja harmonisointiasiakirjaan HD 384 (Electrical installations of buildings). Osan 8 standardit ovat kansallisia.

Asennusten laitteiden valinnan kohdalla on esitetty IEC 60664-1 mukaiset ylijänniteluokat syöksyjännitteelle. Laitteilta vaadittuja nimellisiä ylijännitteen keston arvoja on esitetty taulukossa 2.1. Kulutuskojeiden (ylijänniteluokka II) vaatimus on 2,5 kV ja asennuksen syöttöpisteeseen (sähkönkäyttäjän liittämiskohta) liitettäviltä laitteilta vaaditaan 6 kV. Ylijänniteluokan II laite on rakennuksen kiinteään asennukseen liitettäväksi tarkoitettu laite. Esimerkkejä luokan II laitteista ovat kotitalouskojeet, kädessä pidettävät työkalut ja vastaavat kuormitukset sekä yleisesti toimistoissa käytettävät laitteet.

Laitteilta vaadittava ylijännitteen kesto tarkoittaa taulukossa 2.1 impulssiylijännitteen kestävyyden mitoitusarvoa, joka kuvaa **eristysten** mitoitusten perustaksi määriteltyä kestävyyttä standardin EN 60664-1 mukaisesti (mitoitussyöksyjännite). Sähköllä toimivien laitteiden kannalta eristysten mitoitusta tarkastellaan lisää kappaleessa 2.2.1.

Taulukko 2.1 Laitteilta vaadittuja nimellisiä ylijännitteen keston arvoja

	Laitteille vaadittu hetkellinen ylijännitteen kesto kV (impulse voltage)			
Asennuksen nimellisjännite V	Laitteet asennuksen syöttöpisteessä (ylijänniteluokka IV)	Pää- ja ryhmä-johtojen laitteet (ylijänniteluokka III)	**Kulutuskojeet (ylijänniteluokka II)**	Erityisesti suojatut laitteet (ylijänniteluokka I)
230/400	6	4	**2,5**	1,5

Myös ylijännitesuojausta voidaan käyttää tarvittaessa ja standardisarjassa SFS 6000 annetaan myös joitakin ylijännitesuojauksen toteutukseen liittyviä ohjeita. Peruslähtökohtana on, että ylijännitesuojalaitteiden ja niiden kanssa sarjassa olevien suojalaitteiden on kestettävä turvallisesti tilapäiset ylijännitteet.

EN 61000 Electromagnetic Compatibility –sarja

Seuraavassa taulukossa 2.2 on esitetty yhteenveto standardissa EN 50160 ja kahdessa EN 61000-sarjan standardissa esitettyjen jännitteen ominaisuuksien määrittelyjen välillä.

Taulukko 2.2 Eri standardeissa esitettyjä jännitteen ominaisuuksien raja-arvoja

- EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems
- EN 61000-2-2 Electromagnetic compatibility (EMC) -- Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems
- EN 61000-6-1 Electromagnetic compatibility (EMC) -- Part 6-1: Generic standards - Immunity for residential, commercial and light-industrial environments

Ominaisuus	EN 50160	Yhteensopivuustaso EN 61000-2-2	Immuniteettitaso EN 61000-6-1
Verkkotaajuus	50 Hz ± 1%,: 99,5% 10 s keskiarvoista vuodessa. +4%/-6%: 100% ajasta	± 1Hz eli 50 Hz ± 2%	
Jakelujännitteen suuruus	U_n = 230 V (Huom. HD 472 S1)		
Jännitetason vaihtelut	± 10%, viikon aikana 95% 10 min. rms +10…-15% 100% ajasta Huom. HD 472 S1 sov.		
Nopeat jännitemuutokset - suuruus - välkynnän häiritsevyysindeksi	Yleensä <5%. …10% muutamia kertoja päivässä joissain olosuhteissa. Plt≤1 95% viikosta	…3% normaalisti. >3% harvemmin. Poikkeuksellisesti esim. +/- 10% muutamia kymmeniä s. P_{st} =1, P_{lt} =0,8	
Jännitekuopat	Suurin osa <1s, <60% ΔU, Joillain alueilla 10-15% hyvinkin usein (…1000/a)	Informatiivinen liite: Kaapeliverkossa 10…100 vuodessa	30%, 0,5 jaksoa, toiminta jatkuu. 60%, 5 jaksoa, palautuu toimintaan
Lyhyet keskeytykset	Kymmeniä…satoja/a. n. 70% voi olla < 1 s		>95%, 250 jaksoa, palautuu toimintaan
Pitkät keskeytykset	<10…50 kpl/a, >180 s		>95%, 250 jaksoa, palautuu toimintaan
Johtimen ja maan väliset tilapäiset käyttötaajuiset ylijännitteet	<1,5 kV		
Johtimen ja maan väliset transienttiylijännitteet	Yleensä <6 kV, joskus ylikin	Informatiivinen liite: …2 kV tyypillinen, …6 kV ja ylikin tallennettu	± 2 kV, 1,2/50 (8/20) μs
Jakelujännitteen epäsymmetria	Vastakomponentti 0…2%, viikon aikana 95% 10 min. rms. …3% joillakin alueilla	Vastakomponentti 2%, …3% joillakin alueilla	
Harmoninen yliaaltojännite	6% 5., 5% 7., 3,5% 11., 3% 13. jne., THD≤8%	6% 5., 5% 7., 3,5% 11., 3% 13. jne., THD≤8%	
Epäharmon. yliaaltojännite	Harkinnassa	P_{st} =1	
Verkon signaalijännitteet	0,1…0,5 kHz 9%, 0,5...1 kHz 9...5%, 1...10 kHz 5%, 10...100 kHz 5...1% 99% päivästä 3 s. arvot	110…3000Hz: 2…5%, tai 0,1…0,5 kHz 9%, 0,5...1 kHz 9...5% tai vrt. harm. yliaaltoj.	

Standardi EN 50160

Eurooppalainen standardi EN 50160:1999 käsittelee jakelujännitteen ominaisuuksia sähkönkäyttäjän liittämiskohdassa. Standardi on vahvistettu suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi SFS-EN 50160:2000. Standardissa esitetään jännitteen pääominaisuudet sähkönkäyttäjän liittämiskohdassa yleisissä pien- ja keskijännitteisissä sähkönjakeluverkoissa normaaleissa käyttöolosuhteissa. Standardia EN 50160 ei ole harmonisoitu EMC- tai pienjännitedirektiivin alle. Sähkön laadun tulee kuitenkin täyttää em. standardin vaatimukset ellei toisin ole sovittu.

Edellisellä sivulla on esitetty karkea yhteenveto standardissa EN 50160 ja kahdessa EN 61000 sarjassa olevan standardin esiintyvistä lukuarvoista. Merkille pantavaa standardin EN 50160 osalta on, että siinä käsitellään ylijännitteitä vain karkeasti suuntaa-antavasti.

Sähkölaitteita valmistava teollisuus on ollut huolestunut mahdollisista laitestandardeihin tulevista viittauksista standardiin EN 50160. Mm. ORGALIME:n mukaan huolenaiheena ovat olleet erityisesti EN 50160:ssa mainitut potentiaaliset ylijännitetasot sekä jännitevaihtelualue, joka ei ota huomioon standardijännitteitä koskevaa standardia IEC 60038 ja sallii suurempia toleransseja ja suurempia transienttiylijännitteitä kuin tuoteturvallisuustesteissä käytetään. ORGALIME on eurooppalainen liitto, joka edustaa mm. sähkölaitteita valmistavaa teollisuutta.

Standardin EN 50160 soveltamisen tueksi on CENELEC:in toimesta laadittu myös soveltamisopas ’Guide to the Application of the European standard EN 50160’. Joitakin huomioita sen tekstistä on seuraavassa:

- Tavoitteena on ollut tarjota standardiin liittyvää taustainformaatiota ja selityksiä.
- Pyritään selkiyttämään, että standardi käsittelee jakelujännitteen ominaisuuksia sähkönkäyttäjän jakeluverkkoon liittämiskohdassa eikä käsittele asiakkaan asennuksia ja laitteita. Tämä on sama paikka, johon viitataan myös turvallisuutta koskevissa standardeissa. Tällä on vaikutusta mm. esitettyjen indikatiivisten ylijännitearvojen suuruuteen ja tavalliset kulutuslaitteet kuuluvat eri ylijännitekategoriaan.
- Standardin määritellään olevan verkonhaltijan ja yksittäisen asiakkaan bilateraalisen sopimuksen perusta.
- Jännitetason vaihteluista todetaan, että CENELEC 109th Technical Board on sopinut, että vuoteen 2008 asti pienjännitteen hyväksyttävä vaihtelualue tulee olla HD 472 S1:ssä määritellyn mukainen.

2.2 Ylijännitekestoisuusvaatimusten huomioonotto ja sähkölaitteiden yhteensopivuus

Sähkölaitteiden tulee täyttää direktiivien vaatimukset ja yleinen tapa on osoittaa, että laitteet täyttävät direktiivien mukaisesti yhdenmukaistettujen (harmonisoitujen) standardien vaatimukset **Pienjännitedirektiivi pyrkii varmistamaan sähkölaitteiden käyttöön liittyvän turvallisuuden ja EMC-direktiivi riittävän häiriöiden sietokyvyn.** Tarkemmin direktiivien sisältöä käsiteltiin kappaleen 2.1 alussa.

2.2.1 Turvallisuusvaatimukset

<u>Turvallisuuden osalta</u> keskeinen pienjännitedirektiivin mukaisesti yhdenmukaistettu perusstandardi on EN 60664-1 'Insulation coordination for equipment within low-voltage systems. Principles, requirements and tests', joka käsittelee pienjänniteverkon sähkölaitteiden eristyskoordinaatiota. Se määrittelee vaatimukset eristysväleille, pintaväleille sekä kiinteille eristyksille. Tämän perusstandardin tavoitteena on ollut antaa perusteet tuoteperhe- ja tuotekohtaiselle standardoinnille. Tuoteperhe- ja tuotestandardeissa sovellettavat vaatimukset ovat osittain em. standardia vaativampiakin.

Mikäli laite täyttää standardissa esitetyt impulssijännitteen kestävyyden mitoistusarvoihin (mitoitussyöksyjännite) perustuvat etäisyyksiä koskevat minimiarvot ilmaväleille ja pintaväleille, ei erillisiä jännitetestejä näiden suhteen vaadita. Standardissa esitettyjen mitoitustaulukoiden taustana on riittävä **eristyksillä** saavutettava ylijännitekestoisuus, joka perustuu määriteltyihin ylijänniteluokkiin, nimellis- ja toimintajännitteisiin, likaantumisluokkiin sekä käytettyihin eristysmateriaaleihin. Jos esim. ilmaväleille käytetään taulukkoarvoja pienempiä etäisyyksiä voidaan vaatimustenmukaisuus osoittaa myös jännitekokeella. Laitestandardeissa esiintyy eristysten osalta osin em. standardia vaativampiakin vaatimuksia, jotta nimellinen kestojännitevaatimus saavutettaisiin kaikissa olosuhteissa. Hetkellisen impulssiylijännitteen keston mitoitusarvojen osalta noudatetaan kuitenkin yleisesti samoja periaatteita.

Standardille EN 60664-1 on laadittu myös soveltamisopas EN 60664-2-1. Siinä normaalien pienjännitelaitteita koskien esitetään mm. seuraava esimerkki:
230 V yksivaiheisen ylijänniteluokan II sähkölaitteen peruseristyksen mitoitus. Tähän luokkaan kuuluvat yleisesti kotitalouksissa ja toimistoissa käytettävät sähkölaitteet. Vaatimukset ovat eri osille:

1. **Verkkosyöttöön kytkettävät piirit**
    - nimellinen syöksyjännitekestoisuus **2500 V** -> ilmaväli 1.5 mm
    - nimellisjännite 230 V -> pintaväli 2.5 mm
    - likaantumisluokka 2
    - eristysmateriaali CTI GR III

2. **Suojatut elektroniikka piirit (ylijänniteluokka I)**
    - suurin arvioitu syöksyjännite 1500 V -> ilmaväli 0.5 mm
    - toimintajännite 230 V -> pintaväli 0.56 mm
    - likaantumisluokka 1
    - eristysmateriaali CTI GR I
3. **Muut piirit, jotka eivät ole kytkettyjä verkkosyöttöön**
    - mitoitus toimintajännitteen ja arvioitujen ylijännitteiden mukaan

Myös lisäeristykset, vahvistetut eristykset sekä toiminnalliset eristykset mitoitetaan vastaavanlaiseen tapaan.

Mikäli turvallisuusstandardeissa vaadittuja ilmavälejä ei saavuteta, voidaan riittävä ylijännitekestoisuus osoittaa myös jännitekokeilla.

Tuotestandardeissa esitetään vastaavantapaisia mitoitustaulukoita kuin em. perusstandardissakin, mutta esim. ilmavälejä on voitu hieman suurentaa, jotta sallitaan ilmavälin pienentyminen laitteen käyttöiän aikana (syynä esim. vääntyminen, kuluminen, osien liikkuminen).

Ylijännitekestoisuusvaatimukset voidaan siis täyttää yleensä riittävillä ilma- ja pintavälien mitoituksella sekä eristysmateriaalien valinnalla. <u>Täydelliselle laitteelle tehtäviä ylijännitetestejä ei vaadita tehtäväksi siten, että laite olisi testin ajaksi kytkettynä verkkosyöttöön normaalitoimintatilaan</u> ja mahdolliset testit voidaan kohdistaa vain eristysrakenteisiin.

2.2.2 EMC vaatimukset

<u>Sähkölaitteiden yhteensopivuudessa</u> sovelletaan puolestaan sähkömagneettisen häiriönsiedon osalta EMC-standardeja. Yleiset EMC-standardit ovat EN 61000 –sarjassa. Tuoteperhe- ja tuotekohtaisissa standardeissa annetaan tarkempia määrityksiä mm. laitteiden toimintakriteerien osalta erilaisten häiriöiden suhteen.

EMC-direktiivin alaisten laitteiden EMC-vaatimuksina sovelletaan yleisten (generic) EMC standardien vaatimuksia, mikäli ei ole olemassa erityistä tuote- tai tuoteperhestandardia. Käytännössä näissä sovelletaan yleisesti samoja vaatimuksia, mutta kerrotaan tarkemmin, miten laitteiden toimintaa tulee kontrolloida ja arvioida kokeiden aikana.

Standardissa EN 61000-6-1:2001 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 6-1: Generic standards. Immunity for residential, commercial and light-industrial environments määritellään sähkölaitteiden vaihtojännitesyötölle mm. seuraavia sietovaatimuksina:

- nopeat transientit +/- 1 kV (5/50 ns, purske, 15 ms/ 300 ms, 5 kHz)
- **syöksyjännite +/- 1 kV syöttöjohtimien välillä** (vaihe-vaihe, vaihe-nolla)
  ja **+/- 2 kV syöttöjohtimien ja maan välillä** (vaihe-maa, nolla-maa)

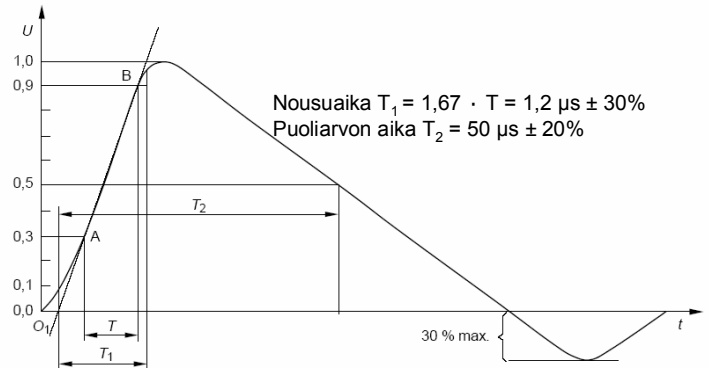
Syöksyjännitetesti simuloi ilmastollisia ylijännitteitä ja jakeluverkossa syntyviä kytkentäylijännitteitä.

Syöksyjännitteen sietoisuutta koskevien vaatimusten täyttyminen perustuu standardin EN 61000-4-5 mukaisiin testeihin. Verkkosyötössä olevaan laitteeseen kohdistetaan testipulssit 0, 90, 180 ja 270 asteen vaihesiirtokulmassa. Pulsseja kohdistetaan sekä positiivisena että negatiivisena 5 kpl kussakin kohdassa vähintään 1 minuutin välein. Tuotestandardeissa määrää on voitu joiltakin osin vähentää, mikäli oletetaan, että vaiheensiirtokulmalla ei ole merkitystä. Testaus tehdään em. jännitetasojen lisäksi myös joillakin alemmilla jännitetasoportailla sen varmistamiseksi, että mm. mahdollinen laitteen sisäinen ylijännitesuojaus toimii oikein.

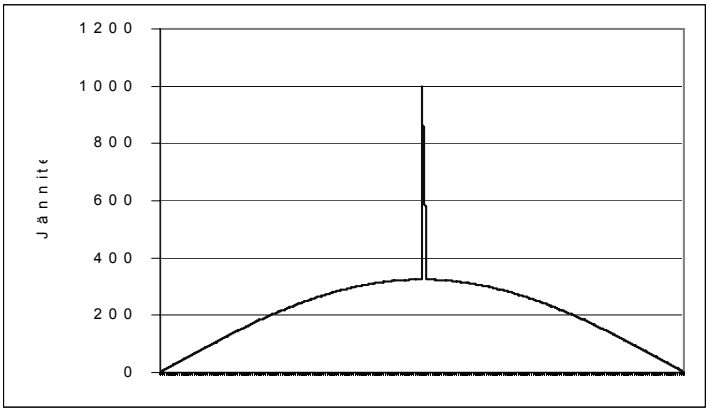
Kokeessa jännitepulssi kerrostetaan standardin mukaisen liitäntäpiirin avulla testattavan laitteen syöttöjännitteeseen ja testattava laite on kytkettynä verkkosyöttöön liitäntäpiirin kautta ja on **normaalissa toimintatilassa**.

Kuvassa 2.1 on esitetty testauksessa käytettävän syöksyjännitegeneraattorin antama jännitepulssin muoto silloin, kun testattavaa laitetta ei ole kytkettynä, sekä kuvassa 2.2 myös kerrostuneena normaaliin vaihejännitteeseen. Esimerkki laitteiston periaatteellisesta testikytkennästä on kuvassa 2.3. Käytännössä mm. induktanssit ja testattava laite vaikuttavat siihen, millainen jännite on mitattavissa laitteen liittimistä. Ilman testattavaa laitetta jännitehuippu on syöksyjännitegeneraattorin tyhjäkäyntihuipun suuruusluokkaa.

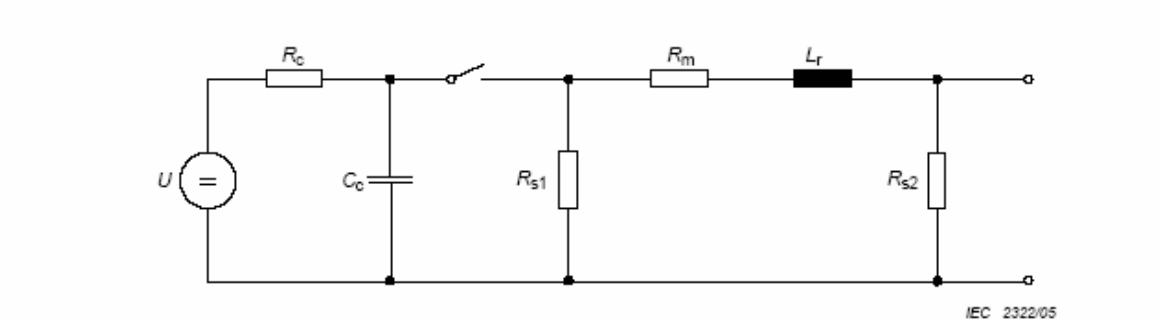
Vaadittava toimintakriteerit määritellään tarkemmin tuoteperhe- ja tuotestandardeissa. Yleisesti kotitaloudessa ja toimistoissa käytettäville laitteille (mm. kotitalouskojeet, tietotekniikan laitteet, video- ja tv-laitteet) sovelletaan toimintakriteeriä B, jonka mukaan toimintakyky saa jonkin verran muuttua, mutta testin jälkeen laitteen pitää jatkaa toimintaansa normaalisti ilman käyttäjän toimenpiteitä.

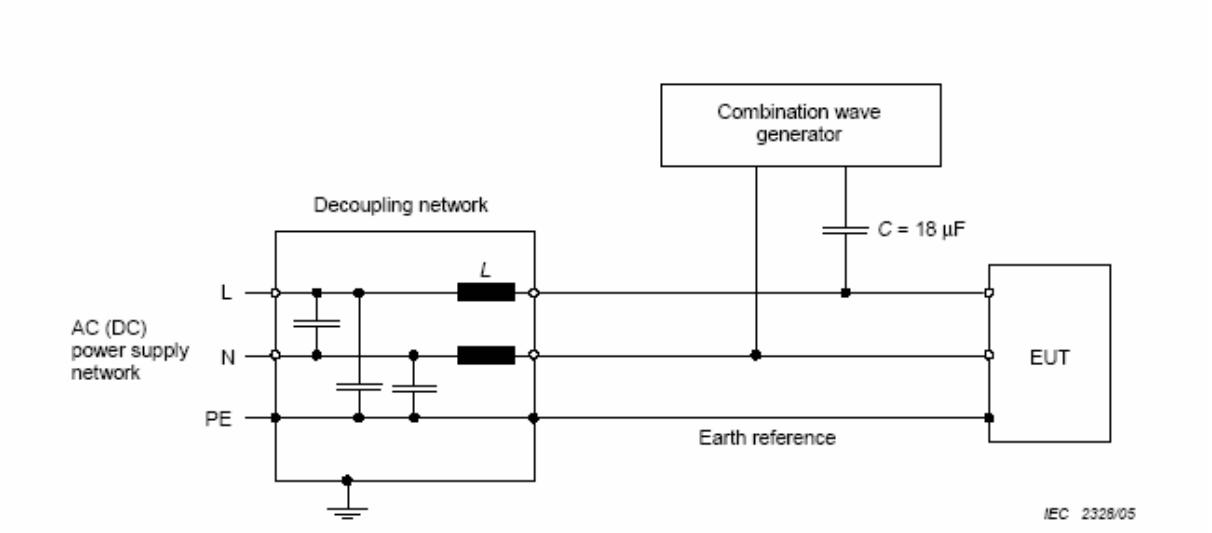


Kuva 2.1 Syöksyjännitepulssin (1,2/50 µs) muoto



Kuva 2.2 Syöksyjännitepulssin kerrostuminen normaaliin vaihejännitteeseen puolijakson keskellä





Kuva 2.3 Standardipulssin tyhjäkäynnissä antava syöksyaaltogeneraattori ja sen antamanjännitteen esimerkkikytkentä testikappaleelle EUT

3. KESKIJÄNNITEVERKON MAASULUT

3.1 Maasulkuilmiö keskijänniteverkossa

Maasulku on jännitteisen osan ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan välinen eristysvika. Yhteys maahan voi syntyä joko jonkin verkon suojamaadoitetun kohdan kautta (esim. ylilyönti muuntajan suojakipinävälissä) tai jossakin maadoittamattomassa kohdassa (esim. puun kaatuminen johdolle tai johtimen putoaminen maahan). Maasulku voi olla yksi- tai useampinapainen riippuen siitä, kuinka monessa järjestelmän virtajohtimista tällainen eristysvika esiintyy samanaikaisesti.

Maasulut tai maasuluista alkaneet viat muodostavat keskijänniteverkkojen (mm. 20 tai 10 kV) yleisimmän vikaryhmän. Suurin osa maasulkuvioista on yksivaiheisia maasulkuja. Joskus yksivaiheisena maasulkuna alkanut vika laajenee kaksoismaasuluksi, jolloin verkko on samanaikaisesti maasulussa kahdessa eri paikassa ja eri vaiheissa. Huomattavasti yleisemmin laajenee maasulkuna alkanut vika kuitenkin paikalliseksi kaksivaiheiseksi tai kolmivaiheiseksi oikosuluksi. Avojohtoverkon maasulkuvioista jopa runsaat yhdeksän vikaa kymmenestä ovat ohimeneviä vikoja, jotka selviävät jälleenkytkentöjen avulla. Pysyviä maasulkuja on tilastoitu viime vuosina noin 2...3 kpl/100km,a, mikä on lähes samaa suuruusluokkaa kuin pysyvien oikosulkuvikojen määrä. Määrät kuitenkin vaihtelevat alueittain ja verkkojen rakenteen mukaan sekä myös tilastointitavoista riippuen. Valtaosa pysyvistä vioista sattuu verkon suojamaadoittamattomissa kohdissa.

Tarkastellaan rakenteeltaan symmetriseksi oletettua tähtipisteestään maasta erotettua kolmivaiheverkkoa. Terveessä tilassa vaihejännitteet ovat maahan nähden symmetrisiä eli niiden summa on nolla. Samoin vaihejohtimien maakapasitanssien kautta kulkevien varausvirtojen summa on nolla. Oletetaan lisäksi, että verkko voidaan kuvata keskitetyin kapasitanssein ja muut verkon impedanssit voidaan jättää sijaiskytkennästä pois. Näin voidaan menetellä kohtuullisella tarkkuudella, koska johtojen ja muuntajien pitkittäisimpedanssit ovat maasulkuvirtapiirissä niiden kanssa sarjaan kytkeytyvien maakapasitanssien edustamien reaktanssien rinnalla pieniä ja toisaalta maakapasitanssien rinnalle kytkeytyvä verkon resistiivisiä vuotohäviöitä vastaava impedanssi on paljon maakapasitanssien edustamaa reaktanssia suurempi. Myös johtimien keskinäisimpedanssien vaikutus on mitätön. Kuormitusten aiheuttamia jännitehäviöitä johdoilla ei myöskään oteta huomioon.

Kun sattuu yksivaiheinen maasulku ja vaihejohdin on johtavassa yhteydessä maan kanssa, virtapiiri sulkeutuu vaiheiden maakapasitanssien kautta. Syntyneessä epäsymmetrisessä tilassa eri vaiheiden jännitteet maan suhteen ovat muuttuneet ja varausvirtojen summa poikkeaa nollasta aiheuttaen vaihejohtimesta vikapaikan kautta maahan kulkevan maasulkuvirran. Myös verkon tähtipisteen ja maan välinen jännite eli nollajännite kasvaa maasulun seurauksena. Se onkin maasulun indikoinnin kannalta eräs keskeinen suure ja useimmat maasulkusuojausjärjestelmät perustuvat ainakin osittain nollajännitteen muutosten seurantaan. Vaiheiden väliset verkon pääjännitteet eivät sen sijaan muutu merkittävästi. Siten maasulku ei juurikaan vaikuta kuormituksiin ennen katkaisijan avautumista.

Maasulkuvirran suuruus on käytännöllisesti katsoen riippumaton siitä, missä kohdassa verkkoa maasulku sattuu. Vaiheiden jännitteisiin maan suhteen ja maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat:

- normaali vaihejännite
- maakapasitanssien suuruus
- vikaimpedanssi

Maasulkuvirtapiiriin kytkeytyy koko galvaanisesti yhteen kytketty keskijänniteverkko.

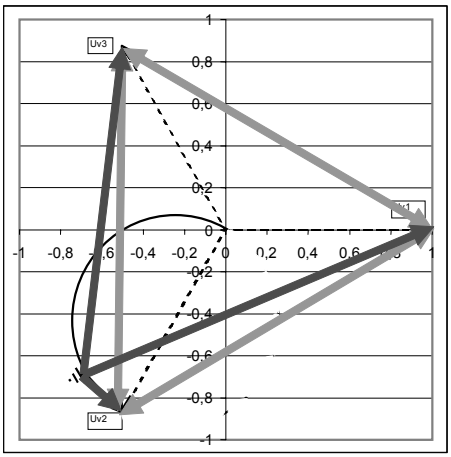
Jos vikaimpedanssi on nolla, kohoavat terveiden vaiheiden jännitteet maan suhteen pääjännitteen suuruisiksi ja niiden varausvirrat kasvavat. Viallisen vaiheen jännite maata vastaan puolestaan menee nollaksi ja myös varausvirta menee nollaksi. Terveiden vaiheiden varausvirrat kiertävät muuntajien (ja generaattoreiden) kautta vialliseen vaiheeseen ja edelleen sitä pitkin vikakohtaan. Havainnollisuuden vuoksi on kuitenkin esitetyissä sijaiskytkennöissä yleensä jätetty piirtämättä myös jakelumuuntajat virran kulkuteiksi, koska tällä ei ole oleellista käytännön merkitystä jatkossa tarkasteltavien suureiden laskemisessa.

Jos vikavastus poikkeaa nollasta, poikkeaa kaikkien vaiheiden jännite maan suhteen nollasta ja varausvirtaa kulkee myös viallisen vaiheen maakapasitanssin kautta.

Kuvassa 3.1 on esitetty osoitindiagrammi maasulussa maasta erotetussa verkossa. Tähtipistejännite piirtää diagrammissa vikaresistanssin funktiona puoliympyrän, jonka halkaisijana on viallisen vaiheen jänniteosoitin. Vikaresistanssin ollessa nolla on nollajännitteen itseisarvo vaihejännitteen suuruinen. Terveen vaiheen jännite voi suurimmillaan nousta 1,05-kertaiseksi pääjännitteeseen nähden. Tämä tapahtuu silloin, kun vikaresistanssi on 37 % maakapasitanssien summaa vastaavasta impedanssista. Jos lisäksi otettaisiin huomioon verkon pitkittäisimpedanssit, voi terveen vaiheen jännite nousta vielä jonkin verran em. arvoa suuremmaksikin.

Dyn-kytkentäisen muuntajan ensiöpuolen pääjännitteiden muutokset näkyvät yhtä suurina suhteellisina muutoksina toisiopuolen vaihejännitteissä Yksivaiheisessa maasulussa jännite-kolmio säilyy mahdollisia transientti-ilmiöitä lukuunottamatta käytännössä ennallaan ja

jatkuvassa tilassa vika ei näy juurikaan Dyn-muuntajan pienjännitepuolella. Mikäli myös verkon pitkittäisimpedanssit otetaan huomioon, voi pienjännitepuolen jännitteissä näkyä pienehköjä, käytännön kannalta kuitenkin epäoleellisia, muutoksia jännitetasoissa.



Kuva 3.1 Verkon jännitteet maasta erotetun verkon maasulussa

Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteen ja maan välille on kytketty yksi tai useampia kuristimia. Kuristimen kautta kulkeva virta kompensoi kapasitiivista maasulkuvirtaa ja siten pienennetään yksivaiheisen maasulun vikavirtaa. Tavoitteena voi olla joko osittain kompensoitu tai täysin kompensoitu verkko. Kuristimien sijoittelu verkkoon voi olla joko keskitetty tai hajautettu. Täysin kompensoidussakin verkossa vikapaikan kautta jää kulkemaan ns. jäännösvirta, joka johtuu kuristimen sijaiskytkennän resistiivisestä osasta ja verkon vuoto- ja häviöresistansseista sekä yliaalloista.

Valokaari sammuu virran nollakohdassa, mutta voi syttyä uudelleen, jos palaavan jännitteen nousunopeus on riittävän suuri. Palaavan jännitteen nousunopeus ja muoto riippuvat verkon kapasitansseista ja vuotovastuksesta. Sammutetussa verkossa nousunopeuteen vaikuttaa lisäksi sammutuskuristimen, sen rinnalle kytketyn resistanssin ja verkon maakapasitanssien muodostaman piirin vaimennuskerroin.

Maasulussa vaihejohtimen joutuminen galvaaniseen yhteyteen maan kanssa saa aikaan muutosilmiön, jossa viallisen vaiheen kapasitanssit purkautuvat ja terveiden vaiheiden kapasitanssit varautuvat jatkuvuustilan jännitteeseen. Viallisen vaiheen varaus purkautuu värähdellen maasulkukohdan ja verkon kautta transienttina, jonka taajuus vaihtelee 500 Hz:stä aina useisiin kHz:eihin saakka. Terveiden vaiheiden varausvirta joutuu kulkemaan muuntajien käämitysten kautta. Taajuus jää tällöin matalammaksi, tyypillisesti välille 150...1000 Hz. Varaustransientti on tavallisesti dominoiva komponentti kokonaistransientissa [Lehtonen, M., Transient analysis for ground fault distance estimation in electrical distribution networks. VTT Publications no 115, Espoo 1992, 181 p. + app.].

Transienttivirrat aiheuttavat verkon impedanssien kautta kulkiessaan jännitehäviöitä, jotka aiheuttavat muutoksia vaiheiden ja maan välisten jännitteiden lisäksi pääjännitteissäkin, ja pääjännitteiden muutosilmiöt aiheuttavat edelleen muutosilmiöitä myös pienjänniteverkon puolelle. Vikaresistanssilla on transientteihin vaimentava vaikutus. Transientit ovat suurimmillaan, kun vika tapahtuu lähellä keskijänniteverkon vaihejännitteen hetkellistä huippuarvoa.

Vian aikana myös jatkuvuustilassa kapasitiiviset varausvirrat ja maasulkuvirta aiheuttavat jännitemuutoksia, mikä voi näkyä lähinnä pienjännitepuolen yhden vaihejännitteen lievänä nousuna. Muutos on suurimmillaan, kun kapasitiivisen maasulkuvirran ja sen kohtaaman reaktanssin tulo on suurimmillaan eli kaukana sähköasemalta tapahtuvissa vioissa. Tämän käytännön merkitys on kuitenkin yleensä vähäinen ja rajoittunee enintään joihinkin prosentteihin vian kestoaikana.

Yksivaiheisen maasulun seurauksena syntyy keskijänniteverkossa sekä käyttötaajuisia ylijännitteitä terveen vaiheen jännitteen kohotessa maan suhteen että kytkentäylijännitteitä. Ylijännitetransientteja voi syntyä seuraavissa tilanteissa:

- maasulun syntyminen
- maasulussa olevan johdon erottaminen
- maasulussa olevan johdon jälleenkytkentä
- maasulun poistuminen

Terveiden vaiheiden jännitteiden kohoaminen sekä maasulun aiheuttamat ylijännitetransientit voivat aiheuttaa verkon eristystason pettämisen jossain kohdassa ja siten vian muuttumisen esim. kaksoismaasuluksi tai maaoikosuluksi.

Maasulun aiheuttamien kytkentäylijännitteiden suuruus riippuu verkon tähtipisteen maadoitustavasta, verkon myötä-, vasta- ja nollaverkkojen resistanssi- ja reaktanssisuhteista sekä kuormitusten muutosilmiötä vaimentavista vaikutuksista.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan mittaustulosten ja simulointien pohjalta erilaisissa verkoissa erityisesti pienjännitepuolella näkyviä ylijännitteitä.

3.2 Mittaustulokset maasta erotetussa verkossa ja sammutetussa verkossa

Keskijänniteverkon vikatapausten aiheuttamia transienttijännitteitä pienjänniteverkon puolella selvitettiin sekä verkkokokeilla että simuloinneilla. Verkkokokeet tehtiin Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n verkossa maaseutualuetta syöttävällä johtolähdöllä. Verkkokokeiden perusteella voitiin varmistaa osaltaan myös simulointimallien riittävää tarkkuutta. Vikoja tehtiin verkossa kaikkiaan n. 100 kpl ja valtaosa näistä oli yksivaiheisia maasulkuja. Maasuluissa vikapaikkaa ja vika-impedanssin suuruutta vaihdeltiin mahdollisimman pienestä 1000 ohmiin.

Verkkokokeiden kohteena olleen verkon yleiskuvaus on:

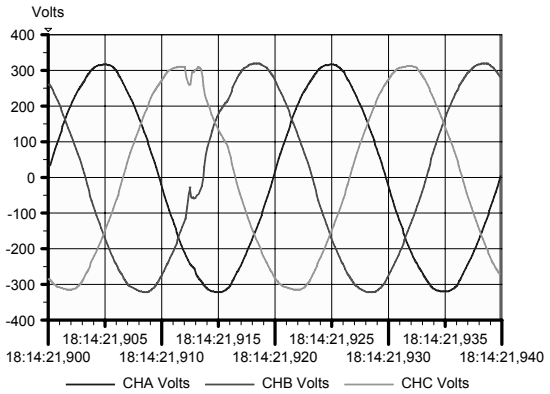
- 110 kV syöttöjohto noin 50 km
- 110/20 kV päämuuntaja 16 MVA, oikosulkuvirta 20 kV kiskostossa n. 2.9 kA
- Vikaresistanssiton maasulkuvirta noin 20…50 A kytkentätilasta riippuen
- Vikapaikan etäisyys sähköasemalta oli 0…20…40 km
    - pääosa vioista tehtiin johdon loppupäässä ja sähköasemalla vain hyvin vähän verkkoa käytettiin pääosin maasta erotettuna, mutta osin myös sammutettuna

Mittauksia tehtiin seuraavasti:

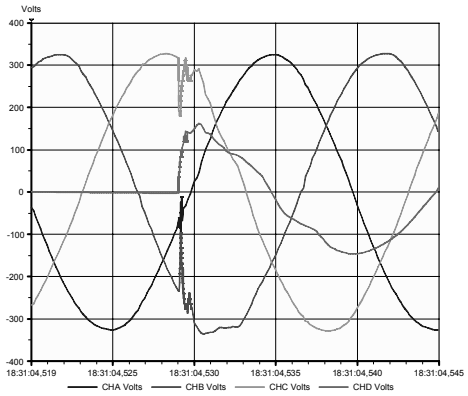
- Sähköasemalla mitattiin kj-puolen jännitteet ja johtolähdön virrat
- Pienjänniteverkon jännitteitä mitattiin sähköasemalla, vikapaikassa ja osin myös näiden puolivälissä

Kuvassa 3.2 on esimerkki sähköasemalla tehdyn pienivikaimpedanssisen maasulun aiheuttamasta transientista johtolähdön loppupäässä mitattuna. Sähköasemalla tehdyn vian aiheuttama transientti näkyi käytännössä likimain samanlaisena koko keskijänniteverkossa. Maasulkuvirta on ollut 24 A. Vika on kuitenkin sattunut jonkin verran keskijänniteverkon vaihejännitteen huipun jälkeen, minkä takia ylijännitettä ei ole syntynyt. Tyypillisesti sähköasemalla tehdyt viat ajoittuivat n. 2.5 ms huipun jälkeen.

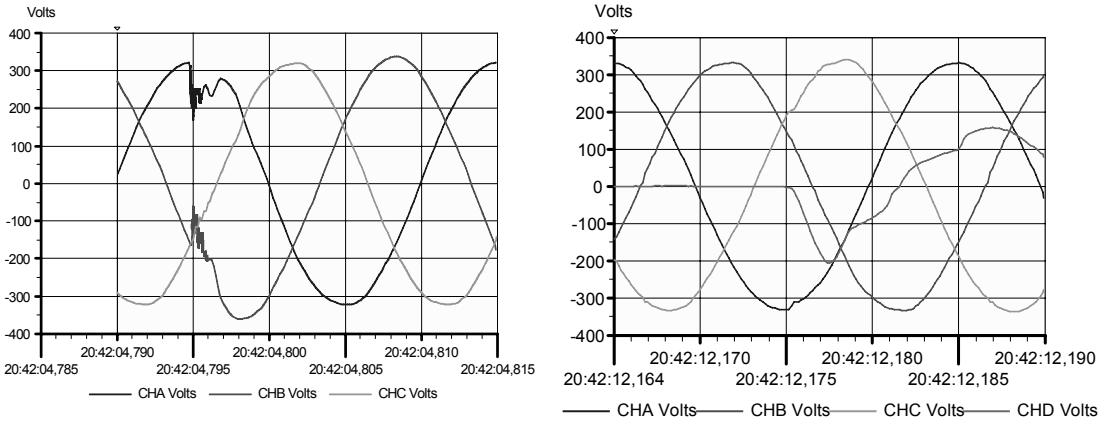
Toinen esimerkki sähköasemalla tehdyn vian vaikutuksesta on kuvassa 3.3, jossa näkyy vain vähäinen n. 10 V ylijännite.



Kuva 3.2 Esimerkki maasulun aiheuttamasta pj-verkon transientista



Kuva 3.3 Esimerkki maasulun aiheuttamasta pj-verkon transientista



Kuva 3.4 Johdon loppupäässä tehdyn pieni-impedanssisen maasulun vaikutus pienjännite-puolen vaihejännitteisiin: vasemmalla johdon loppupää ja oikealla sähköasema

Kuva 3.4 kuvaa suurimpia kokeissa mitattuja jännitteennousuja viassa, joka on tehty johdon loppupäässä. Suurin ylijännite loppupäässä on + 37 V ja sähköasemalla vaikutus on varsin pieni. Suurimmat mitatut ylijännitteet olivat vain n. 1.1 pu.

Jotta pystyttiin arvioimaan myös pahimpaan aikaan tapahtuvien transienttien suuruutta, muodostettiin verkosta myös simulointimalli ja sillä saatuja tuloksia tarkastellaan luvussa 3.3. Mittaustuloksia hyödynnettiin simulointimallinnuksen verifioinnissa.

3.3 Maasulkujen simulointi

Tietokoneen avulla toteutettavilla simuloinneilla voidaan kohtuullisin kustannuksin ja suhteellisen luotettavasti tutkia sähköverkon ilmiöitä ja niistä sähkönkäyttäjille mahdollisesti aiheutuvia häiriöitä. Hankkeen kannalta mielenkiinto kohdistui keskijänniteverkon maasulkuilmiöihin ja niistä mahdollisesti pienjänniteasiakkaille aiheutuviin häiriöihin. Sähköverkon maa-sulkuilmiöiden simulointiin käytettiin PSCAD 4.1 ohjelmistoa, joka soveltuu hyvin sähköverkon häiriöiden ja niiden siirtymismekanismien tutkimiseen. Simulointitulosten tarkkuuden arviointi edellyttää kuitenkin simuloitujen jännitteiden ja virtojen verifiointia vastaaviin kenttäkokeista saatuihin tuloksiin nähden.

PSCAD-ohjelmisto on sähköverkon transienttien eli nopeiden muutosilmiöiden simulointiin tarkoitettu ohjelmisto. Komponenttimallit perustuvat alun perin prof. Hermann W. Dommelin kehittämään menetelmään ja sen sovelluksena syntyneeseen EMTP-ohjelmistoon. Järjestelmän tilasuureita sitovat differentiaaliyhtälöt ratkaistaan numeerista integrointimenetelmää käyttäen ajanhetkinä $t = 0$, $t = \Delta t$, $t = 2\Delta t$, $t = 3\Delta t$ jne. Tuloksena saadaan sähköverkon perussuureet, jännitteet ja virrat ajan funktiona. Sähköverkon lisäksi simuloitavaan malliin voidaan sisällyttää myös mm. pyöriviä sähkökoneita.

Hankkeen eräänä tavoitteena oli löytää pahimmat yksivaiheiset maasulkutilanteet pien-jänniteasiakkaan kokemien jännitehäiriöiden kannalta. Tarkastelu tehtiin maaseutua syöttävässä avojohtoverkossa sekä taajaman maakaapeliverkossa

3.3.1 Mallinnettu avojohtoverkko

Avojohtoverkon malli perustuu kohdassa 3.2 kuvattuun Koillis-Satakunnan Sähkön verkkoon. Avojohtoverkon osalta simulointituloksia päästiin siis vertaamaan vastaaviin kenttäkokeista saatuihin mittaustuloksiin.

Maasulkukokeita tehtiin yhdellä lähdöllä. Vikakohdat sijaitsivat lähellä sähköasemaa Inhassa sekä lähdön loppupäässä Kotalassa. Em. lähtö ja tarkasteltavat jakelumuuntamot mallinnettiin PSCAD:n komponenttimallien avulla. Inhan sähköaseman syöttämän verkon maasulkuvirta normaalitilassa ilman Melko-laitteistoa oli noin 23 A, josta taustaverkon syöttämän virran osuus oli noin 17 A ja vikalähdön osuus noin 6 A. Lähdöllä maasulussa mitattu summavirta oli 24 A, kun Melko oli kytkettynä ja maasulkuvirta noin 30 A. Melkon tuottama maasulkuvirta oli siis noin 7 A. Kun Inhan ja Ähtärin sähköasemat kytkettiin yhteen,

vikalähdön summavirta oli noin 51 A ja verkon kokonaismaasulkuvirta siten noin 57 A. Vikaresistanssin ja maadoitusresistanssin suuruudeksi arvioitiin pienimmilään yhteensä 2 Ω.

Tarkasteltavia muuntamoita oli 3 kpl. Muuntamo 6072 sijaitsi Inhan sähköasemalla. Muuntamo 2091 sijaitsi Kotalan lähdön eli tarkasteltavan vikalähdön loppupäässä ja muuntamo 2104 suunnilleen tarkasteltavan vikalähdön puolivälissä.

3.3.2 Mallinnettu maakaapeliverkko

Maakaapeliverkon mallina käytettiin Helsingin Energian Pitäjänmäen keskijänniteverkosta Vaasassa ABB Oy:ssä tehtyä mallia. Maakaapeliverkon mallilla simuloituja tuloksia ei päästy verifioimaan kenttäkokeisiin nähden, koska kaapeliverkossa ei tehty maasulkukokeita. Pitäjänmäen kj-verkon mallissa syöttävä verkko on kuvattu jännitelähteenä. Päämuuntajan kytkentäryhmä on Ydy (110 / 10,5 / 21 kV) ja nimellisteho 30 MVA.

Pitäjänmäen verkosta tehty malli sisältää kaksi yksityiskohtaisesti mallinnettua maakaapelilähtöä. Kahdella lähdöllä on yhteensä noin 17 km maakaapelia. Myös ao. kahden lähdön jakelumuuntamot (yhteensä 38 kpl) ja niiden kuormitukset on mallinnettu. Todellinen kytkentätilanne ei vastaa jakorajojen osalta simuloinneissa käytettyä tilannetta vaan tarkasteltava vikalähtö on lyhyempi ja siten lähdöllä on myös vähemmän muuntamoita kuin simuloidussa tilanteessa.

Simulointien tavoitteena oli etsiä pahimpia esiintyviä vikatilanteita ja siksi vikalähtö oli valittu mahdollisimman pitkäksi. Taustaverkko on mallinnettu maakapasitanssimallina sekä kuormituksena. Verkkomalli sisältää myös 110 kV ja 20 kV katkaisijat. Vikaresistanssin suuruudeksi arvioitiin 2 Ω, minkä arvioitiin vastaavan suunnilleen maadoitusresistanssia ja valokaariresistanssia. Seuraavassa on lueteltu keskijänniteverkon mallin komponentit:

- lähtö 1:
  - noin 9 km maakaapelia
  - 18 muuntamoa (0,3 – 1,0 MVA, Dyn 11)
  - kuormitukset 10 % muuntajan nimellistehosta
- lähtö 2:
  - 7,7 km maakaapelia
  - 20 muuntamoa (0,315 – 2,0 MVA, Dyn 11)
  - kuormitukset 10 % muuntajan nimellistehosta
- taustaverkko:
  - maakapasitanssimalli
  - maasulkuvirta 150,9 A
  - kuormitus: 7,534 MVA, $\cos\varphi = 0,9$

Pitäjänmäen verkkomallin pohjalta tehtiin myös yleinen maakaapeliverkon malli, joka vastaa suunnilleen laajuudeltaan ja ominaisarvoiltaan Pitäjänmäen verkon mallia. Tässä raportissa esitetyt maasta erotetun kaupunkiverkon simulointitulokset perustuvat Helsingin Energian Pitäjänmäen keskijänniteverkon malliin. Johtopäätösten tekemisessä on hyödynnetty myös yleisen maakaapeliverkon mallilla saatuja tuloksia mm. kompensoidun verkon osalta. Yleinen maakaapeliverkon malli sisältää seuraavat osat:

- syöttävää verkkoa kuvaava jännitelähde
- päämuuntaja 40 MVA, YNyn0, 110 kV/21 kV
- tähtipisteen maadoitus (maasta erotettu / kompensoitu)
- 2 mallinnettua maakaapelilähtöä
    - muuntamot ja niiden kuormitukset
- taustaverkko (maakapasitanssimalli) ja kuormitus
- 110 kV ja 20 kV katkaisijat

Seuraavassa on esitetty lähtöjen ja taustaverkon kuvaus:

- lähtö 1:
    - 6 km maakaapelia, AHXAMK-W 240
    - 3 muuntamoa (0,8 MVA, Dyn 11) ja niiden kuormitukset
    - muuntamoiden kuormitukset 50 % nimellistehosta
- lähtö 2:
    - 6 km maakaapelia AHXAMK-W 240
    - lähdön kuormaa kuvaava kuormamalli
    - kuormitus sama kuin lähdöllä 1
- taustaverkko:
    - maakapasitanssimalli
    - maasulkuvirta 150 A
    - päämuuntajan kuormitusaste 50 %
    - koko verkon maasulkuvirta 195 A

Kaupunkiverkon simuloinneissa käytettiin kahta vikakohtaa, lähdön alussa ja lopussa 6 km etäisyydellä sähköasemasta. Tarkasteltavia muuntamoita oli 3.

- M1: 0,6 km sähköasemalta
- M2: 3,0 km sähköasemalta
- M3: 6,0 km sähköasemalta

3.3.3 Maasta erotetun maaseutuverkon maasulkujen simulointitulokset

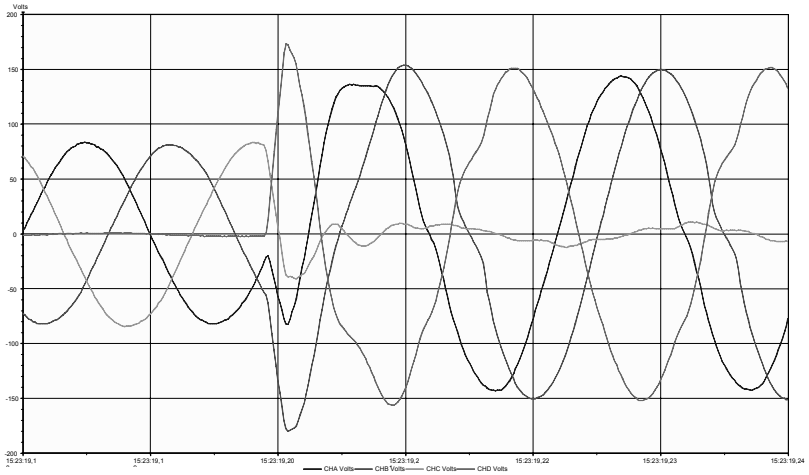
Maaseutuverkon simuloinneilla pyrittiin löytämään pienjänniteasiakkaiden kannalta pahimmat maasulkutilanteet. Tavoitteena oli siis kartoittaa niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat maasulkutilanteessa pj-asiakkaan kokeman jännitetransientin tai jännitteennousun suuruuteen. Aluksi simulointituloksia verrattiin vastaaviin kenttäkokeista saatuihin mittaustuloksiin, jotta saatiin kuva simulointitulosten tarkkuudesta. Seuraavassa on esitelty muutamia esimerkkejä mitatuista ja simuloiduista maasulkuilmiöistä. Vikalähdöllä tarkasteltavien muuntamoiden sijainnin osoittamiseen käytetään seuraavia lyhenteitä:

- a – muuntamo suunnilleen lähdön alkupäässä
- p – muuntamo suunnilleen lähdön puolivälissä
- l – muuntamo suunnilleen lähdön loppupäässä

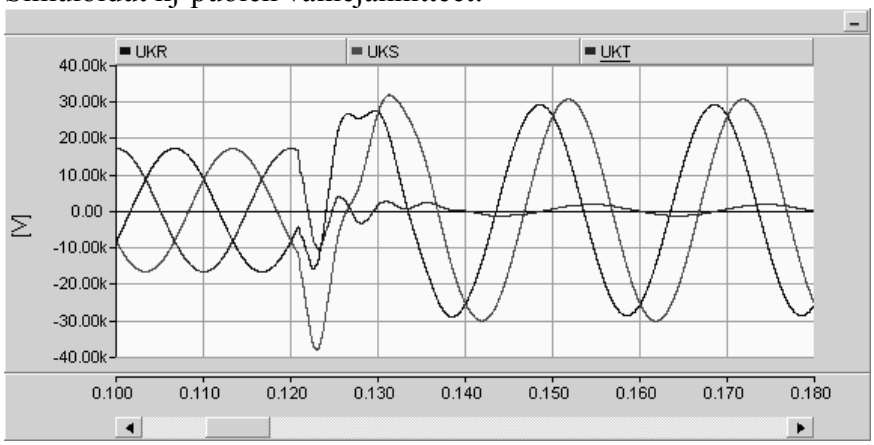
3.3.3.1 Simulointitulosten vertaaminen vastaaviin mittaustuloksiin

Maasta erotettu verkko, vika Kotalassa, vikaresistanssi 0 Ω, ilman Melkoa

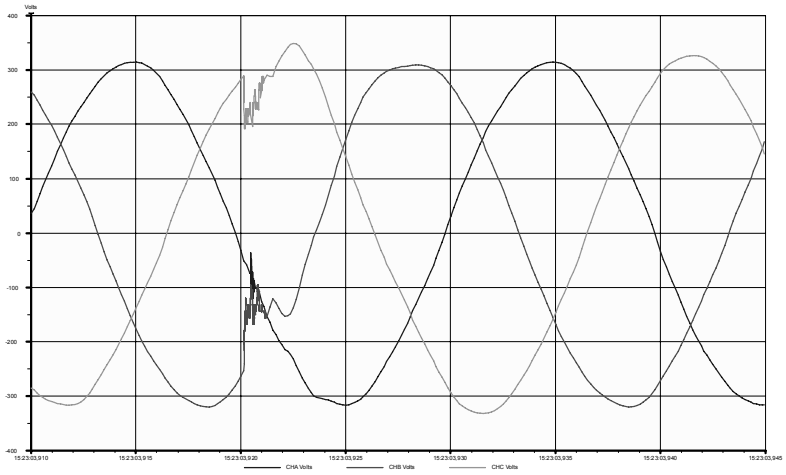
Mitatut kj-puolen vaihejännitteet:



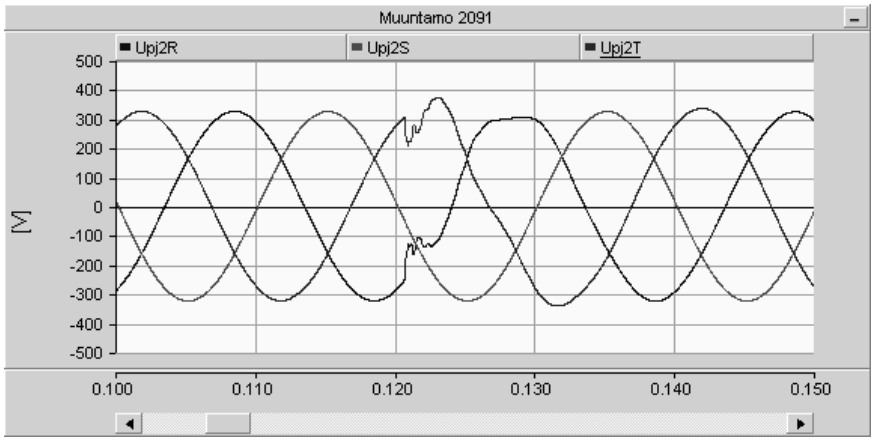
Simuloidut kj-puolen vaihejännitteet:



Mitatut pj-puolen vaihejännitteet muuntamolla 2091 (l):

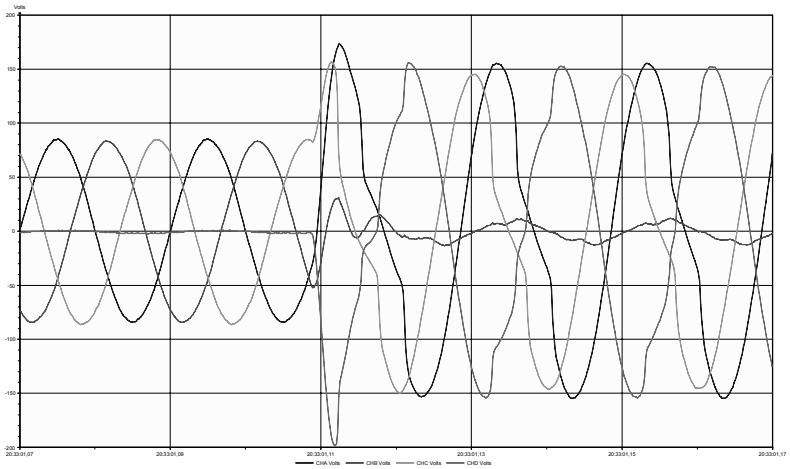


Simuloidut pj-puolen vaihejännitteet muuntamolla 2091 (l):

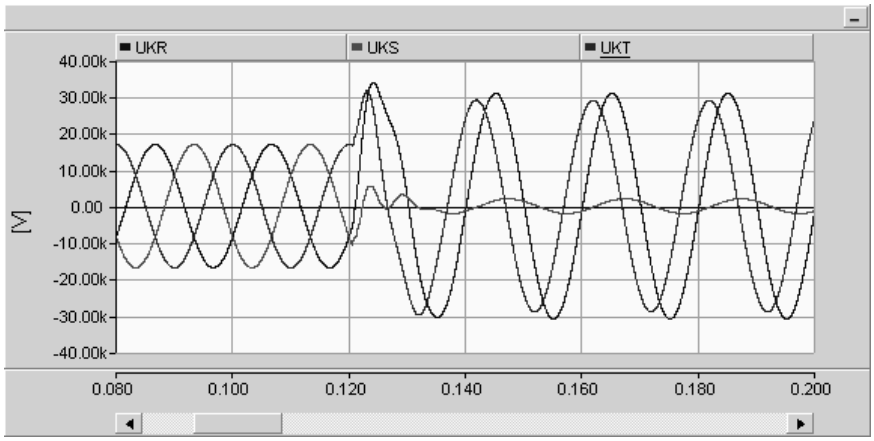


Maasta erotettu verkko, vika Kotalassa, vikaresistanssi 0 Ω, Melko kytkettynä

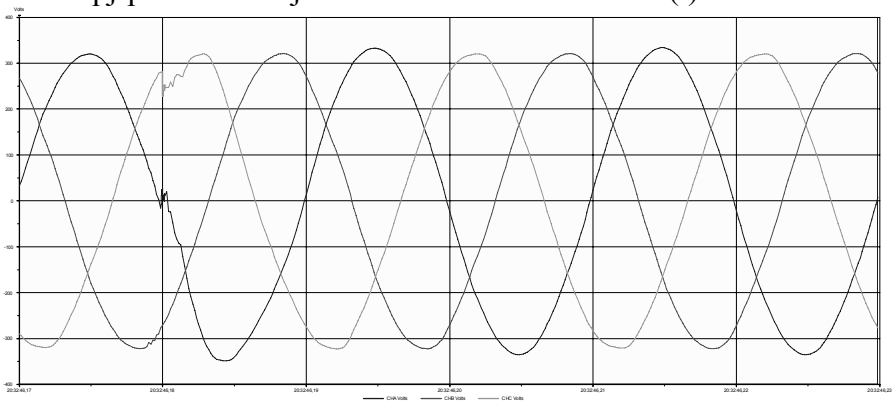
Mitatut kj-puolen vaihejännitteet:



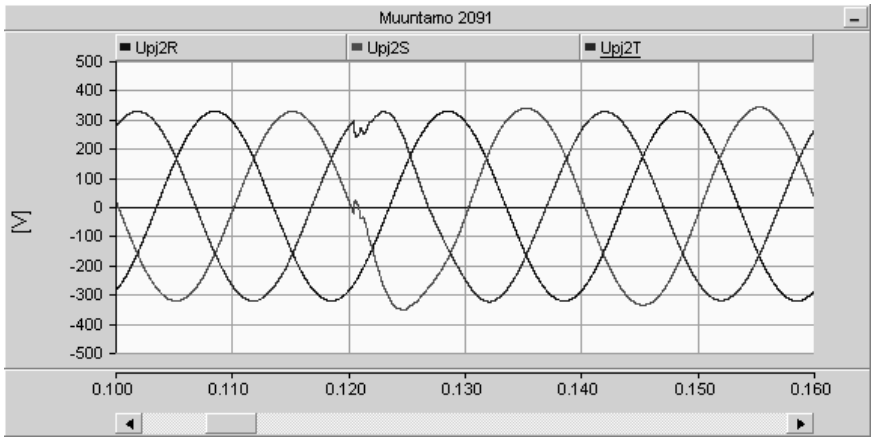
Simuloidut kj-puolen vaihejännitteet:



Mitatut pj-puolen vaihejännitteet muuntamolla 2091 (l):



Simuloidut pj-puolen vaihejännitteet muuntamolla 2091 (l):



Yhteenvetona simulointien verifioinnista voidaan todeta, että simuloidut kj- ja pj-puolen jännitetransientit vastaavat suuruusluokaltaan vastaavia mitattuja transientteja.

3.3.3.2 Pahimmat maasulkutilanteet: alkutilan transientit

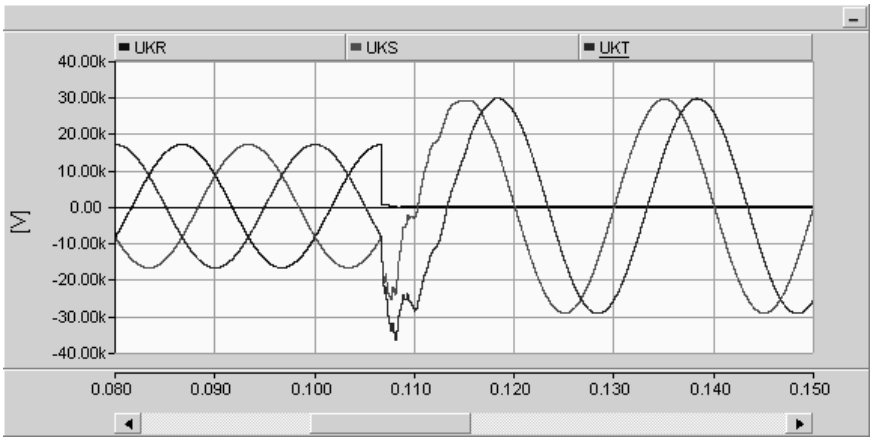
Yksivaiheinen maasulku aiheuttaa maasta erotetussa keskijänniteverkossa syntyhetkellään kohtalaisen voimakkaan muutosilmiön, joka näkyy transienttina vaihejännitteissä ja viallisen vaiheen virrassa. Maasulun alkutransientti muodostuu varaustransientista ja purkaustransientista. Varaustransientti johtuu terveiden vaiheiden kapasitanssien varautumisesta maasulun seurauksena. Purkaustransientti johtuu viallisen vaiheen kapasitanssien purkautumisesta maasulun syntyessä. Alkutilan transientteihin vaikuttavat myös kuormitukset.

Keskijännitepuolen maasulkutransientit ovat suurimmillaan kun

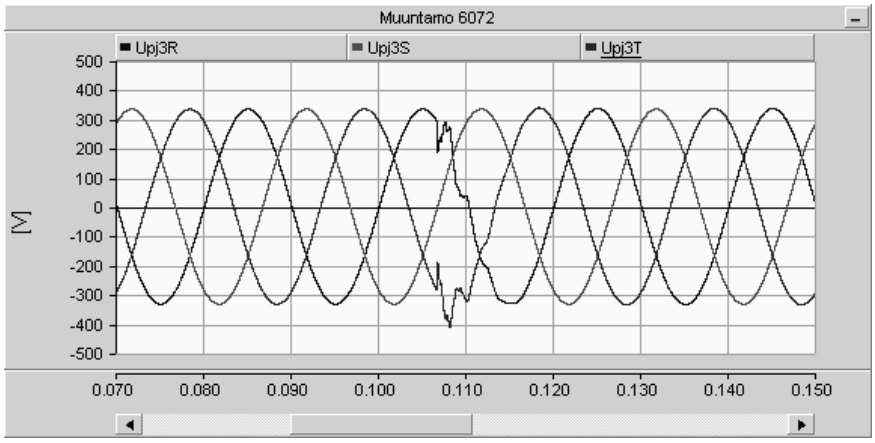
- vikaresistanssi on mahdollisimman pieni eli lähes 0 Ω
- maasulku sijaitsee mahdollisimman lähellä syöttävää sähköasemaa
- maasulku tapahtuu vaihejännitteen huippukohdassa
- verkon kapasitiivinen maasulkuvirta on suurimmillaan

Seuraavassa simulointitarkastelussa on käytetty pohjana Koillis-Satakunnan Sähkön verkosta tehtyä mallia. Tavoitteena oli etsiä pahimpia maasulkutilanteita ko. verkossa pienjännitteissä näkyvien transienttien kannalta. Verkko on maasta erotettu ja Melko on kytkettynä, joten maasulkuvirta on noin 30 A. Maasulku sijaitsee Inhassa eli syöttävällä sähköasemalla. Simuloinnissa käytetty vikaresistanssi on 2 Ω (arvioitu maadoitusresistanssi).

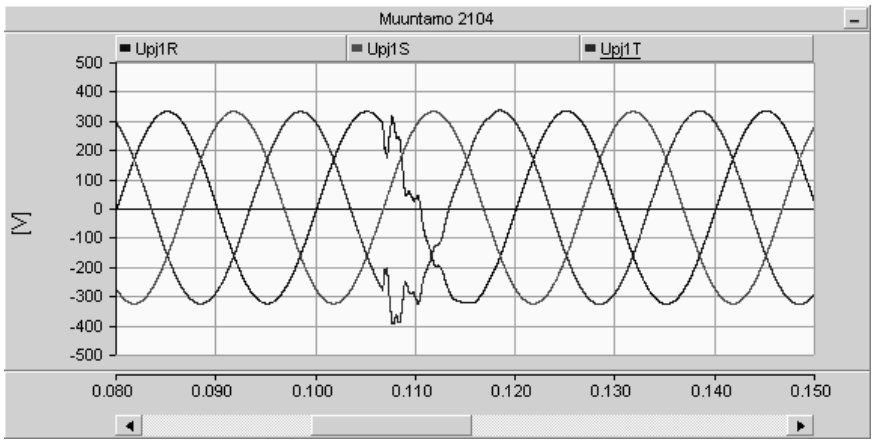
Kj-puolen vaihejännitteet:



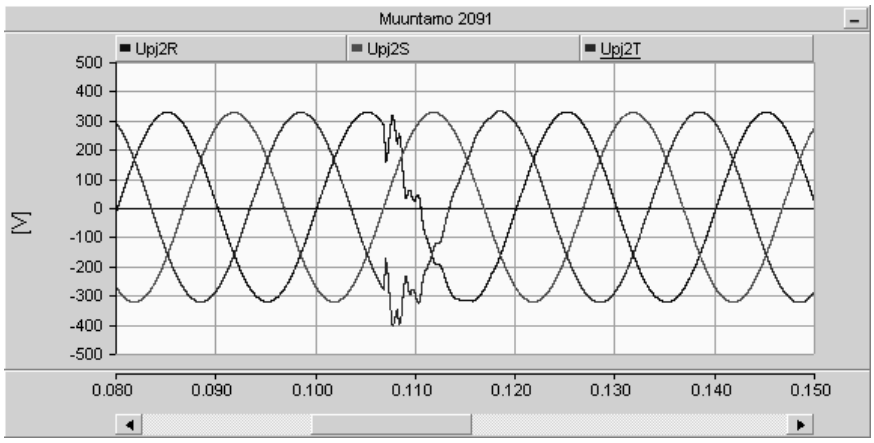
Pienjännitteet muuntamolla 6072 (a):



Pienjännitteet muuntamolla 2104 (p):

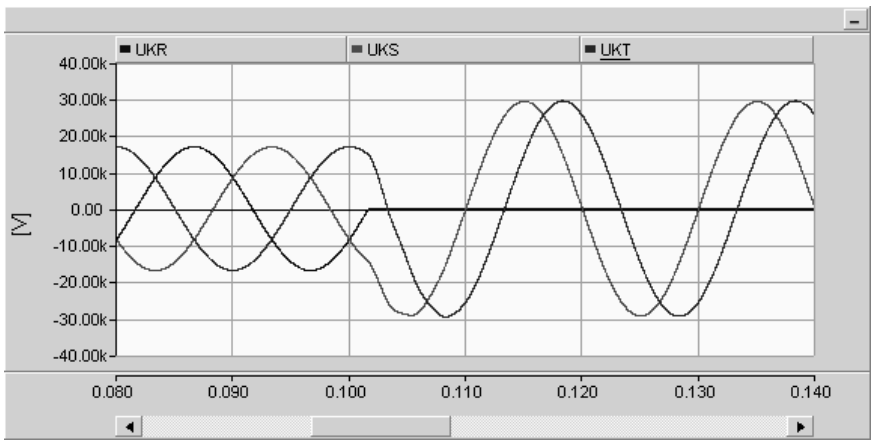


Pienjännitteet muuntamolla 2091 (l):

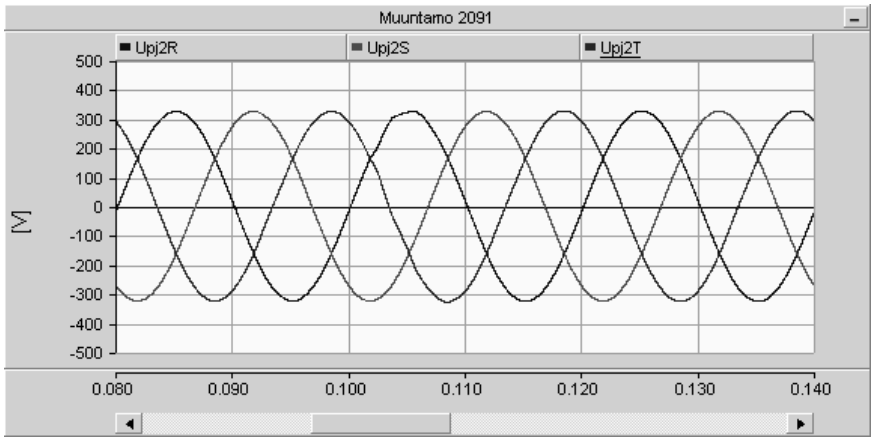


Seuraavassa on havainnollistettu muuten vastaavaa tilannetta, mutta maasulku tapahtuu vaihejännitteen nollakohdassa.

Kj-puolen vaihejännitteet, kun vika tapahtuu vaihejännitteen nollakohdassa:



Pienjännitteet muuntamolla 2091 (l):

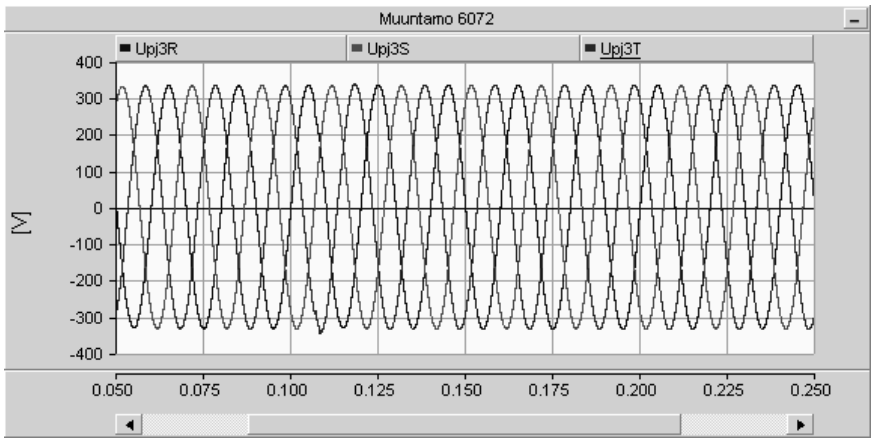


Kuten yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, maasulku ei näy pienjännitteissä juuri lainkaan, kun vika tapahtuu vaihejännitteen nollakohdassa.

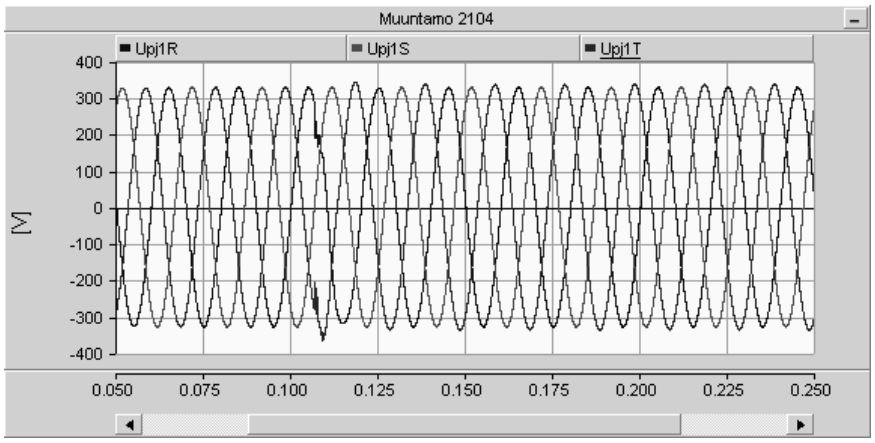
3.3.3.3 Pahimmat maasulkutilanteet: maasulku kaukana lähdöllä

Kun maasulku sijaitsee kaukana lähdöllä, vikakohdan ja sähköaseman välillä tapahtuu jännitteennousu, joka on voimakkaimmillaan, kun vikaresistanssi on mahdollisimman pieni eli lähes 0 Ω, maasulku sijaitsee mahdollisimman kaukana sähköasemalta ja verkon kapasitiivinen maasulkuvirta on suurimmillaan. Seuraavassa simulointitarkastelussa on käytetty pohjana Koillis-Satakunnan Sähkön verkosta tehtyä mallia. Verkko on maasta erotettu ja Melko on kytkettynä, jolloin maasulkuvirta on noin 30 A. Maasulku sijaitsee Kotalassa eli vikalähdön loppupäässä noin 40 km sähköasemalta. Vika tapahtuu vaihejännitteen huippukohdassa.

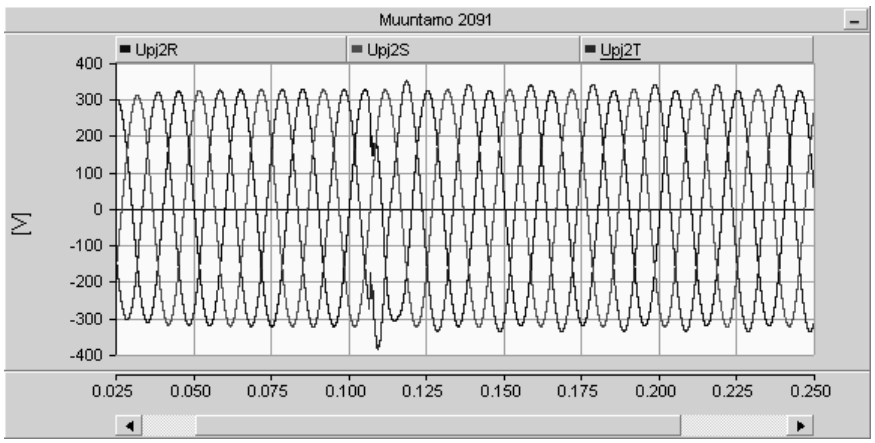
Pienjännitteet muuntamolla 6072 (a):



Pienjännitteet muuntamolla 2104 (p):



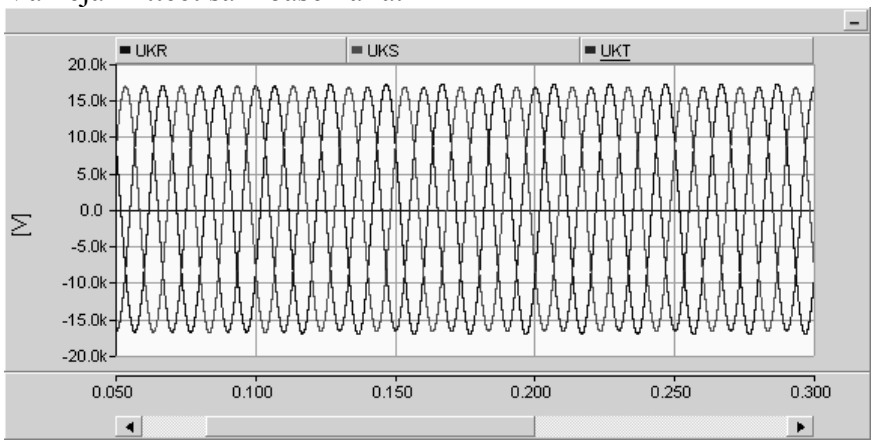
Pienjännitteet muuntamolla 2091 (l):



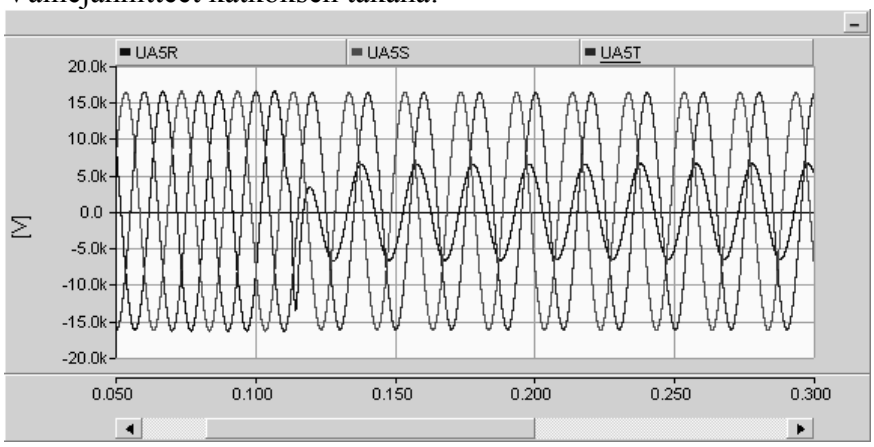
3.3.3.4 Vaihekatkos ilman maakosketusta

Seuraavassa on tarkasteltu vaihekatkosten vaikutuksia pienjänniteasiakkaiden jännitteisiin. Simuloinnissa on käytetty samaa Koillis-Satakunnan Sähkön verkkomallia kuin edellisen kohdan tarkastelussa. Verkko on maasta erotettu ja vaihekatkos tapahtuu muuntamoiden 2104 ja 2091 välisellä johto-osalla noin 0,11 sekunnin kohdalla.

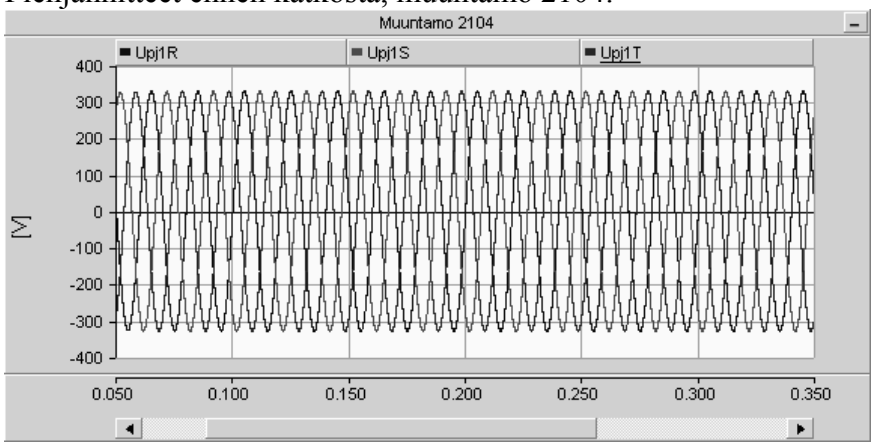
Vaihejännitteet sähköasemalla:



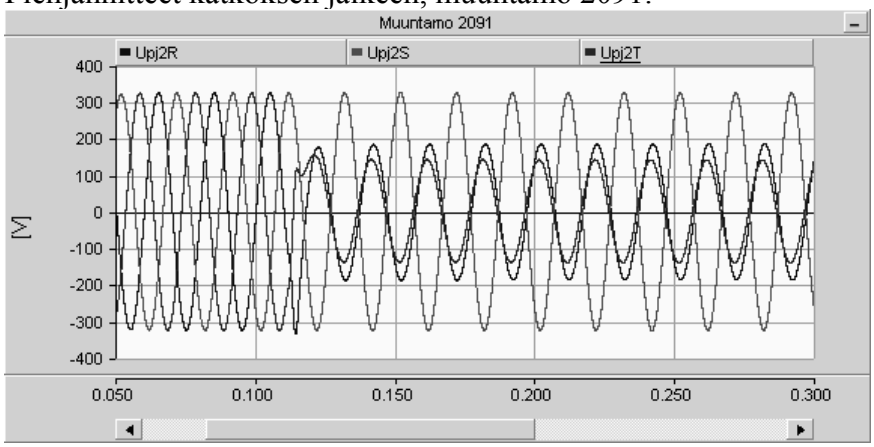
Vaihejännitteet katkoksen takana:



Pienjännitteet ennen katkosta, muuntamo 2104:



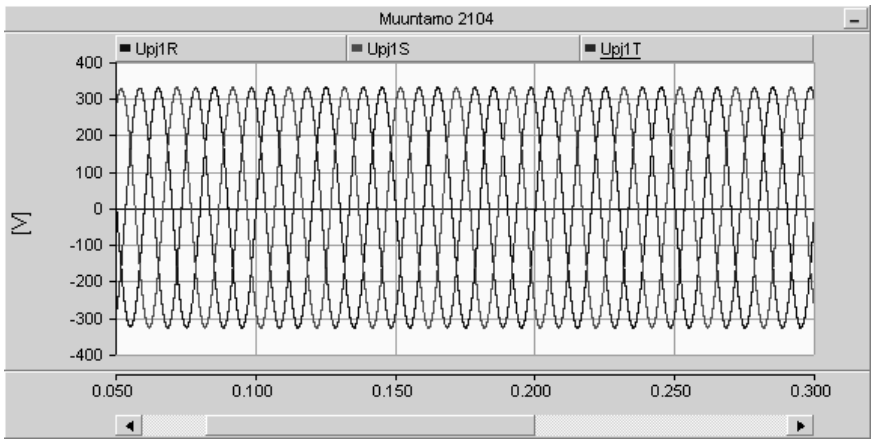
Pienjännitteet katkoksen jälkeen, muuntamo 2091:



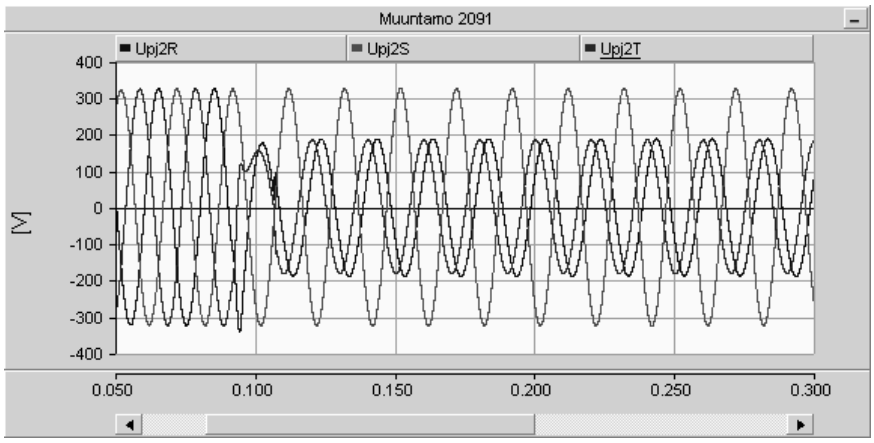
3.3.3.5 Vaihekatkos ja maakosketus kuorman puolella

Seuraavassa on tarkasteltu muuten vastaavaa tilannetta kuin edellä, mutta nyt vaihekatkokseen liittyy maakosketus kuorman puolella. Vikakohta on muuntamoiden 2104 ja 2091 välissä. Kyseessä on suuriresistanssinen maasulku. Vaihekatkos tapahtuu ensin ja heti sen perään maasulku kuorman puolella.

Pienjännitteet ennen katkosta, muuntamo 2104:



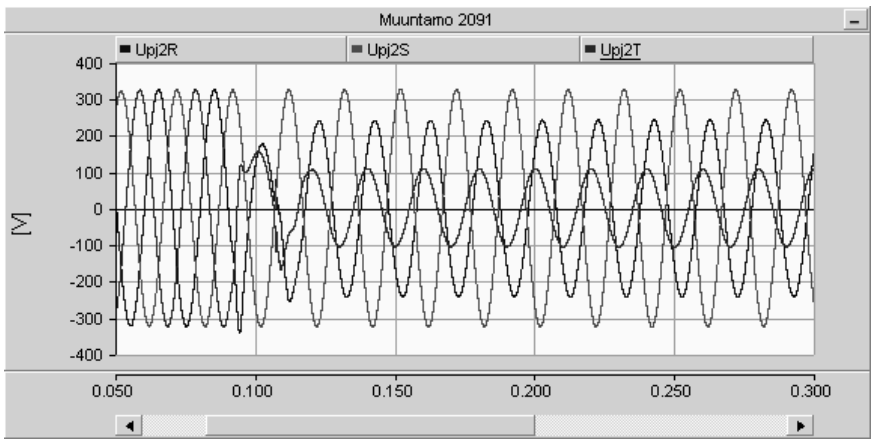
Pienjännitteet katkoksen jälkeen, muuntamo 2091:



3.3.3.6 Vaihekatkos ja maakosketus sähköaseman puolella

Seuraavassa on tarkasteltu muuten vastaavaa tilannetta kuin edellä, mutta nyt vaihekatkokseen liittyy maakosketus sähköaseman puolella. Vikakohta on muuntamoiden 2104 ja 2091 välissä. Keskijänniteverkon kannalta tilanne edustaa yleensä normaalia maasulkua, jos vikaresistanssi on pieni.

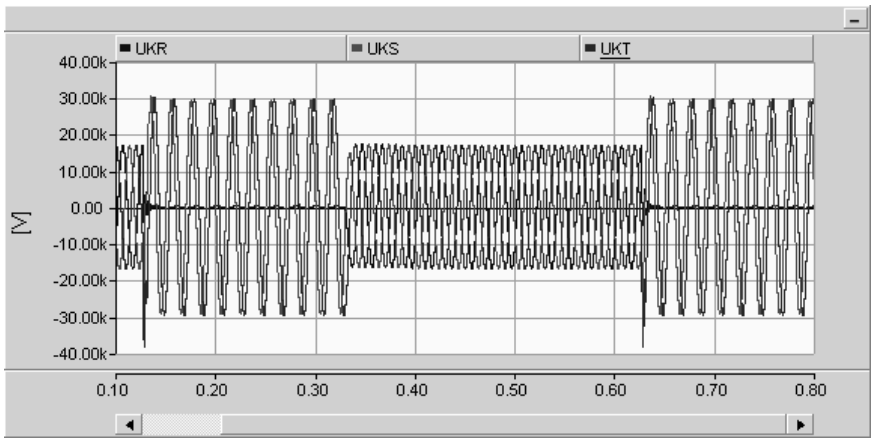
Pienjännitteet katkoksen jälkeen, muuntamo 2091:



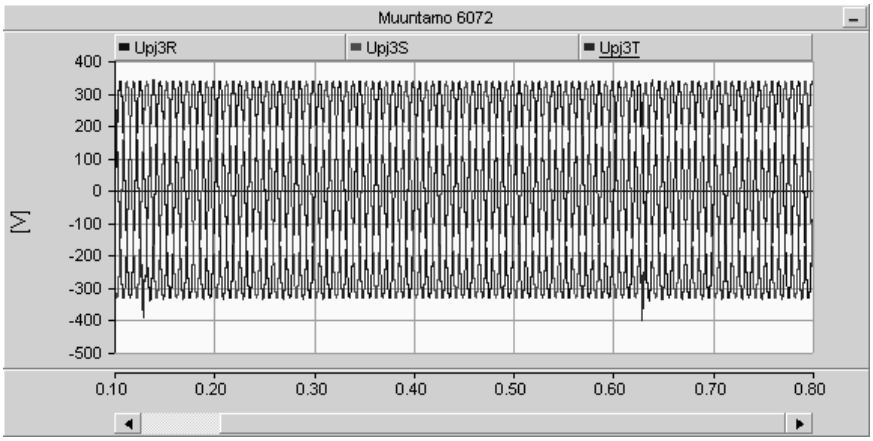
3.3.3.7 Maasulku ja epäonnistunut pikajälleenkytkentä

Seuraavassa on havainnollistettu epäonnistuvan maasulkujälleenkytkennän vaikutusta kj-puolen ja pj-puolen vaihejännitteisiin. Maasulku on lähdön alkupäässä. Maasulun alkutilan muutosilmiöt toistuvat suunnilleen samanlaisina kuin maasulun syntyessä, kun lähdön katkaisija suljetaan vikaa vasten.

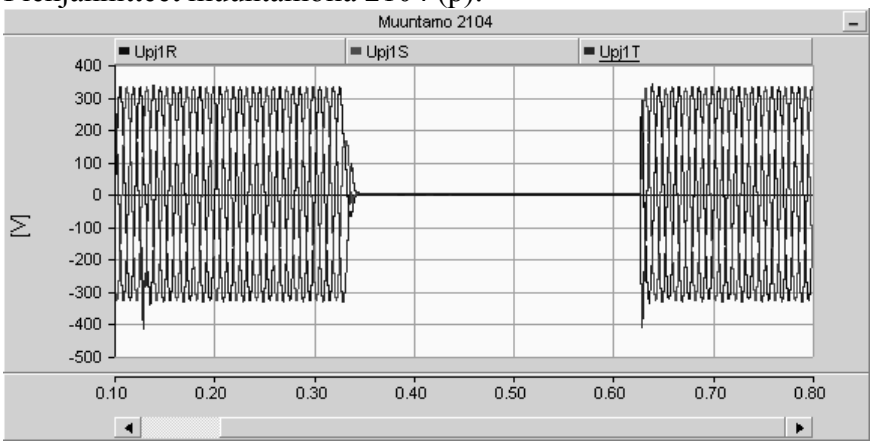
Kj-puolen vaihejännitteet:



Pienjännitteet muuntamolla 6072 (a):



Pienjännitteet muuntamolla 2104 (p):



3.3.4 Sammutetun maaseutuverkon maasulkujen simulointitulokset

Sammutetussa maaseutuverkossa maasulun alkutilan transientit ovat suuruusluokaltaan samat kuin vastaavassa maasta erotetussa järjestelmässä. Siksi edellä esitettyjä maasta erotetun verkon simulointituloksia voidaan soveltaa alkutransienttien osalta myös vastaavaan sammutettuun verkkoon. Kun maasulku sijaitsee kaukana lähdöllä, vikakohdan ja sähköaseman välillä tapahtuu jännitteennousu. Koska sammutetussa verkossa maasulkuvirta on lähes kokonaan kompensoitu, kyseinen ilmiö on huomattavasti heikompi kuin vastaavassa maasta erotetussa verkossa.

3.3.5 Johtopäätökset maaseutuverkon maasuluista

Simuloimalla tarkastellussa maaseutuverkossa kapasitiivinen maasulkuvirta oli noin 30 A ja kauimmainen vikakohta sijaitsi noin 40 km päässä sähköasemasta. Em. parametrien osalta tilanteen voidaan kuvaavan kohtalaisen hyvin tyypillistä maaseudun avojohtoverkkoa. Sellaisia avojohtoverkkoja, joissa maasulkuvirta on selvästi em. arvoa suurempi, kuitenkin esiintyy. Varsinkin ns. sekaverkoissa, jotka koostuvat sekä avojohdoista että maakaapeleista, maasulkuvirta voi olla selvästi suurempi kuin tarkastellussa tapauksessa. Myös kj-lähtöjen pituudet voivat olla harvaan asutuilla haja-asutusalueilla suuria. Yhdellä lähdöllä voi olla jopa 100 km avojohtoa.

Tarkastellussa maaseutuverkossa kj-puolen vaihejännitteissä näkyvän transientin seurauksena pj-puolen vaihejännitteissä esiintyy transientti, jonka maksimiamplitudi on noin 400 V. Pienjännitetransientin amplitudi on suurimmillaan silloin, kun maasulku sijaitsee mahdollisimman lähellä syöttävää sähköasemaa.

Kun vika sijaitsi noin 40 km päässä sähköasemalta, pj-puolen yhden vaiheen jännite kohosi noin 345 V:iin. Ilmiö näkyy sitä voimakkaampana, mitä kauempana sähköasemasta muuntamo on. Kyseinen jännitteennousu kestää niin kauan kuin maasulku on päällä eli maasulkusuojauksen laukaisuhidastuksen ajan. Jälleenkytkennät ja vian paikantamiseksi tehtävät kokeilukytkennät pidentävät myös ao. jännitteennousun vaikutusaikaa.

Epäonnistuneen pikajälleenkytkennän jälkeen maasulun alkutilan muutosilmiöt toistuvat suunnilleen samanlaisina kuin maasulun syntyessä, kun lähdön katkaisija suljetaan vikaa vasten.

Vaihekatkosten vaikutukset näkyvät pääasiassa vikakohdan takana sijaitsevilla muuntamoilla. Mikäli vaihekatkokseen ei liity maakosketusta, vian takana olevilla muuntamoilla yksi pj-puolen vaihejännite pysyy ennallaan ja kaksi vaihejännitettä putoavat suunnilleen 50 %. Jos vaihekatkokseen liittyy maasulku kuorman puolella, vian aiheuttamat häiriöt riippuvat osittain siitä, missä järjestyksessä viat tapahtuvat. Vikakohdan takana olevien muuntamoiden kannalta ko. tilanne on suunnilleen sama, kuin vaihekatkos ilman maakosketusta, koska maasulun vikaresistanssi on hyvin suuri. Mikäli vaihekatkokseen yhdistyy maasulku sähköaseman puolella, tilanne vastaa lähinnä normaalia maasulkua, jos vikaresistanssi on pieni. Vikakohdan takana yksi pj-puolen vaihejännite säilyy ja kaksi putoaa.

3.3.6 Maasta erotetun kaupunkiverkon simulointitulokset

Seuraavassa simulointitarkastelussa on käytetty Helsingin Energian Pitäjänmäen sähköverkon mallia, joka on kuvattu kohdan 3.3 alussa (ots. Mallinnettu maakaapeliverkko). Verkko on maasta erotettu. Tarkasteluun valittiin kolme vikakohtaa lähdöltä 1. Jokaisessa vikakohdassa simuloitiin yksivaiheinen maasulku. Seuraavassa on kuvattu vikakohtien sijainnit:

- Vikakohta 1: lähdön alussa 0,05 km sähköasemalta
- Vikakohta 2: 5,7 km sähköasemalta
- Vikakohta 3: lähdön lopussa 8,5 km sähköasemalta

Vaihekatkos simuloitiin noin 5,4 km etäisyydellä sähköasemalta. Tarkasteltuja vaihekatkoksia oli kolmenlaisia:

- vaihekatkos ilman maakosketusta
- vaihekatkos ja maakosketus kuorman puolella
- vaihekatkos ja maakosketus sähköaseman puolella

Tarkasteltavia muuntamoita oli kolme lähdöllä 1:

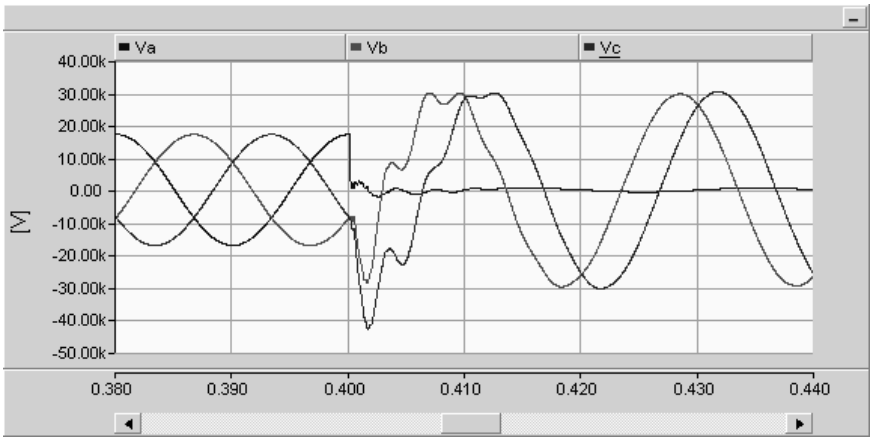
- Muuntamo 1 (2284): 0,05 km sähköasemalta, S_n = 0,5 MVA
- Muuntamo 2 (2291): 5,4 km sähköasemalta, S_n = 1,0 MVA
- Muuntamo 3(2346): 7,8 km sähköasemalta, S_n = 0,5 MVA

Laskentajännitteenä käytettiin 21 kV:a. Verkon kapasitiivinen maasulkuvirta oli tarkastellussa tilanteessa noin 229 A.

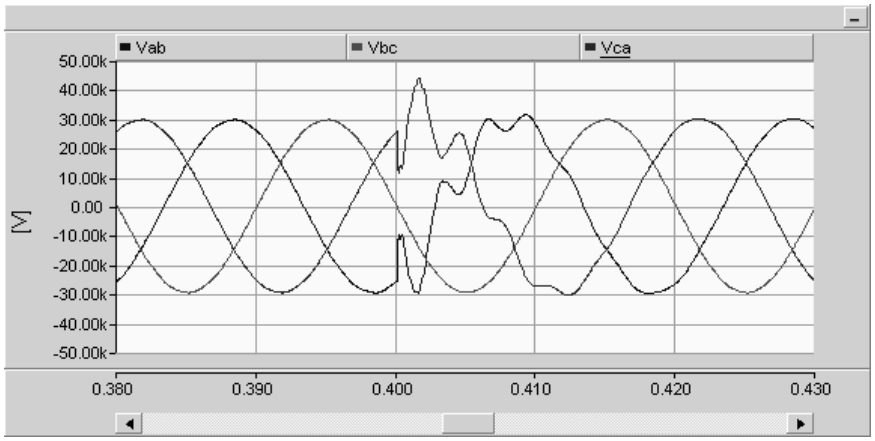
3.3.6.1 Pahimmat maasulkutilanteet maakaapeliverkossa: alkutilan transientit

Seuraavassa on simuloitu tilanne, jossa maasulku on lähdön alussa hyvin lähellä syöttävää sähköasemaa (0,05 km).

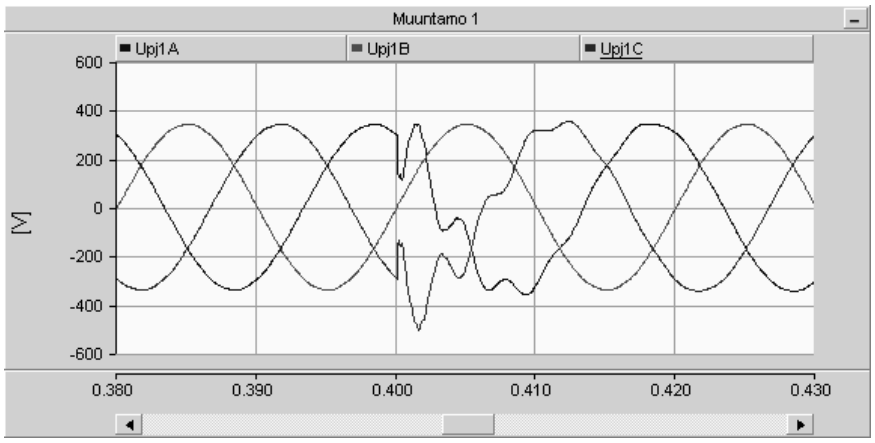
Kj-puolen vaihejännitteet:



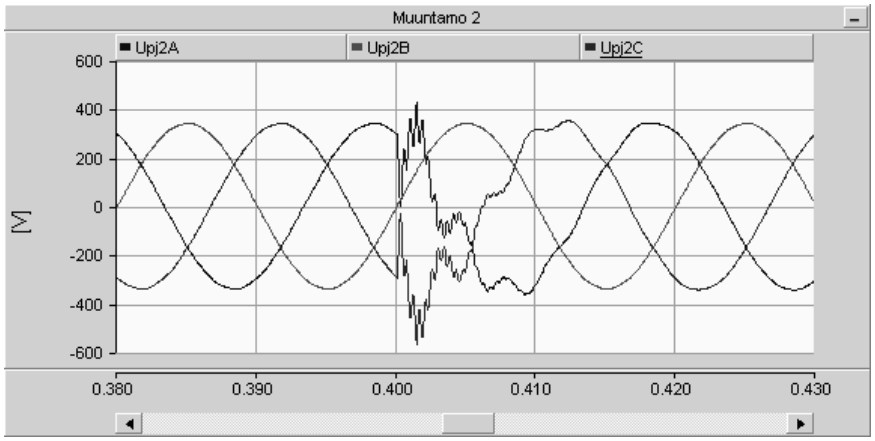
Kj-puolen pääjännitteet:



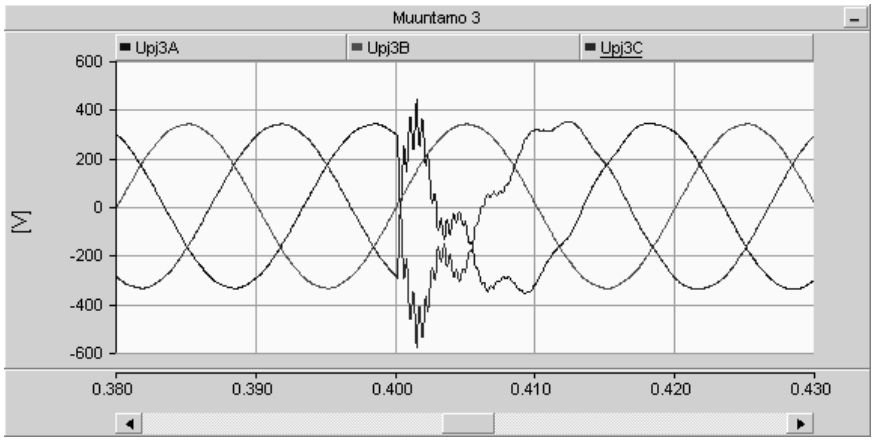
Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 1 (0,05 km sähköasemalta):



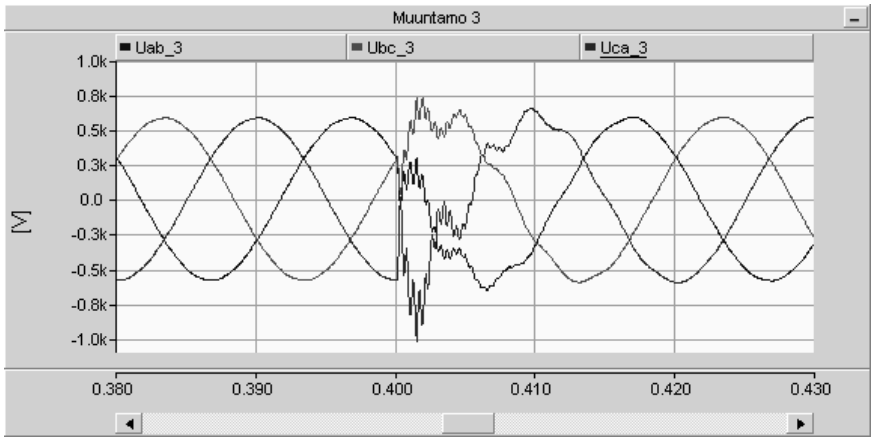
Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 2 (5,4 km sähköasemalta):



Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):

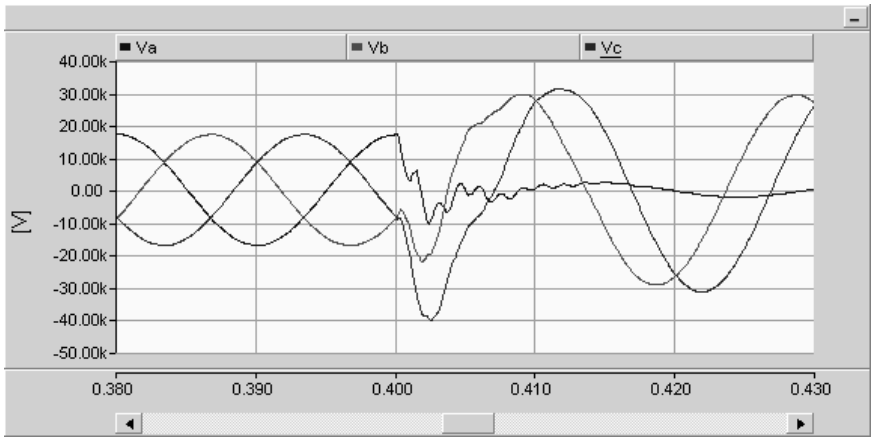


Pj-puolen pääjännitteet, muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):

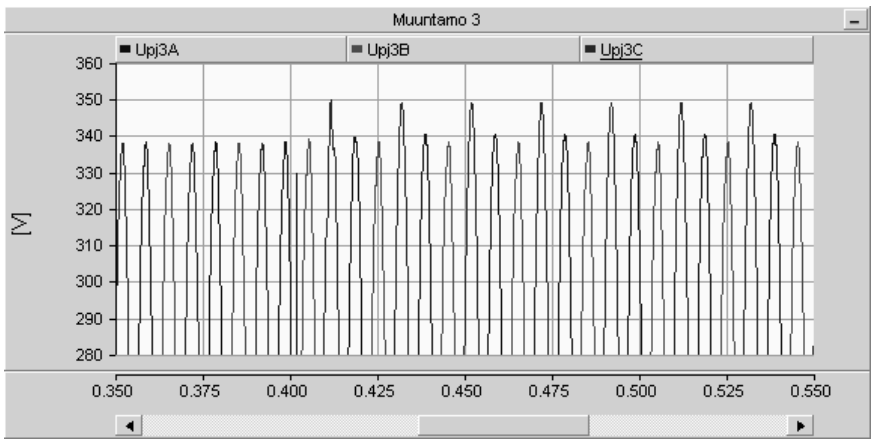


3.3.6.2 Pahimmat maasulkutilanteet maakaapeliverkossa: maasulku lähdön lopussa 8,5 km sähköasemalta

Kj-puolen vaihejännitteet:



Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):

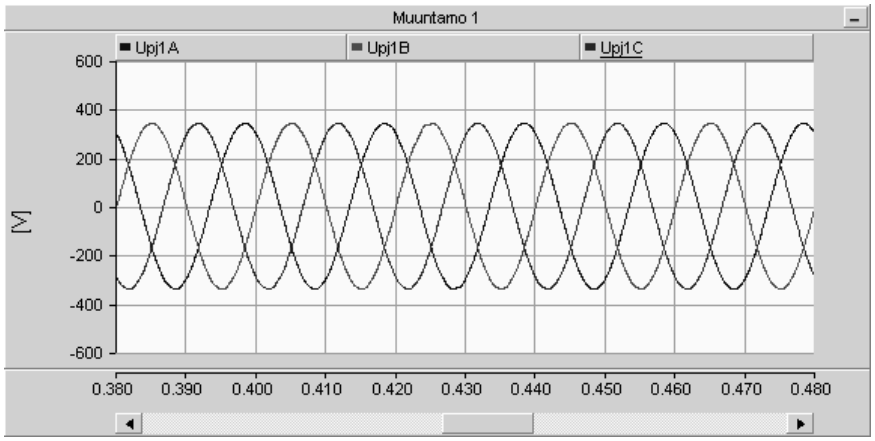


3.3.6.3 Vaihekatkokset

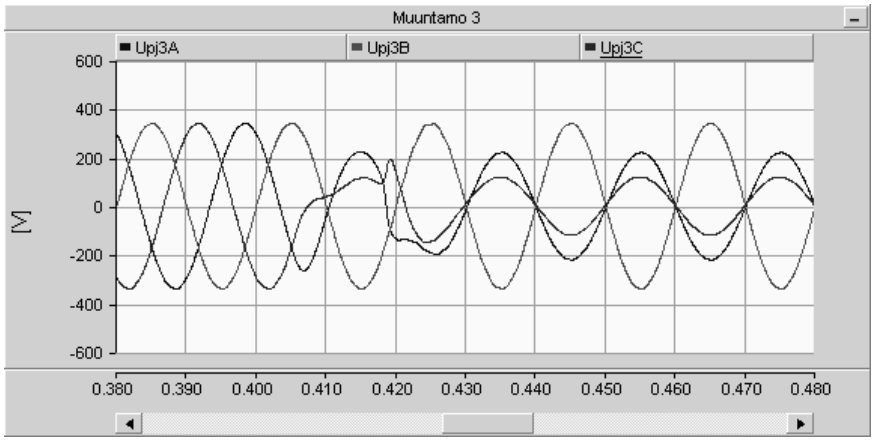
Seuraavassa on tarkasteltu maakaapeliverkon vaihekatkoksia. Vaihekatkoksia tarkastellaan maasta erotetussa kaupunkiverkossa. Muuntamoiden kuormitus on 10 % nimellistehosta.

Vaihekatkos ilman maakosketusta 5,7 km sähköasemalta:

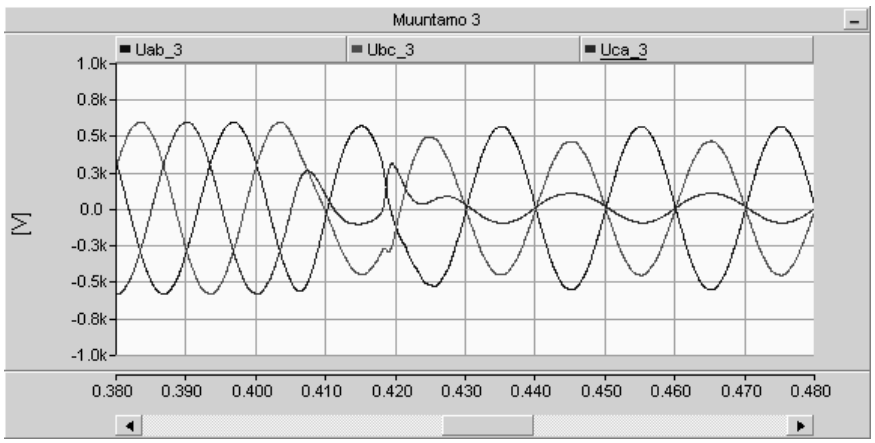
Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 1 (0,05 km sähköasemalta):



Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):



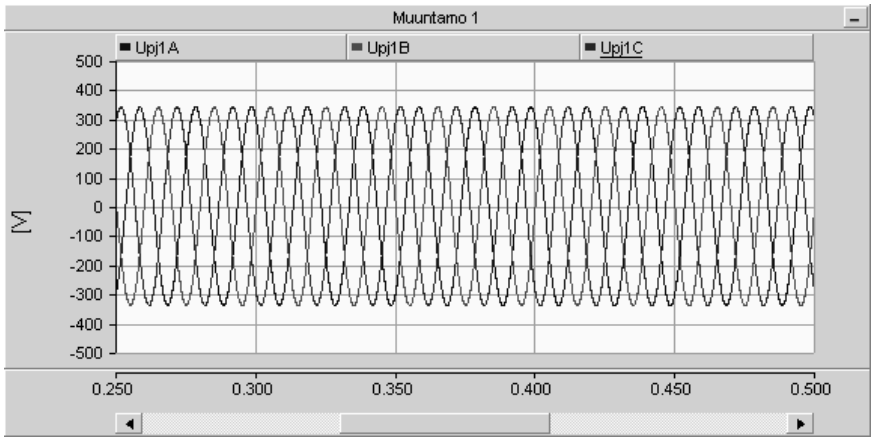
Pj-puolen pääjännitteet: muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):



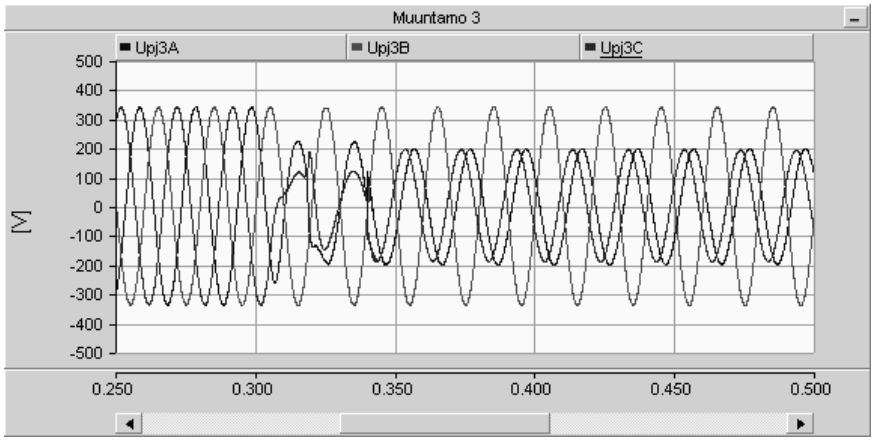
Vaihekatkos ja maakosketus kuorman puolella 5,7 km sähköasemalta:

- Vaihekatkos tapahtuu suunnilleen 0,31 sekunnin kohdalla ja maasulku 0,34 sekunnin kohdalla.

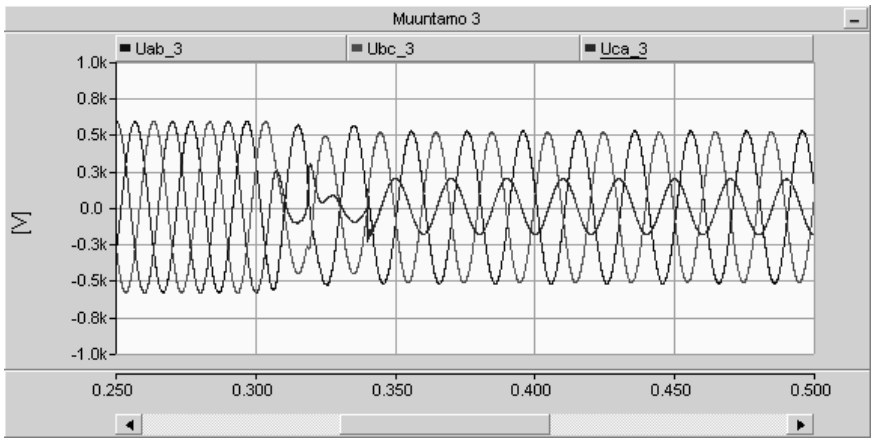
Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 1 (0,05 km sähköasemalta):



Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):



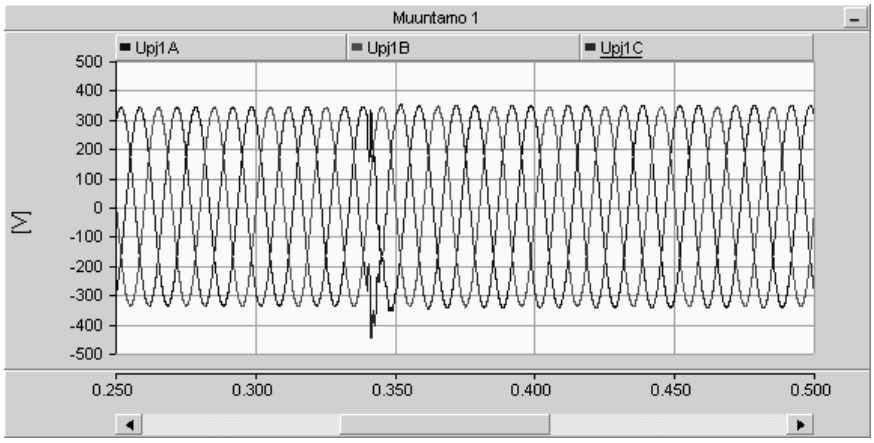
Pj-puolen pääjännitteet, muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):



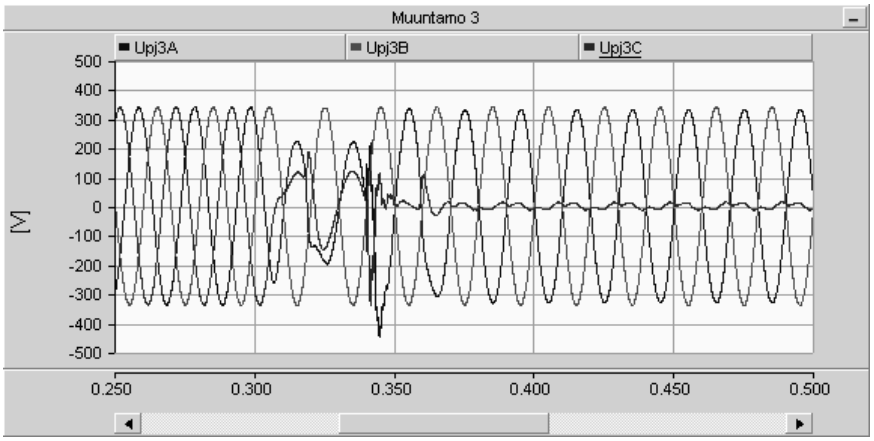
Vaihekatkos ja maakosketus sähköaseman puolella 5,7 km sähköasemalta

- Vaihekatkos tapahtuu suunnilleen 0,31 sekunnin kohdalla ja maasulku 0,34 sekunnin kohdalla.

Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 1 (0,05 km sähköasemalta):



Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 3 (7,8 km sähköasemalta):



3.3.6.4 Johtopäätökset maasta erotetun kaupunkiverkon maasuluista

Maasulun alkutilan transientit ovat suurimmillaan kun maasulku on lähdön alussa syöttävällä sähköasemalla. Tällöin kj-puolen pääjännitteessä näkyy huippuarvoltaan noin 45 kV piikki. Lähdön lopussa (7,8 km) sijaitsevalla muuntamolla pj-puolen vaihejännitteen maksimiamplitudi on noin 580 V ja pääjännitteen maksimiamplitudi noin 1000 V. Huippuarvot johtuvat osittain jännitteen perusaaltoon kerrostuneesta suuritaajuisista värähtelyistä.

Kun maasulku on lähdön lopussa 8,5 km sähköasemalta, kj-puolen pääjännitteessä näkyy huippuarvoltaan hieman alle 40 kV piikki. Lähdön lopussa sijaitsevalla muuntamolla pj-puolen vaihejännitteen maksimiamplitudi on noin 488 V. Kun maasulku on 8,5 km sähköasemalta, muuntamon 3 (7,8 km) yhden pj-puolen vaihejännitteen amplitudi nousee vian aikana noin 350 V:iin (tehollisarvo 247,5 V). Kuten tuloksista voidaan nähdä, maasulun alkutransienttien aiheuttamat häiriöt pienenevät selvästi, kun vika siirtyy sähköasemalta lähdön loppupäähän.

Tilanteessa, jossa vaihekatkos on ilman maakosketusta, vika näkyy ainoastaan vikakohdan takana olevilla muuntamoilla. Yksi vaihejännite pysyy ennallaan ja kaksi vaihejännitettä putoavat vikaa edeltäneeseen tilaan verrattuna. Kun vaihekatkokseen yhdistyy maakosketus kuorman puolella, pienjännitetransientin esiintymiseen vaikuttaa, missä järjestyksessä viat tapahtuvat. Mikäli vaihekatkos tapahtuu ensin ja sitten vasta maasulku, pienjännitetransienttia ei juurikaan esiinny. Jatkuvuustilassa vika näkyy vikakohdan takana olevilla muuntamoilla. Yksi vaihejännite pysyy ennallaan ja kaksi vaihejännitettä putoavat noin 50 % vikaa edeltäneeseen tilaan verrattuna. Tilanteessa, jossa vaihekatkokseen yhdistyy maakosketus sähköaseman puolella, ennen vikakohtaa sijaitsevan muuntamon pj-puolen yhdessä vaihejännitteessä näkyy transientti, jonka amplitudi on noin 450 V. Tältä osin tilanteeseen voidaan soveltaa vastaavia yksivaiheisen maasulun simulointituloksia. Jatkuvuustilassa vika näkyy vikakohdan takana olevien muuntamoiden pj-puolen jännitteissä.

3.3.7 Sammutetun kaupunkiverkon simulointitulokset

Seuraavassa tarkastelussa on käytetty yleistä maakaapeliverkon mallia, joka on kuvattu kohdassa 3.3 (ots. ’Mallinnettu maakaapeliverkko’). Verkon kapasitiivinen maasulkuvirta oli 195 A. Päämuuntajan tähtipisteen ja maan välille on kytketty maadoituskuristin. Kompensoimaton maasulkuvirta on 195 A. Kompensointiaste oli 95 % ja vikaresistanssi 2 Ω. Seuraavassa on tarkasteltu tilannetta, jossa maasulku on lähdön alussa.

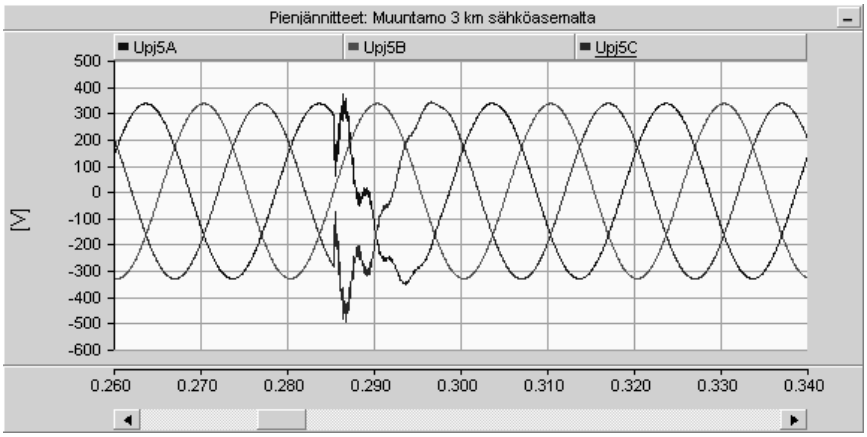
Simuloidut tapaukset kompensoidussa verkossa:

- maasulku lähdön alussa
- maasulku lähdön lopussa 6 km etäisyydellä sähköasemasta
- vaihekatkos ja maakosketus kuorman puolella 3 km sähköasemalta

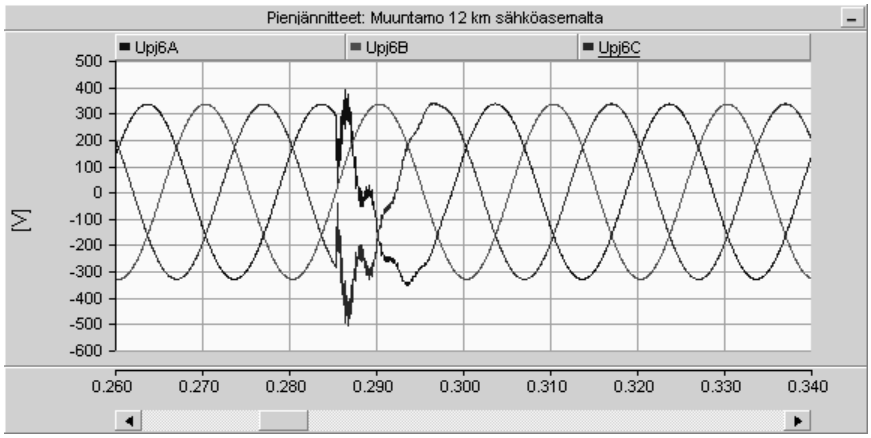
3.3.7.1 Pahimmat maasulkutilanteet kaapeliverkossa: alkutilan transientit

Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 1 (0,6 km sähköasemalta):

Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 2 (3 km sähköasemalta):



Pj-puolen vaihejännitteet, muuntamo 3 (6 km sähköasemalta):



3.3.7.2 Johtopäätökset sammutetun kaupunkiverkon maasuluista

Kun maasulku on lähdön alussa syöttävällä sähköasemalla, pääjännitteessä näkyy huippuarvoltaan hieman yli 40 kV piikki vastaavasti kuin maasta erotetussa verkossa. Lähdön lopussa sijaitsevalla muuntamolla pj-puolen vaihejännitteen maksimiamplitudi on noin 500 V. Kun maasulku on lähdön lopussa (ei esitetty), pääjännitteessä näkyy huippuarvoltaan 40 kV piikki. Lähdön lopussa sijaitsevalla muuntamolla pj-puolen vaihejännitteen maksimiamplitudi on noin 450 V. Muuntamoiden pienjännitteissä näkyvät transientit ovat suunnilleen samansuuruisia kuin sähköisesti vastaavan kokoisessa maasta erotetussa verkossa. Erona maasta erotettuun verkkoon verrattuna on se, että maasulun seurauksena ei tapahdu juurikaan jännitteennousua vikavirran seurauksena. Tämä johtuu pienestä vikavirrasta.

3.4 Yhteenveto ja johtopäätökset maasulkujen vaikutuksista

Keskijänniteverkon sähköisellä pituudella eli yhteenlasketulla maakapasitanssilla on selvä vaikutus esiintyviin kj-puolen jännitetransientteihin ja sitä kautta myös pj-puolen vaihejännitteissä näkyviin transientteihin. Mitä suurempi on verkon kapasitiivinen maasulkuvirta, sitä voimakkaampia maasulun alkutilan transientit ovat. Tarkastellussa maaseutuverkossa suurin vaihejännitteen (pj) amplitudi muutostilanteessa oli noin 400 V. Vastaava arvo tarkastellussa kaupunkiverkossa oli noin 580 V. Simulointituloksia tarkasteltaessa tulee muistaa se, että tulokset rajoittuvat ainoastaan tarkasteltuihin verkkoihin eivätkä ole siten yleispäteviä. Maaseutuverkon osalta simulointituloksia verrattiin vastaaviin mittaustuloksiin. Tällöin voitiin todeta, että simuloimalla saadaan kohtalaisen hyvä kuva ilmiöiden suuruusluokista. Kaupunkiverkon osalta vastaavia vertailuja ei voitu tehdä. Maasulun alkutilan transientit ovat suurimmillaan, kun vika sijaitsee mahdollisimman lähellä sähköasemaa ja vikaresistanssi on pienimmillään. Vikaresistanssin suurentumisella on huomattava transientteja vaimentava vaikutus.

Kun maasulkuvika sijaitsee kaukana syöttävältä sähköasemalta, nousee yhden pj-puolen vaihejännitteen suuruus vikaa edeltäneeseen tilaan verrattuna. Jännitteennousu kestää vian vaikutusajan. Ilmiö on sitä voimakkaampi, mitä kauempana tarkasteltava muuntamo sijaitsee. Maakaapeliverkossa johtopituudet ja johdinimpedanssit ovat yleensä selvästi pienempiä kuin avojohtoverkossa. Toisaalta maasulun vikavirta on yleensä kertaluokkaa suurempi. Tarkastelluissa maasta erotetuissa maaseutu- ja kaupunkiverkoissa jännitteennousu olikin em. syistä suunnilleen samaa suuruusluokkaa. Ao. tuloksiin vaikuttaa luonnollisesti myös laskentajännitteen suuruus. Sammutetuissa verkoissa suurin osa maasulkuvirrasta on kompensoitu. Tämän takia ko. jännitteennousua ei merkittävässä määrin esiinny.

Vaihekatkosten häiriövaikutukset näkyvät lähinnä vikakohdan takana sijaitsevien muuntamoiden jännitteissä. Vikakohdan ja sähköaseman välillä sijaitsevilla muuntamoilla pienjännitehäiriöitä ei juurikaan esiinny. Vikakohdan takana sijaitsevien muuntamoiden pj-puolen vaihejännitteille on vaihekatkoksen yhteydessä tyypillistä, että yksi vaihejännite säilyy ennallaan ja kaksi vaihejännitettä pienenee vikaa edeltäneeseen tilaan verrattuna. Jos vaihekatkokseen yhdistyy maasulku sähköaseman puolella, aiheutuu maasulun alkutilan muutosilmiöistä suunnilleen vastaavat transientit pienjännitteisiin kuin pelkässä maasulussakin.

4. KONDENSAATTORIEN KYTKENNÄN VAIKUTUKSET

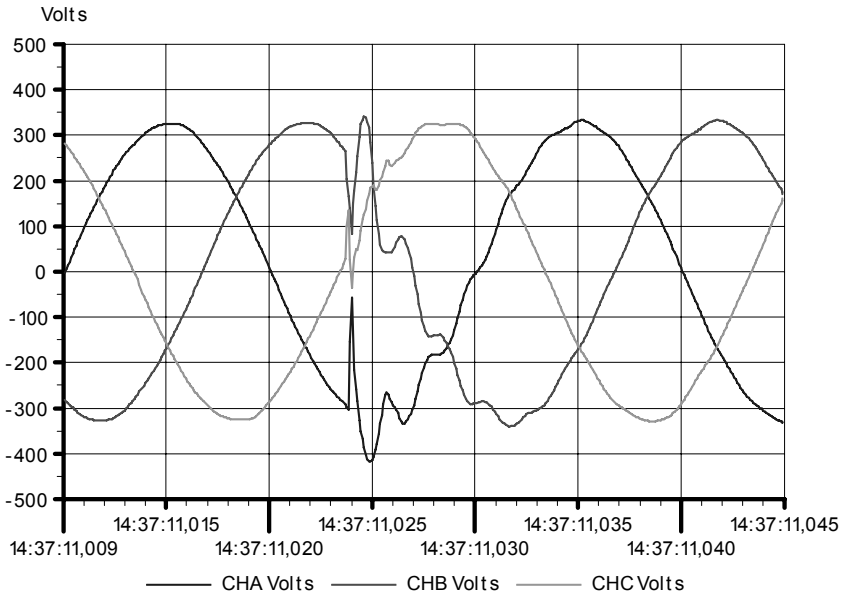
4.1 Kondensaattorien kytkentään liittyvät ilmiöt

Loistehon kompensointia varten kondensaattoreita sijoitetaan sekä sähköasemille että pienjänniteverkkoihin.

Loistehon kompensointiin käytettävien kondensaattorien kytkentä jännitteiseksi on eräs tavallisimpia, huippuarvoltaan vaatimattomien loivien transienttiylijännitteiden aiheuttajia. Ylijännitteen huippuarvon suuruus riippuu jännitteen hetkellisarvosta kytkinlaitteen sulkeutumishetkellä. Ylijännitteen huippuarvo on perusteorian mukaan suurimmillaan noin 2 p.u., kun 1 p.u. vastaa normaalin jännitteen huippuarvoa. [Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, Palva: Suurjännitetekniikka, Otatieto, 2. painos 2003, 520 s.]

Ennen kytkentähetkeä kondensaattoripariston napojen väliset jännitteet ovat nollia. Koska kondensaattorin jännite ei voi muuttua täysin hetkellisesti, putoavat syöttävän verkon jännitteet kytkentähetkellä kohti nollaa ja nousevat sen jälkeen kondensaattorien varautuessa kohti syöttävän verkon uutta jatkuvuustilaa vastaavia jännitteitä. Koska syöttävässä verkossa on aina induktanssia, tapahtuu em. ilmiö vaimenevana värähtelynä, johon sisältyy myös normaalin verkkojännitteen ylittäviä kohtia. Värähtelyn taajuuteen vaikuttaa lähinnä syöttävän verkon induktanssin ja kondensaattorin kapasitanssin muodostaman sarjaan kytkennän resonanssitaajuus. Värähtelytaajuuteen on toki myös verkon resistansseilla pienehkö vaikutus. Värähtelyn suuruuteen vaikuttavat vaimenemisnopeuteen verkon induktanssi/resistanssi-suhteet ja kapasitanssit sekä verkon kuormitukset. Suurin syntyvä huippuarvo on teorian mukaan välillä 1…2 pu riippuen kytkentähetkestä, kun 1 pu tarkoittaa jännitteen normaalia hetkellistä huippuarvoa. Suurimmat ylijännitteet esiintyvät, kun kytkentä tapahtuu jännitteen huippuarvon läheisyydessä. Sekä vaihe- että pääjännitteissä suurimmat arvot ajoittuvat niiden huippuarvojen aikojen mukaisesti.

Kuvassa 4.1 on esimerkki mitatusta kondensaattoripariston kytkentäilmiöstä.



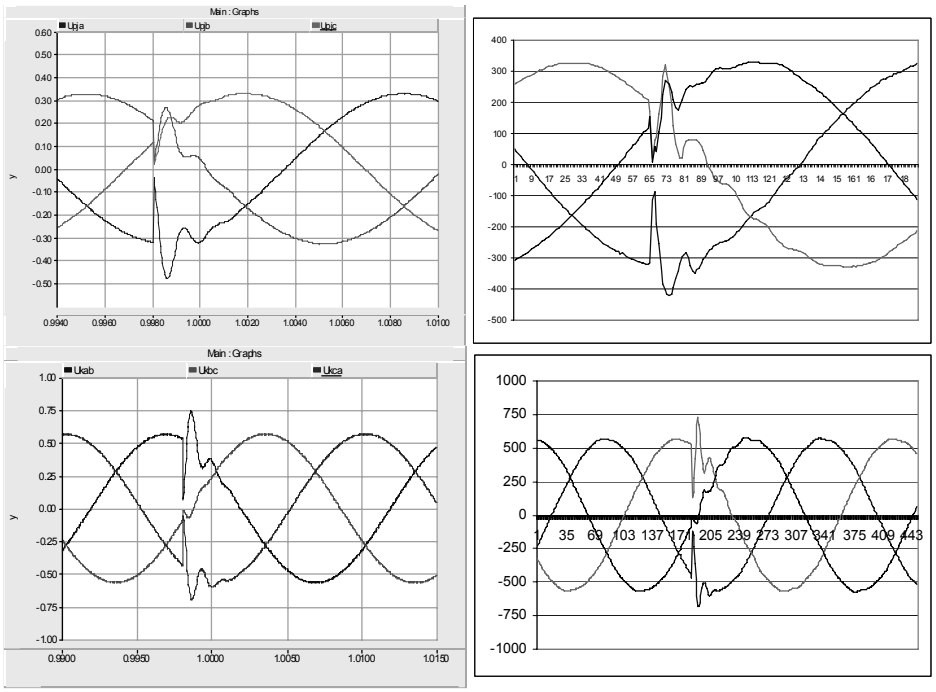
Kuva 4.1 Mitattu esimerkki kondensaattoripariston kytkennän aiheuttamista muutosilmiöistä pienjänniteverkon vaihejännitteissä

Jännitetransienttien suhteellista vahvistumista voi tapahtua silloin, kun samassa verkossa kytketään kondensaattoriparisto ylemmällä jännitetasolla verkkoon ja alemmalla jännitetasolla on kytkettynä kondensaattoreita. Alemman jännitetasolla näkyvä transienttien suhteellinen vahvistuminen on suurimmillaan silloin, kun eri jännitetasojen resonanssitaajuudet ovat lähellä toisiaan. Verkon resistansseilla ja kuormituksilla on transienttien vahvistumiseen vaimentava vaikutus.

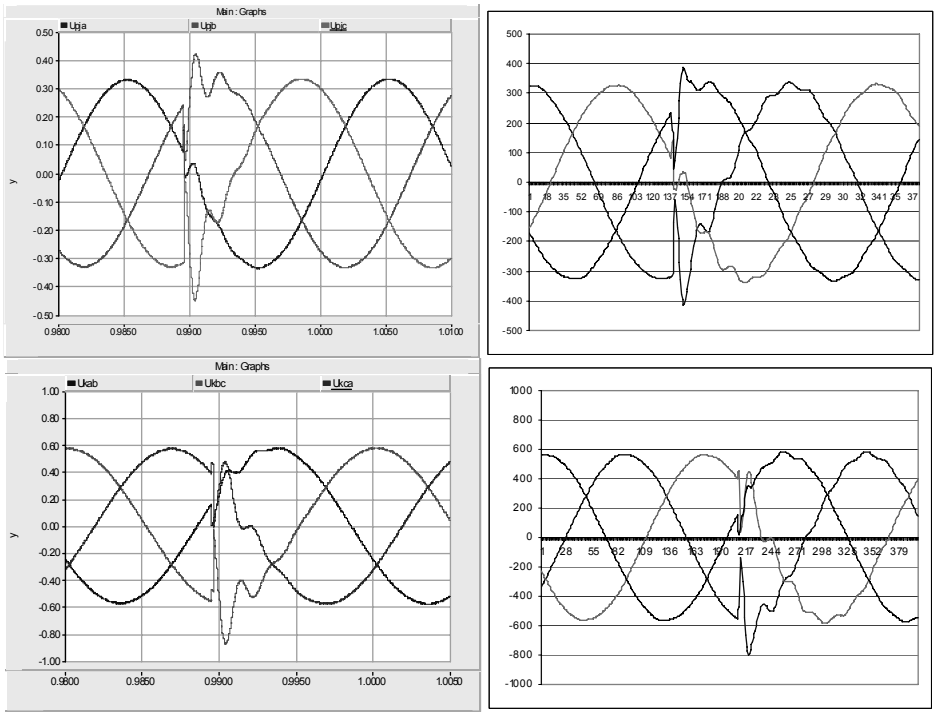
4.2 Kondensaattorien kytkentöihin liittyvät mittaukset ja simuloinnit

Kondensaattorien kytkentäkokeita ja niihin liittyviä mittauksia tehtiin KSS:n jakeluverkossa toukokuun lopussa suhteellisen kevyen kuormituksen aikana. Simulointimallit verifioitiin mittaustuloksia kohtuullisesti vastaavaksi pitäen riittävänä, että saatiin tyypillisesti 0 … 10% suurempia ylijännitearvoja kuin oli mitattu.

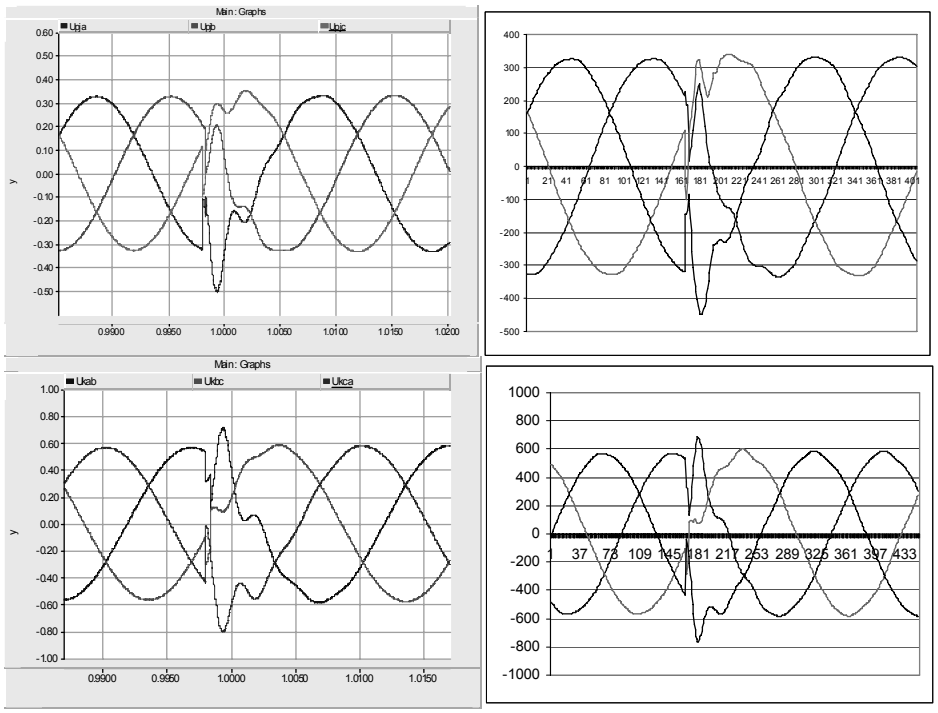
Esimerkkiverkossa jakelumuuntajan koko oli 315 kVA, pätöteho n. 40 kW ja muuntajan kuormitusaste vajaa 15%. Kuvissa 4.2 – 4.4 on esimerkkejä mitatuista kytkentäilmiöistä ja niitä vastaavat simuloinnit.



Kuva 4.2 25 kvar pj-kondensaattorin kytkentä: vasemmalla vaihe- ja pääjännitteet simuloituna ja oikealla mitattuna



Kuva 4.3 50 kvar pj-kondensaattorin kytkentä: vasemmalla vaihe- ja pääjännitteet simuloituna ja oikealla mitattuna



Kuva 4.4 100 kvar pj-kondensaattorin kytkentä: vasemmalla vaihe- ja pääjännitteet simuloituna ja oikealla mitattuna

Pienjännitekondensaattorien kytkennän aiheuttamat mitatut ylijännitteet olivat 1,3 … 1,4 pu vaihdeltaessa kytkettävän kondensaattoriportaan kokoa välillä 25 … 125 kvar.

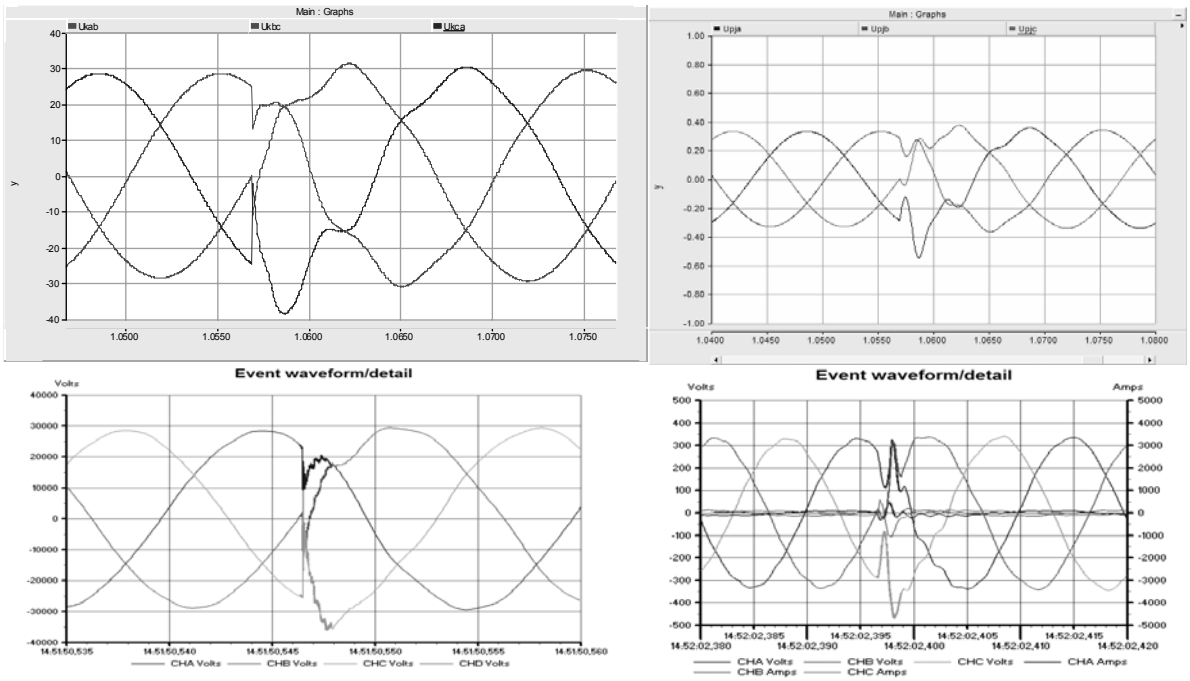
Vastaavat simuloidut arvot olivat 1,3 …1,5 pu. Vaihdeltaessa kytkentähetkeä saatiin simuloinnilla ylijännitteiksi:

- 25 kvar 1,3 … 1,5 pu
- 50 kvar 1,4 … 1,5 pu
- 75 kvar, 100 kvar ja 125 kvar 1,4 … 1,6 pu

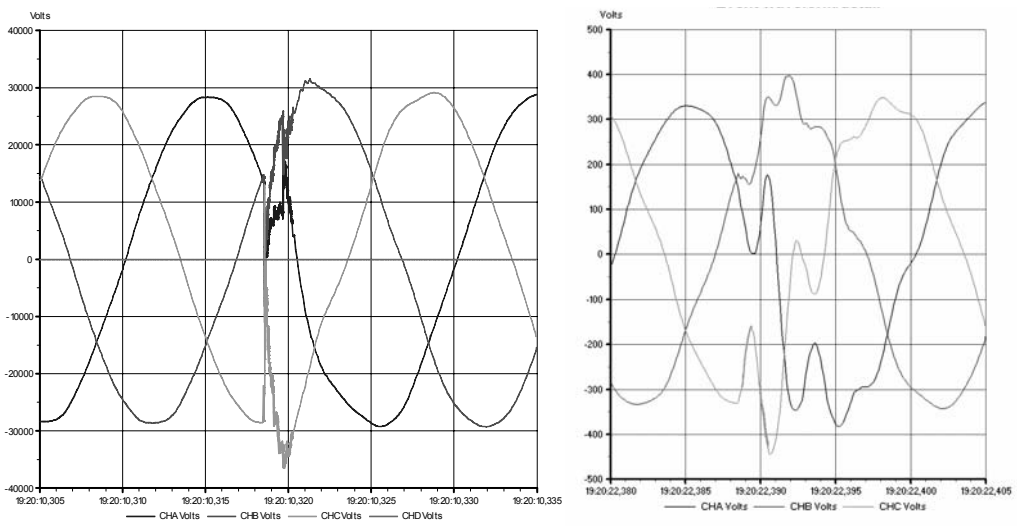
Keskijänniteverkkoa syöttävän päämuuntajan koko oli 16 MVA ja pätöteho n. 2,4 MW. Syöttävän 110 kV yhteyden pituus oli n. 100 km. Kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruus 20 kV puolella oli noin 2.6 kA.

Sähköaseman 2.4 Mvar kondensaattorin kytkennät aiheuttivat mitattuina 1,1 … 1,3 pu suuruisia ylijännitteitä pääjännitteissä.

Kuvassa 4.5 on esitetty kondensaattorin kytkennän vaikutus keskijännitepuolella ja pienjännitepuolella, kun pienjännitepuolella on kytkettynä 50 kvar kondensaattoriparisto.



Kuva 4.5 2.4 Mvar kj-kondensaattorin kytkentä, kun pj-puolella on 50 kvar kondensaattori: vasemmalla simuloidut ja mitatut kj-puolen pääjännitteet ja oikealla pj-puolen simuloidut ja mitatut vaihejännitteet



Kuva 4.6 2.4 Mvar kj-kondensaattorin kytkentä, kun pj-puolella on 137.5 kvar kondensaattori: vasemmalla simuloidut ja mitatut kj-puolen pääjännitteet ja oikealla pj-puolen simuloidut ja mitatut vaihejännitteet

Pienjänniteverkon mittauksia tehtiin muutaman kilometrin etäisyydellä sähköasemalta. Sähköaseman pääjännitteiden muutoksia vastaavaa suuruusluokkaa olevat suhteelliset muutokset näkyivät myös pienjänniteverkon vaihejännitteissä silloin, kun pienjänniteverkossa, jossa ei ollut kytkettynä kondensaattoreita. Simuloinnilla saatiin vaihtelualueeksi kytkentähetkeä muuteltaessa sekä vaihe- että pääjännitteissä 1,2 … 1,4 pu.

Kun pienjännitepuolella oli kytkettynä kondensaattoreita, olivat sähköaseman kondensaattorien kytkentöjen pienjännitepuolelle aiheuttamat ylijännitteet mitattuina 1,3 … 1,5 pu.

Muuttelemalla kytkentähetkeä saatiin simuloinnilla ylijännitteiden vaihtelualueiksi:

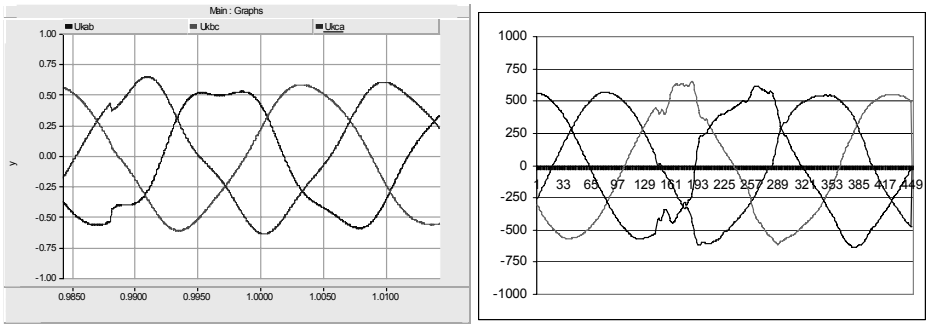
- 25 kvar 1,3 … 1,5
- 50 kvar, 75 kvar, 100 kvar ja 125 kvar 1,5 … 1,75 pu

Normaalin jännitteen päälle kerrostuva suhteellinen ylijännitetransientti vahvistui enimmillään reilusti kaksinkertaiseksi.

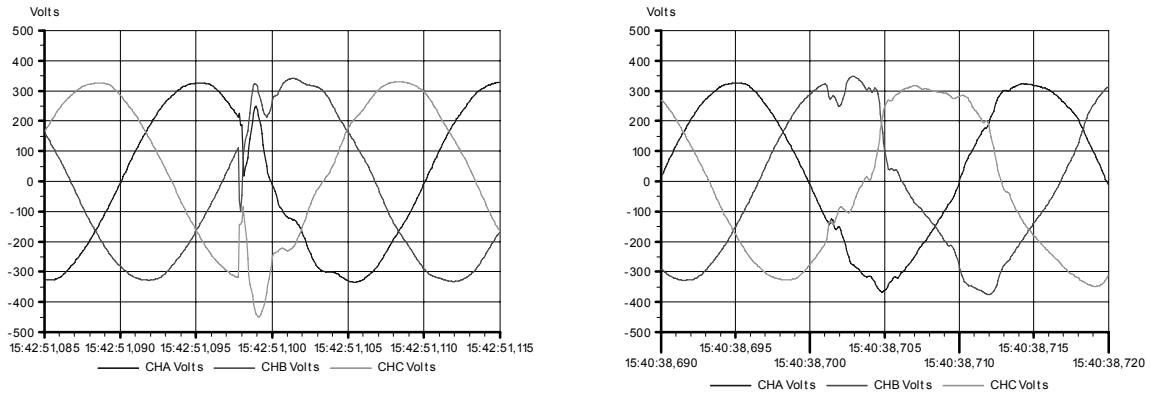
Yhteenveto kyseisessä esimerkkiverkossa kondensaattorikytkentöjen todennäköisesti pienjännitepuolelle aiheuttamista suurimmista ylijännitteistä on seuraava:

- pienjänniteverkon kondensaattorikytkennät: 1.6 pu
- sähköaseman kondensaattorin kytkennät, kun pienjännitepuolella ei ole kondensaattoria kytkettynä: 1,4 pu
- sähköaseman kondensaattorin kytkennät, kun pienjännitepuolella on kondensaattoreita kytkettynä: 1.8 pu

Estokelapariston kytkennöissä mitattiin pienjänniteverkon 100 kvar estokelapariston vaikutuksia. Kuvassa 4.6 on mitattu ja simuloitu 100 kvar estokelapariston vaikutus pääjännitteisiin. Kuvassa 4.7 on esitetty rinnakkain 100 kvar pj-kondensaattorin 100 kvar estokelapariston kytkentöjen mitatut vaikutukset. Estokelaparistolla värähtelyt ja ylijännite jäävät selvästi pienemmäksi.



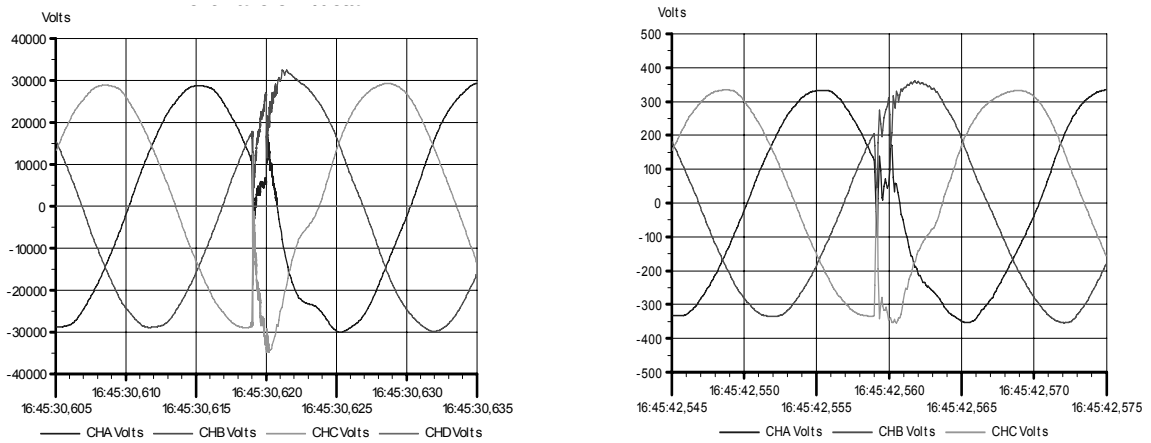
Kuva 4.6 100 kvar estokelapariston kytkentä: vasemmalla simuloidut pääjännitteet ja oikealla mitatut



Kuva 4.7 100 kvar pj-kondensaattorin ja 100 kvar estokelapariston kytkentöjen mitatut vaikutukset, estokelapariston vaikutus oikealla

Pienjännitepuolen estokelapariston kytkennän aiheuttama mitattu ylijännite oli alle 1,2 pu.

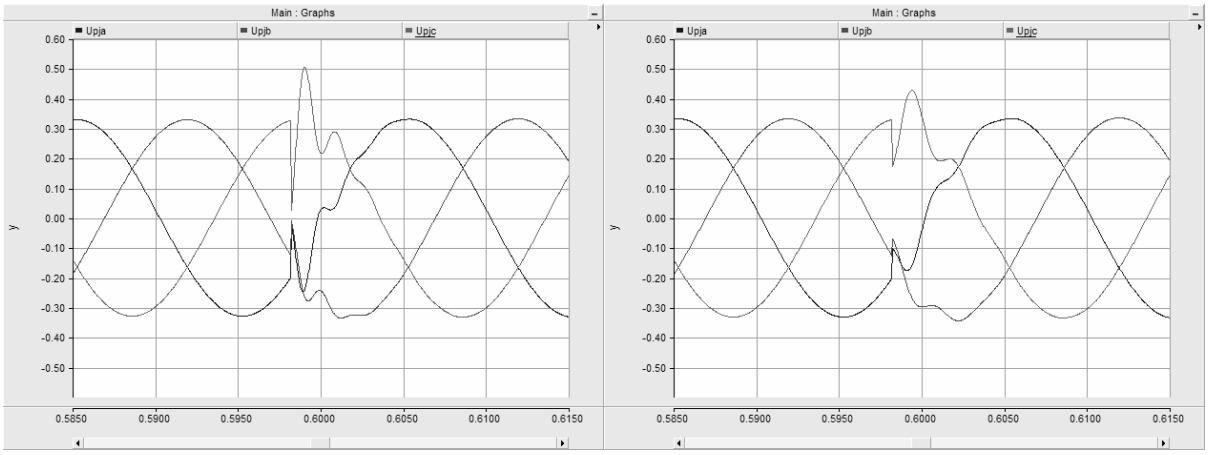
Sähköaseman kondensaattorikytkennän osalta suhteelliset ylijännitteet pienenivät jonkin verran pienjännitepuolella estokelapariston vaikutuksesta. Mitatut ylijännitteet pienjännitepuolen vaihejännitteessä olivat alle 1,1 pu ja pääjännitteessä alle 1,2 pu. Kuvassa 4.8 on esitetty mitatut keskijänniteverkon pääjännitteet ja pj-puolen vaihejännitteet 2.4 Mvar kj-kondensaattorin kytkennässä, kun pj-puolella on 100 kvar estokelaparisto. Kuvasta nähdään, että jännitetransientin vahvistumisen sijaan suhteellinen ylijännitehuippu onkin nyt pj-puolella pienempi kuin kj-puolella eli estokelaparisto on vaimentanut ylijännitettä.



Kuva 4.8 Mitatut keskijänniteverkon pääjännitteet ja pj-puolen vaihejännitteet 2.4 Mvar kj-kondensaattorin kytkennässä, kun pj-puolella on 100 kvar estokelaparisto

Estokelaparistoja käytettäessä ylijännitteet jäävät selvästi pienemmiksi kuin rinnakkaisparistoja kytkettäessä.

Verkossa aikaisemmin olevan kondensaattorin rinnalle kytketyn kondensaattoripariston vaikutusta on simuloitu kuvassa 4.8. Tässä tapauksessa verkossa jo ollut kondensaattori näyttää pienentäneen normaaliin jännitteeseen kerrostuvaa huipun nousun lähes puoleen.



Kuva 4.8 Pj-verkon 50 kvar kondensaattorin kytkentä vasemmalla ja oikealla 50 kvar kondensaattorin kytkentä, kun verkossa on jo ennalta 50 kvar kytkettynä

Talulukossa 4.1 on ylijännitteille mitattuja ja simuloituja suuruusluokkia, kun pienjänniteverkossa kytketään kondensaattoreita tai kun 2,4 Mvar keskijänniteparisto kytketään ja pienjänniteverkossa on kondensaattoreita kytkettynä.

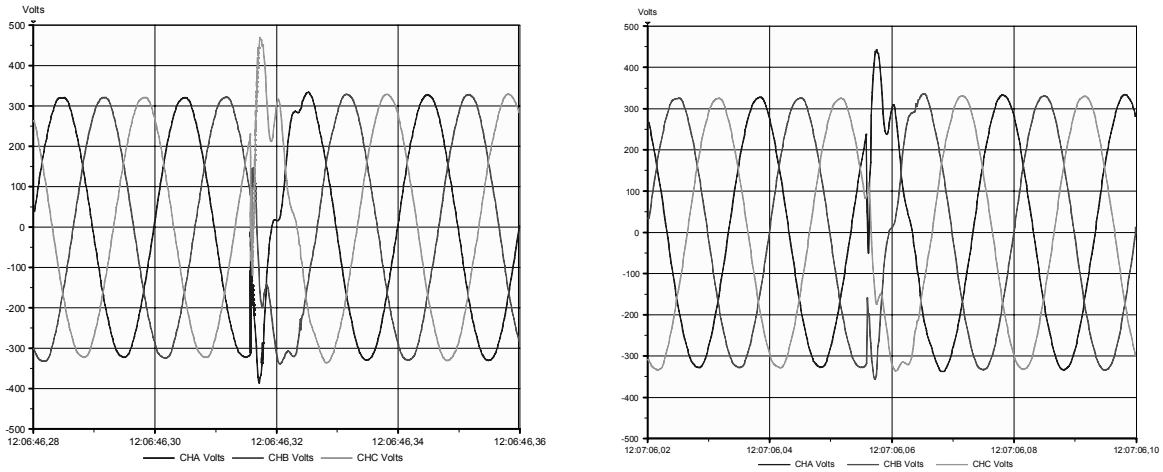
Taulukko 4.1 Simuloituja ja mitattuja ylijännitteitä

	25 kvar	50 kvar	75 kvar	100 kvar	125 kvar
Simuloitu Uv vaihtelu	1.29 - 1.47	1.39 - 1.53	1.42 - 1.56	1.42 - 1.57	1.40 - 1.58
Mitattu Uv	1.29	1.27	1.34	1.38	1.33
Vast. simuloitu Uv	1.44	1.36	1.40	1.54	1.48
Simuloitu Up vaihtelu	1.33 - 1.47	1.36 - 1.53	1.36 - 1.55	1.4 - 1.57	1.43 - 1.58
Mitattu Up	1.29	1.41	1.45	1.38	1.43
Vast. simuloitu Up	1.28	1.52	1.52	1.41	1.55

2.4 Mvar	25 kvar	50 kvar	75 kvar	100 kvar	125 kvar	0 kvar	esto
Simuloitu Uv vaihtelu	1.27 - 1.42	1.47 - 1.67	1.55 - 1.74	1.58 - 1.74	1.56 - 1.71	1.24 - 1.35	
Mitattu Uv	1.35	1.43	1.35	1.31 - 1.40	1.41 - 1.43		1.06 - 1.07
Vast. simuloitu Uv			1.51				
Simuloitu Up vaihtelu	1.30 - 1.45	1.54 - 1.69	1.53 - 1.70	1.52 - 1.71	1.49 - 1.68		
Mitattu Up	1.49	1.36	1.29	1.29 -1.31	1.35 - 1.42		1.16 - 1.17
Vast. simuloitu Up			1.60				

4.3 Käytännön häiriötapaus

Kuvassa 4.9 on 100 kvar kondensaattorin kytkennän aiheuttama transientti-ilmiö. Kytkentä tapahtui aina kompressorin käynnistyessä naapurikiinteistössä ja syöttävän jakelumuuntajan koko oli 200 kVA. Häiriintyvä kohde oli samassa muuntopiirissä oleva koneistamo, jossa esiintyi CNC työstökoneilla häiriintymistä ja pysähtymisiä. Mitattujen ylijännitteiden perusteella ilmeisestikin ylijännitteet olivat absoluuttiselta suuruudeltaan selvästi pienempiä kuin EMC-standardin sietovaatimukset. Toisaalta ne olivat kestoltaan huomattavasti pidempiaikaisia ja ongelmia ovat voineet aiheuttaa toisaalta jännitteen liiallinen hetkellinen romahtaminen sekä jännitteen liiallinen loveentuminen ja ylimääräiset nollakohdat. Ongelmat katosivat poistettaessa kondensaattori käytöstä.



Kuva 4.9 Mitattuja transientteja työstökonehäiriöiden selvittelyn yhteydessä: vasemmalla häiriön aiheuttajan luona ja oikealla häiriintyvässä kohteessa

5. YLIJÄNNITTEIDEN ARVIOINTI JA SYYT LAITEHÄIRIÖIHIN

Taulukossa 5.1 on koottu yhteenvetoa tarkastelluissa verkoissa esiintyvien ylijännitteiden suurimmista arvoista.. Maaseutuverkossa simuloidut ja kaupunkiverkossa simuloidut arvot vastaavat tämän selvityksen esimerkkiverkoille pahimmalle tapahtumahetkelle saatuja suurimpia arvoja. Vasemman puoleisen sarakkeen osalta verkkojen ominaisuuksia on pyritty myös kohtuullisesti varioimaan ylärajoja arvioitaessa

Taulukko 5.1 Pienjännitepuolella esiintyvien ylijännitteiden mitattuja, simuloituja ja arvioituja suurimpia arvoja

	Hetkellinen suurin ylijännite yleisesti	Maaseutuverkossa mitatut [pu]	Maaseutuverkossa simuloidut [pu]	Kaupunkiverkossa simuloidut [pu]
Kj-verkon yksivaiheinen maasulku	1,2 … 1,7	1,1	1,2	1,7
Kj-verkon yksivaiheinen maasulku ja vahvistuminen pj-verkon kondensaattorin takia	1,4 … 2			
Kj-verkon kondensaattorin kytkentä	1,6 … 1,7	1,3	1,4	
Kj-verkon kondensaattorin kytkentä ja vahvistuminen pj-verkon kondensaattorin takia	2,5	1,5	1,8	
Pj-verkon kondensaattorin kytkentä	1,6 … 1,7	1,4	1,6	
Kondensaattorin kytkentä teoriassa	2			
Kj-kondensaattorin kytkentä teoriassa ja 'normaali' vahvistuminen	> 3			
Kirjallisuudessa mainittu kondensaattorin kytkentä ja vahvistuminen	… 4			
EMC-standardi pj-syötön vaihejännitteelle (vaihe-nolla)	3,1 (1000 V)			
EMC-standardi pj-syötön vaihe-maa ja nolla-maa jännitteelle	6,1 (2000 V)			
EMC-standardi pj-syötön pääjännitteelle	1,8 (1000 V)			

Turvallisuutta koskevassa standardoinnissa eristysten mitoitusvaatimukset perustuvat nimelliseen ylijännitetasoon, joka kuvaa eristyksen määriteltyä kestävyyttä ylijännitteiltä (mitoitussyöksyjännite). Yksivaiheisilla ylijänniteluokan II laitteilla vaadittu hetkellisen ylijännitteen nimellinen kestotaso on 2500 V eli 7,7 pu, joka on taulukossa 5.1 referoituja EMC-standardeissa esitettyjä arvoja suurempi.

Maaseutuverkossa kondensaattorien kytkennän aiheuttamat mitatut ja simuloidut ylijännitehuiput vaihejännitteissä olivat suurimmillaan noin 50…60% häiriöiden sietoa koskevassa EMC-testauksessa kohdistettavan koejännitteen huippuarvosta. Vastaavat arvot pääjännitteissä olivat n. 80 … 100 %. Suurimmat arvot esiintyvät silloin, kun

keskijännitepuolella syntyvä transientti pääsee kondensaattoreiden takia vahvistumaan pienjännitepuolella. Verkon ominaisuuksia vaihdeltaessa todettiin, että myös yhteensopivuustason selvästi ylittävät ylijännitteet pääjännitteissä ovat mahdollisia, vaikkakaan niin suuria transientteja ei tarkastellun maaseutuverkon kondensaattorin kytkentöjen mittauksissa ja simuloinneissa havaittu.

Pienjänniteverkossa tehtävän kondensaattorin kytkennän aiheuttamia transientteja voivat vaimentaa merkittävästi verkossa jo kytkettynä olevat kondensaattorit.

Estokelaparistojen yhteydessä muutosilmiöt jäivät selvästi pienemmiksi kuin tavallisten rinnakkaiskondensaattoriparistoilla eikä mahdollisesti haitallisia vahvistumisia havaittu.

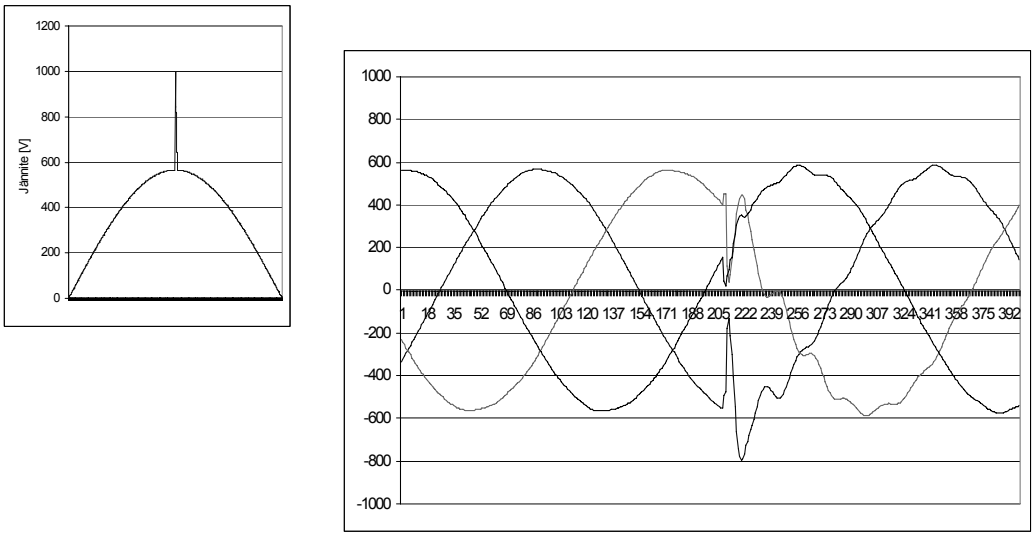
Taulukossa 5.2 on lisäksi hahmoteltu karkeasti suuntaviivoja joidenkin tekijöiden vaikutukselle esiintyviin ylijännitteisiin.

Taulukko 5.2 Eri tekijöiden vaikutuksia pj-verkon ylijännitetransienttien suuruuteen

	Kj-verkon maasulku	Kj-verkon konden-saattorin kytkentä	Pj-verkon konden-saattorin kytkentä
Kj-verkon kapasitanssit	+	-	
Verkon resistanssit	-	-	-
Resistiiviset kuormitukset	-	-	-
Kj-verkossa olevat kondensaattorit	-	-	
Pj-verkossa olevat kondensaattorit	+	+	-
Vikaresistanssi	-		

Em. perusteella esiintyvät ylijännitteet eivät näyttäisi etenkään vaihejännitteissä kovinkaan suurilta. Ongelmana haitallisuuden arvioinnin kannalta on kuitenkin, että toisaalta testijännite on kerrostetulta huipultaan (kuva 5.1) paljonkin suurempi absoluuttisena arvona, mutta toisaalta kytkentäylijännitteet ovat paljon pidempikestoisia. Standardoinnista ei löydy juurikaan vielä suoraan vastauksia, miten jälkimmäinen asia tulisi ottaa huomioon.

Suurempiakin ylijännitteitä voi kuitenkin syntyä viallisten tai vääränlaisten kytkinlaitteiden yhteydessä. Tällöin ylijännitteiden huiput voivat kasvaa merkittävästikin esi- ja jälleen-syttymisten takia. Mittauksissa tällaista ei kuitenkaan havaittu. Käytännössä asia voidaan varmistaa tarvittaessa tapauskohtaisesti tehtävillä häiriömittauksilla.

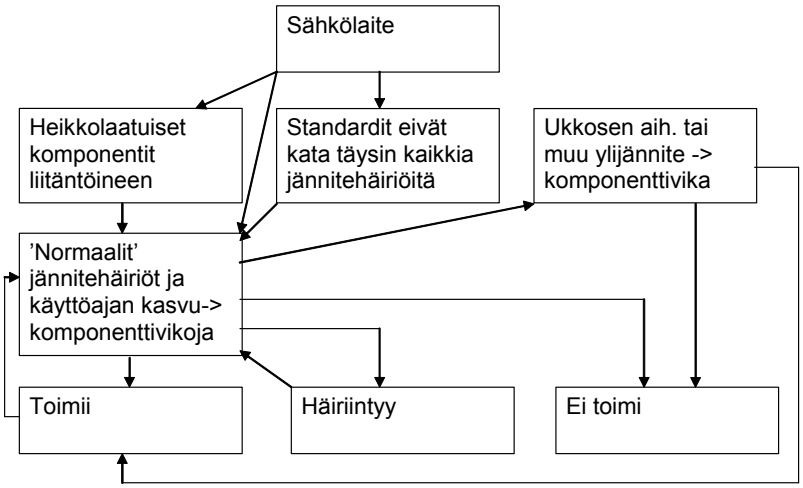


Kuva 5.1 Sähkölaitteen syötön pääjännitteelle EMC- testauksen jännite ja käytännössä esiintyvä ylijännite

Sähkölaitteiden toimintahäiriöitä ja laitevaurioita esiintymiseen vaikuttavat useat eri syyt. Näitä ovat mm.:

- Laitestandardit eivät lähtökohtaisesti pyri kattamaan täysin kaikkia sähköverkon ilmiöitä. Niillä pyritään kuitenkin varmistamaan laitteiden toimivuus suurehkolla todennäköisyydellä.
- Nykyiset EMC-standardeihin sisältyvät syöksyjännitetestit tulivat yleisstandardeihinkin vasta 1990-luvulla. Niinpä vanhempien sähkölaitteiden häiriösietoisuudet voinevat vaihdella paljonkin.
- Verkkojännitesyötön häiriöiden lisäksi häiriöitä voi kytkeytyä antenni-, tele- ja signaaliliitäntöjen sekä maadoitusten kautta. Myös potentiaalin tasaus voi olla puutteelinen ja maadoitusten kautta voi kytkeytyä häiriöitä.
- Transienttien yhteydessä absoluuttisten ylijännitteiden huippuarvojen lisäksi ongelmia voivat aiheuttaa myös ylijännitteiden kestoaika, jännitteen liiallinen hetkellinen romahtaminen sekä jännitteen liiallinen loveentuminen ja ylimääräiset nollakohdat.
- Laitteiden valmistuksessa ja komponenteissa esiintyy laatuvaihteluita.
- Laitteita käytettäessä esiintyy normaalia komponenttien vanhenemista.
- Ympäristöolosuhteet:
    - lämpö, pölyyntyminen, likaantuminen, kosteus, tärinä lisäävät ajan myötä vikaantumisriskejä

Kuvassa 5.2 on pyritty havainnollistamaan yleisellä tasolla erilaisia sähkölaitteiden mahdollisten häiriöiden ja vaurioitumisten syitä.



Kuva 5.2 Sähkölaitteiden häiriö- ja vikaantumismekanismeja

Komponenttien vanheneminen, haurastuminen sekä huonot liitokset ja juotokset aiheuttavat asteittaista vikaantumista. Yhdessä sähköisten häiriöiden vaikutusten kanssa laitteet ennemmin tai myöhemmin vikaantuvat, vaikka mitään erityisen suuria ylijännitteitä ei esiintyisi.

Toisaalta myöskään standardit eivät pyri kattamaan kaikkia sähköverkon ilmiöitä ja jo lähtökohtaisesti hyväksytään, että laiteita vaurioituu tai häiriintyy jollakin todennäköisyydellä. Toisaalta sähkön laadullekaan ei haluta asettaa liian tiukkoja vaatimuksia, jotka johtaisivat verkkojen merkittäviin muutostarpeisiin ja kustannusten kasvuun. Myös EMC-standardin mukainen testijännite on kestoltaan huomattavasti lyhytaikaisempi kuin nyt tarkastellut ylijännitteet, vrt. kuva 5.1.

Laitteissa esiintyy myös laatuvaihteluita ja viallisia komponenttejakin. Esimerkkinä heikkolaatuisista komponenteista ovat olleet mm. kondensaattorit, joiden vioittuminen on aiheuttanut paljon mikrotietokoneiden emolevyjen vikoja 2000-luvun alkupuolella.

Laitevauriot paljastuvat joskus jännitekatkojen yhteydessä. Lyhyissä jännitekatkoissa laite ei ehkä esim. kondensaattoreihin jääneen varauksen takia ehdikään palautua normaaliin tilaan ja jännitteen palautuessa syntyy ylimääräinen rasitus, jonka seurauksena laitteen vikaantuminen havaitaan. Kunnossa olevien sähkölaitteiden pitäisi toki sietää jännitekatkot ja –kuopat moitteettomasti ja pystyä normaaliin toimintaan niiden jälkeen.

Mittausten ja simulointien perusteella absoluuttisina arvoina nyt tarkastellut ylijännitteet ovat suurella todennäköisyydellä standardien testijännitteiden absoluuttisia vaatimusarvoja pienempiä. Kuitenkin esi- ja jälleensyttymisten takia, joita ei merkittävästi havaittu verkkokokeissa, voi esiintyä myös nyt saatuja suurempia ylijännitteitä. Käytännössä tämä voidaan varmistaa vain käytännössä tehtävillä mittauksilla.

Vaihejännitteissä mitatut ja simuloidut jännitetransientit olivat absoluuttisilta arvoiltaan selvästi pienempiä kuin sähkölaitteiden standardien mukaisissa testauksissa ja mitoituksissa normaalisti käytettävät mitoitussyöksyjännitteet. Kestoltaan ne olivat kuitenkin tyypillisesti huomattavasti pidempiaikaisia. Tämä herättääkin kysymyksen: voivatko nämä kytkentäjännitteet kuitenkin olla merkittävä syy laitehäiriöihin ja pitäisikö standardien testejä kehittää kattamaan myös pidempiaikaisia transienttijännitteitä?

Mm. nopeussäädettyjen sähkökäyttöjen yms. tehoelektroniikkaa ja ohjauksia sisältävien laitteistojen osalta kytkentätransientit on useasti mainittu laitehäiriöiden syyksi. Absoluuttisten ylijännitteiden huippuarvojen lisäksi ongelmia näissä voivat aiheuttaa myös ylijännitteiden kestoaika, jännitteen liiallinen hetkellinen romahtaminen sekä jännitteen liiallinen loveentuminen ja ylimääräiset nollakohdat.

Luvussa 6 ja liitteessä 1 on käsitelty tarkemmin rakennuksissa esiintyviä vaara- ja häiriöjännitteitä, salaman vaikutuksia, laitteiden häiriintymismekanismeja sekä suojautumista häiriöiden varalle. Liitteessä 1 tarkastellaan lisäksi suppeahkosti elektroniikkalaitteiden suojausta.

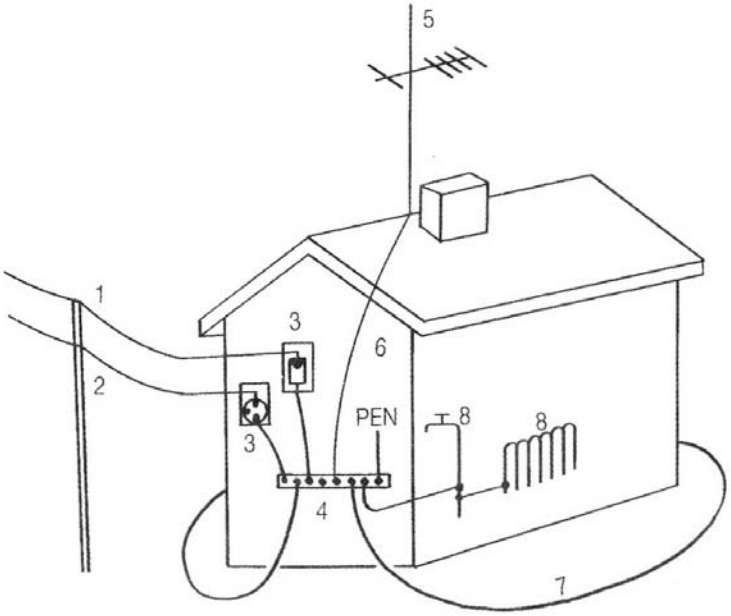
6. SÄHKÖ- JA TELEVERKKOJEN YHTEENSOPIVUUS

Tässä luvussa tarkastellaan rakennuksissa esiintyviä vaara- ja häiriöjännitteitä, salaman vaikutuksia sekä suojautumista häiriöiden varalle. Liitteessä 1 tarkastellaan lisäksi elektroniikkalaitteiden suojausta sekä mikrotietokoneen rakennetta.

Tämä osuus on rajattu suppeaksi mm., koska selvitystyön aikana ilmeni, että tarjolle tuli aihepiiristä uusi varsin kattava julkaisu ’Rakennusten ylijännite- ja ukkossuojaus’ (Sähkö- ja teleurokoitsijaliitto STUL ry, 2005, 170 s.). Tosin em. julkaisun ilmestymisen jälkeenkin lienee jo tullut joitakin muutoksia ohjeistukseen. Lisäksi pienjänniteasennuksia käsitellään perusteellisesti niitä koskevassa uusiutumassa olevassa standardissa SFS 6000 Pienjänniteasennukset.

Rakennusten häiriösuojaukseen kiinnitetään nykyisin yhä enemmän huomiota. Tämä johtuu esim. siitä, että elektroniikkalaitteiden määrä asunnoissa on kasvanut ja näin ollen myös sähköverkon häiriöiden aiheuttamat korvauskustannukset ovat kasvaneet. Lisäksi laitteet kytkeytyvät usein sekä sähkö- että televerkkojen välille (televisio, tietokone, yms.), jolloin rakennuksen suojausvaatimukset kokonaisuutena on noussut esille. Tässä osiossa pohditaan verkkohäiriöiden vaikutuksia erilaisille kotitalouslaitteistoille sekä mahdollisia häiriöiltä suojautumistapoja.

Rakennusten ukkossuojauksen toimivuuden kannalta nykyään sähkö- ja televerkot yhdistetään samaan potentiaalintasauskiskoon ja rakennukseen tulevat kaikki yhteydet tulisi pyrkiä maadoittamaan ylijännitesuojauksineen samaan pisteeseen.



Kuva 6.1 Rakennuksen suojauksen pääperiaatteet

Yllä olevassa kuvassa on esitetty rakennuksen ukkossuojauksen pääperiaatteet. Kaikkien erillisten systeemien maadoitukset liitetään samaan potentiaalintasauskiskoon, johon liitetty PEN –johdin liitetään pääkeskuksen PEN tai PE –johtimeen. Sekä puhelin, että sähköjohdot on kuvassa yhdistetty yhteiseen maadoitukseen ylijännitesuojien kautta.

7.2 Vaara- ja häiriöjännitteet sekä niiden vaikutukset laitteistoille

Sähköverkossa esiintyy useita eri tyyppisiä häiriöitä, jotka sähköverkkoon liitetyn laitteen tulisi kestää. Näitä ovat mm.

- kytkentätransientit
- yliaallot (virrat sekä jännitteet)
- salamaylijännitteet
- ali- ja ylijännitteet ja
- jännitekuopat.

Tässä osiossa keskitytään salamavirtojen ja jännitteiden aiheuttamiin haittoihin. Vaikka laitteet eivät itsessään kestä kaikkia suoria rasituksia, voidaan laitteiden kestävyyttä parantaa eri tavoin. Eri mahdollisuuksista laitteiden parempaan häiriökestoisuuteen on kerrottu myöhemmin tässä kappaleessa ja liitteessä 1. Alla on kuvattu hieman tarkemmin eri häiriöiden aiheuttamia haittoja eri laitteistoille.

Transientit ja yliaallot

Kytkentätransientit saattavat vaikuttaa laitteiden toimintaan usealla eri tavalla esim. tapauksessa, jossa jännitteeseen syntyy uusia nollakohtia (nollatason ylitykset/alitukset). Tämän voi sekoittaa logiikkapiirien toimintaa, jos niitä esim. ohjataan nollatason avulla. Yliaallot voivat tämän lisäksi aiheuttaa toisissa laitteissa ylimääräistä lämpenemistä mm. johtimissa tapahtuvan virranahtautumisen seurauksena ja tietyillä rakenteilla vanhentaa komponenttia oletettua nopeammin. Tämä lisää laitteen vikaantumisriskiä ajan myötä.

Jotkut laitteet aiheuttavat puolestaan yliaaltoja verkon suuntaa, mikä voi johtaa vakaviin ongelmiin sähköverkossa. Tällaisia ongelmia ovat verkon komponenttien väliset resonanssit, jotka vahvistavat yliaaltotaajuuksia sekä sähköverkon komponenttien mahdollinen ylikuormitus ylimääräisen lämpenemän seurauksena.

Tarkemmin transienttikokeista sähköverkossa on kerrottu tämän dokumentin luvussa 4. Yleisemmin transienttien ja yliaaltojen vaikutuksista on käsitelty mm. lähteessä [4].

Salaman vaikutukset

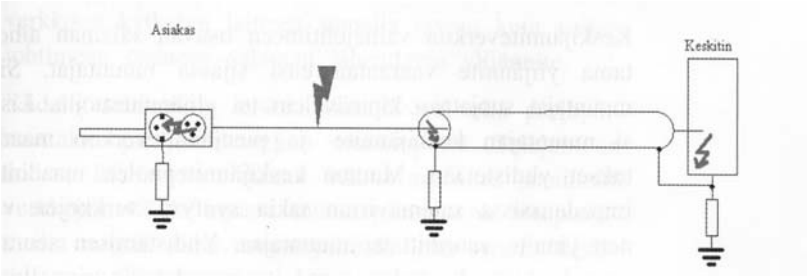
Salamaylijännitteet ovat sähköverkon yleinen laitevaurioiden aiheuttaja. Niitä voi kytkeytyä laitteistoihin eri tavoin, mutta suurin todennäköisyys on, että salamajännitteet pääsevät laitteisiin laajojen verkkojen kautta (sähkö ja televerkot). Salamaylijännitteet voivat aiheuttaa yhteis- sekä eromuotoisia häiriöitä, joihin pitää varautua eri tavoin. Kumpaakin häiriötyyppiä vastaan on mahdollista suojautua ylijännitesuojauksen avulla, mutta myös maadoitusrakenteella sekä -olosuhteilla on niiden suhteen suuri merkitys etenkin laitteilla, jotka on kytketty eri verkkojen välille (esim. sähkö- ja televerkko).

Esimerkkejä erilaisista salaman aiheuttamista häiriöistä

Salaman aiheuttamat vaaratilanteet suojamaadoittamattomalle telejohdolle on nähtävissä kuvassa 7.2.

Salama voi aiheuttaa seuraavia seuraamuksia:

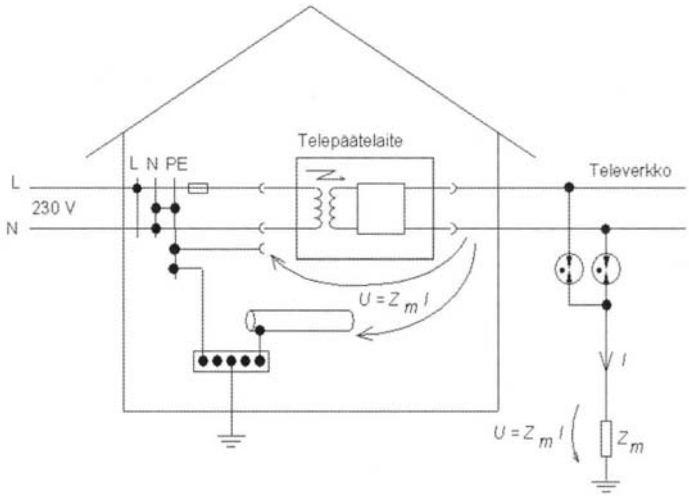
- Salama voi puhkaista vaipan (valokaari) ja vaurioittaa kaapelin johtimia/eristystä
- Jos kaapeli ei ole maadoitettu päästänsä, nousee jännite hetkellisesti kaapelin päässä kaksinkertaiseksi, jolloin läpilyönnin vaara kasvaa.
- Vaippaan muodostuu pitkittäinen jännite, joka kohdistuu kaapelin päässä olevaan laitteeseen. Tämä voi vaurioittaa laitetta, jos muodostunut pitkittäisjännite on riittävän suuri [1].



Kuva 7.2 Salaman aiheuttamia vauriomahdollisuuksia telekaapelissa

Aiemmin ukkossuojaukseen ei kiinnitetty paljon huomiota, jonka vuoksi joissakin vanhoissa rakennuksissa saattaa olla käytössä erilliset maadoitukset sähkö- ja televerkoille. Lisäksi tele- ja sähköjohtimet tuodaan mahdollisesti rakennukseen eri suunnista, jolloin on vaara mm. indusoituneitten salamajännitteiden aiheuttamille yhteismuotoisille häiriöille. Tämä saattaa vaurioittaa laitteita, jotka on kytketty useamman eri verkon välille.

Tyypillinen esimerkki yhteismuotoisen häiriö aiheuttamista vahingoista on ukkosen aiheuttama tietokonevika kaupunkiympäristössä, jossa sähkönsyöttö hoidetaan maakaapelilla. Sähkö- ja puhelinliitynnät tulevat taloon eri pisteistä, jolloin ylijännite voi indusoitua vain toiseen verkkoon ja muodostaa jännite-eron sähkö- ja televerkon välille, jos suojausta ei ole asianmukaisesti hoidettu. Jännitteen suuruus eri verkkojen välillä voi olla useita kilovoltteja. Jos yhteismuotoisen häiriön esiintyessä jokin laite (esim. modeemi tai televisio) on kytketty kahteen erilliseen verkkoon, voi yhteismuotoinen häiriö rikkoa laitteen. Pelkästään toisessa verkossa oleva laite ei huomaa yhteismuotoista häiriötä. Periaatteellinen kuva asiasta on esitetty alla.



Kuva 7.3 Kuva yhteismuotoisen häiriön aiheuttamasta läpilyönnistä laitteen sisällä

Kuvassa televerkko on suojattu televerkon kautta tulevilta ylijännitehäiriöiltä kauempana kuin liityntäpisteessä. Tällöin salamavirta aiheuttaa telepäätelaitteen ja sähköverkon välille jännitteen Z_m*I ja jos salaman indusoima virta telejohtimiin on suuruudeltaan esim. 100 A ja maadoitusresistanssi Z_m on 100 Ω, syntyvä jännite on luokkaa 10 kV. Tämän vuoksi suojat

pitää liittää samaan maapotentiaalin rakennuksen muun suojauksen kanssa. Myös tässä tapauksessa johtimien pituudet potentiaaliin pitää minimoida johtimen induktiivisten ominaisuuksien vuoksi. Jos virran nousunopeus on suuri, johtimen induktiiviset ominaisuudet aiheuttavat suojattavassa laitteessa jännitteen, joka on verrannollinen maadoitusjohtimen pituuteen [1].

Ali- ja ylijännitteet

Lyhytaikaiset alijännitteet eivät yleensä aiheuta vaaraa sähköverkkoon kytketyille laitteille. Uudemmat laitteet pystyvät toimimaan laajalla jännitealueella, esim. tietokoneet 90-250 V. Toisaalta alijännitteet lisäävät laitteiden virrankulutusta (hakkuritehonlähteet mukautuvat syöttöjännitteeseen, mutta ottavat vakiotehon), joka puolestaan voi vaikuttaa laajassa mittakaavassa verkon jännitetasoon ja voi aiheuttaa mahdollisesti sulakepalojen vaaran.

Alijännitteet voivat kuitenkin joillakin laitteistoilla vaikuttaa laitteen toimintaan, kuten esim. ohjelmoitavien logiikoiden tapauksessa. Jos logiikan tehonsyöttöä ei ole varmistettu esim. UPS -laitteella, voi lyhyt katko tai jännitekuoppa aiheuttaa laitteen nollautumisen tai jumittaa laitteen toiminnan kokonaan, jonka jälkeen laite on käynnistettävä uudestaan.

Joissakin tapauksissa myös käyttötaajuiset ylijännitteet voivat aiheuttaa ongelmia, mm. elektroniikkaa sisältäviä laitteita on rikkoontunut ylijännitteiden seurauksena. Erityisen haitallinen on nollajohtimen katkeaminen, minkä seurauksena laitteen saama vaihejännite voi nousta jopa pääjännitteen suuruiseksi eikä verkon normaali suojaus katkaise sähköä. Tulevaisuudessa entistä älykkäämpiin energiamittareihin on jatkossa integroitavissa myös katkaisulaite, jolloin suojaus voidaan toteuttaa myös nollavikojen varalle laukaisevana. Yleisesti ottaen laitteet kuitenkin kestävät hyvin pieniä ylijännitteitä.

Lyhyet katkot

Lyhyet katkot voivat olla joillekin laitteille suuri ongelma, sillä komponentit eivät välttämättä saa ”palautua” rauhassa. Esim. kondensaattoreiden varaus ei purkaannu kokonaan lyhyen katkon aikana. Kondensaattorin jäännösjännite sekä nopeasti palautuva verkkojännite voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa laitteen vioittumisen tai estää laitteen oikean toiminnan heti katkon jälkeen.

Maasulun vaikutukset

Maasulku saattaa vaurioittaa laitteita, mm. tilanteissa joissa vain toinen suoja syttyy johtimilla maasulun seurauksena. Suojien syttymisjännitteet saattavat hieman erota toisistaan, jolloin vain toinen suoja saattaa syttyä lievissä ylijännitetilanteissa, kuten maasuluissa. Toisen suojan syttyminen saa aikaan suuren energiasiirron laitteen läpi ja voi vaurioittaa laitetta [1]. Tämän vuoksi suojien mitoittamisessa on huomioitava myös maasulkuilmiön vaikutukset.

Suojamaadoituksen puuttuminen
Sähköverkkoon liitettävistä elektroniikkalaitteista varsin suuri osa on luokan I laitteita. Tämä johtuu siitä, että laitteistoissa käytettävät suodatinkondensaattorit on kytketty suojajohtimeen. Samaan johtimeen maadoitetaan laitteen metallikuori, millä estetään jännitteen pääsy laitteen kuoreen vikatilanteissa. Jos I-luokan laite liitetään pistorasiaan, joka ei ole suojamaadoitettu, voivat seuraukset olla vakavat. Kytkennän seurauksena voi sähköverkon jännite päästä sähköverkkoon, jos peruseristys pettää.
Verkkosuodatinkondensaattorit jäävät maadoittamatta, jolloin laitteen runkoon voi tulla verkkojännite. Toisaalta suodatin menettää tilanteessa yhteismuotoisten häiriöiden suodatusominaisuutensa. Lisäksi kondensaattoreiden kautta kulkeva virta kulkee telejohtojen kautta aiheuttaen häiriöitä ja jopa laitevaurioita [6].

Uusissa rakennuksissa maadoitetut pistorasiat ovat pakollisia, mutta vanhemmissa rakennuksissa niitä saattaa vielä olla käytössä.

7.2 Häiriöiltä suojautuminen

Jokainen häiriö rasittaa omalla tavallaan sähköverkkoa ja siihen liitettyjä laitteita samoin kuin normaalissa käyttötilanteessa esiintyvät rasitukset. Rasituksen suuruuteen voidaan sekä normaalissa käyttötilanteessa että häiriötilanteessa vaikuttaa kuitenkin monella eri osa-alueella. Tässä keskitytään häiriöiltä suojautumismahdollisuuksiin, joihin voidaan lukea kuuluvaksi mm.

- suojautuminen sähköverkon häiriöitä vastaan
- suojautuminen muista verkoista tulevia häiriöitä vastaan
- maadoitusten toimivuus
- laitteen suojaustaso
- laitteiden suunnitteluperiaatteet sekä
- laitteissa käytetyt komponentit ja niiden mitoitus.

Suojautuminen sähköverkon häiriöitä vastaan
Sähköverkon suojauksella pyritään asiakkaan näkökulmasta pienentämään häiriön vaikutusta liityntäpisteessä. Sähköverkon näkökulmasta tavoitteena on tietysti myös itse verkon suojaaminen, mutta tässä keskitytään lähinnä asiakkaan laitteiden suojausperiaatteisiin.

Ukkoseen liittyvien ylijännitteiden lisäksi toinen mahdollinen ongelma asiakkaiden laitteille voi olla kytkentätransientit. Kytkentätransienttien aikana jännite voi olla jopa 3 p.u. mitoitettuun jännitteeseen nähden. Ylijännitteeltä voidaan suojautua mm. estämällä jännitteen nousu liityntäpisteessä esim. ylijännitesuojilla. Transienttijännitteiden varalta on olemassa transienttisuojia eri laitteille, mutta niiden toimintaa ei ole tässä tarkemmin selvitetty. Yleensä

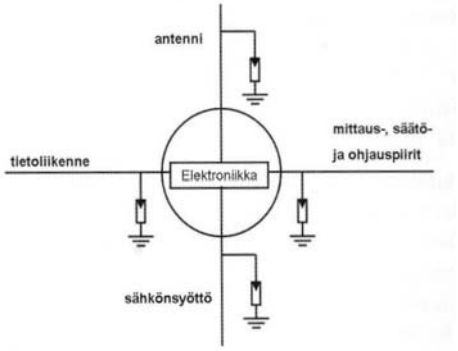
UPS- laitteissakin on jonkinlaiset transienttisuojat, joilla pyritään estämään transienttien pääsy suojattuun laitteistoon mm. suodinratkaisuilla.

Jännitekuoppia vastaan voidaan puolestaan varautua mm. UPS –laitteistoilla, vauhtipyörillä, superkondensaattoreilla, yms. [4]. Yleisin ratkaisu esim. tietokoneen suojaamisessa on UPS.

Salamaylijännitteet aiheuttavat suurimmat vauriot laitteille. Sitä vastaan on mahdollista suojautua ylijännitesuojauksella, joka voidaan toteuttaa portaittaisesti.

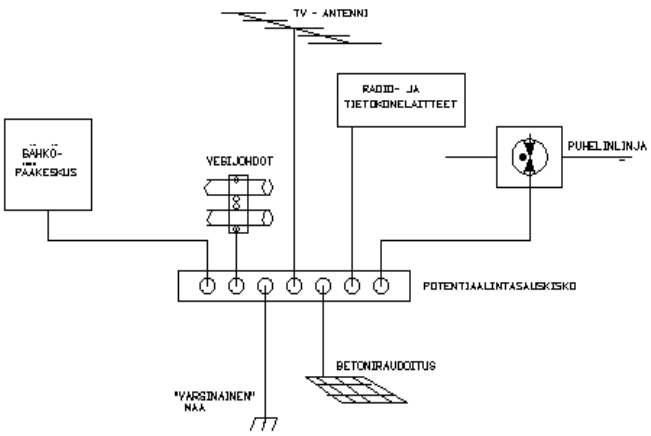
Muiden verkkojen suojausperiaatteet

Myös muiden verkkojen laitteet on tulee suojata ylijännitesuojilla ilmastollisia ylijännitteitä vastaan. Periaatteita viestintäverkkojen sähköisestä suojaamisesta on esitetty mm. lähteessä [2]. Viestintäverkkojen osalta edellytetään [2] standardien läpäisseiden laitteiden käyttöä, joiden ylijännitekestoisuus tunnetaan. Tällöin suojaustasojen määrittäminen suunnittelu voidaan tehdä laitteen ominaisuuksien pohjalta. Parhaaseen ratkaisuun päästään käyttämällä erillisiä ylijännitesuojia eri verkoissa sekä muissa erillisissä piireissä alla olevan kuvan esittämällä tavalla. Suojat tulee lisäksi yhdistää samaan maapotentiaaliin.



Kuva 7.4 Tehokas elektroniikkalaitteen suojaus ylijännitteitä vastaan (periaatekuva)

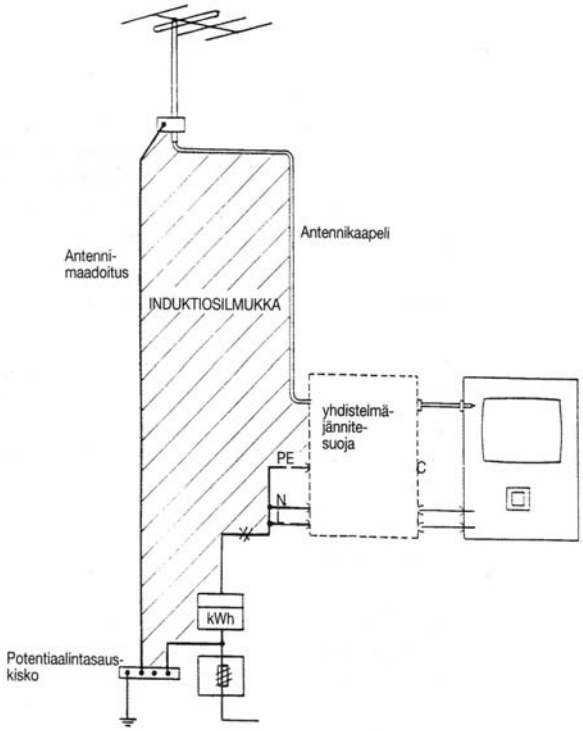
Rakennusten tele- ja sähköverkkojen suojaaminen ukkossuojilla on erillisten verkkojen suojaamiseksi hyvä ratkaisu, mutta tehokas suojaus vaatii myös yhteisen maadoituspisteen eri verkkojen välille. Johtimet on tuotava rakennukseen suunnilleen samasta pisteestä, jolloin indusoituneet häiriöt samanlaisia molemmissa verkoissa eikä jännite-eroa synny. Tämän lisäksi maadoituskiskoon (potentiaalintasauskisko) yhdistettävät johtimet on pidettävä mahdollisimman lyhyinä [1]. Tämä ehkäisee salamavirroista indusoituneita yhteismuotoisia ylijännitteitä ja estää moneen verkkoon liittyneen laitteen vaurioitumisen. Ylijännitesuojat on myös kytkettävä kummankin johtimen ja maan välille, jolloin yhteismuotoisten häiriöiden eteneminen estyy. Toisaalta eromuotoisia häiriöitä estää meno- ja paluujohtimen välille kytketyt suojat. Täydellisesti vaurioita ei voi välttää, mutta hyvien suojauskäytäntöjen noudattaminen pienentää vaurioriskiä huomattavasti.



Kuva 7.5 Periaatekuva maadoitusten toteuttamisesta rakennuksessa

Maadoitusten rakenne

Maadoitusrakenteissa on havaittu tehdyissä testeissä esiintyvän ongelmia n. 4 %:ssa häiriötapauksia [6]. Maadoituksen toimivuuteen vaikuttaa maatason yhtenäisyys (ks. edellinen kohta), maadoitusresistanssin suuruus, maadoitusliitosten kunto, yms. vastaavat yleiset seikat. Lisäksi suuremmilla taajuuksilla maasilmukat saattavat aiheuttaa ongelmia (ks. alla oleva kuva).



Kuva 7.6 Induktiosilmukan muodostuminen antenniverkossa.

Kuvan kaltaisiin induktiosilmukoihin voi muodostua kymmenien kilovolttien jännite salaman seurauksena [1]. Indusoituneilta silmukkajännitteiltä voi suojautua esim. yhdistelmäsuojalla.

Maasilmukan muodostuminen saattaa häiritä myös laitteiden toimintaa. Näin on esim. tapauksessa, jossa maalenkki muodostuu sähköverkon ja tele/antenniverkon maadoitusten välille. Yhtenä esimerkkinä voidaan käyttää tietokoneen välityksellä muodostuvaa maalenkkiä. Tällöin silmukka muodostuu pistorasian suojamaan kautta tietokoneen runkoon, josta maataso liittyy äänikortin maatasoon. Äänikortti on mahdollisesti puolestaan yhteydessä stereoihin, johon kytkeytyy antenniverkon maadoitus. Maasilmukka täydentyy potentiaalintasausjärjestelmän kautta. Maasilmukassa saattaa kulkea pieni virta, ja tämä voi mm. aiheuttaa kohinaa äänikortin ulostuloon. Kyseinen ongelma esiintyy yleensä vanhemmissa taloissa, joissa on käytössä TN-C järjestelmä, jolloin PEN –johtimessa syntyy jännitehäviöitä nollajohtimen virran vuoksi.

Harhavirrat maatasossa voivat pahimmassa tapauksessa johtaa jossakin vaiheessa laiterikkoon. Ratkaisu maalenkkiongelmaan on maalenkin katkaiseminen. Se mistä kohtaa, ja millä tavalla tämä on parasta suorittaa, riippuukin sitten aina tilanteesta. Yleisin tapa maalenkin katkaisemiseen ovat galvaaniset erottimet, joita on saatavilla niin antenni, kuin audiokaapeleihinkin. Galvaaninen erotin katkaisee kaapelin maalenkin kannalta, mutta päästää silti hyötysignaalin lävitseen.

7. YHTEENVETO

Tutkimuksen keskeisenä tavoitteena oli saada käytännön tasolla kaivattua informaatiota sähköverkossa esiintyvistä ilmiöistä ja häiriöiden siirtymisestä sähköverkossa erityisesti pienjänniteverkon kannalta asiakasrajapinnassa tarkasteltuna. Pääpaino on ollut maasulkujen aiheuttamissa ylijännitteissä ja kondensaattorien kytkentöjen aiheuttamissa ylijännitteissä. Tavoitteena on ollut näin tukea sähkölaitteiden häiriö- ja vauriotapausten selvittelyä sekä ohjeistamista sähkölaitehäiriöiden ja –vaurioiden ennalta ehkäisemiseksi

Selvitys fokusoitui seuraaville osioille:

1. Keskijänniteverkon viat ja erityisesti maasulkujen vaikutus pienjänniteverkkoon
   - teoria, simulointi sekä verkkokokeet ja mittaukset
2. Keskijännite- ja pienjänniteverkon kondensaattoreiden verkkoon kytkennän vaikutukset
   - teoria, simulointi sekä verkkokokeet ja mittaukset
3. Jännitteen ominaisuuksia ja sähkölaitteita koskevien standardien sisältö
   - ylijännitteet lähinnä yleisten standardien pohjalta
4. Sähkö- ja televerkkojen yhteensopivuus

<u>Turvallisuusstandardeissa</u> yksivaiheisesti syötettyjen kulutuslaitteiden (ylijänniteluokka II) <u>eristysten</u> mitoitusvaatimusten perusteena käytettävä nimellinen mitoitussyöksyjännite on 2.5 kV 230 V jännitetasolla. Tätä arvoa sovelletaan yhtenä peruslähtökohtana turvallisuusstandardeissa sähkölaitteiden eristyskoordinaatiossa. Mikäli sovelletaan standardeissa esitettyjä mitoitusohjeita, ei testejä tarvita. Testauksenkaan aikana laitteen ei tarvitse olla normaalisti verkkoon liitettynä, vaan eristykset voidaan testata muuten. Tarkastelluissa pienjänniteverkoissa määritetyt ylijännitteet jäivät selvästi alle em. mitoitusarvon.

<u>Sähkölaitteiden yhteensopivuutta ja häiriösitoisuutta koskevissa EMC-standardeissa</u> syöksyjännitteiden impulssijännitteen sietotaso mitoitettaessa ja testattaessa kotitalouksissa ja toimistoissa tyypillisesti käytettäviä kojeita ovat +/- 1 kV johtimien välillä ja +/- 2 kV johtimien ja maan välillä. Yksivaiheisten kulutuskojeiden kannalta tarkasteltuna esimerkkiverkkoihin liittyvien mittausten ja simulointien tulosten mukaan jäätiin tyypillisesti selvästi standardien raja-arvoja pienempiin huippuarvoihin.

Absoluuttisen transientin suuruutena selvästi lähimmäksi sietotasorajaa päädyttiin sähköasemakondensaattorin kytkennän aiheuttaman transientin vahvistuttua edetessään pj-verkkoon, jossa oli kondensaattori. Pienjänniteverkossa olevan kondensaattorin aiheuttaman vahvistumisen seurauksena keskijännitekondensaattorin kytkentä voi aiheuttaa yhteensopivuustasoa suurempiakin ylijännitteitä pääjännitteiden osalta. Kaapeloidussa kaupunkiverkossa vahvistumisen seurauksena tämä on myös mahdollista maasulunkin yhteydessä.

Pienjänniteverkossa kondensaattorin kytkennän aiheuttamia transientteja ja ylijännitteitä voivat vaimentaa merkittävästi verkossa jo kytkettynä olevat kondensaattorit.

Estokelaparistojen yhteydessä muutosilmiöt jäivät selvästi pienemmiksi kuin tavallisten rinnakkaiskondensaattoriparistojen yhteydessä eikä mahdollisesti haitallisia vahvistumisia havaittu.

Standardien vaatimukset on esitetty varsin lyhytkestoisille transienteille ja käytännössä energiasisältö voi olla standardiarvoja suurempi. Tällä on myös vaikutuksensa laitehäiriöiden esiintymiseen, mutta asiaa ei pyritty selvittämään tarkemmin tässä tutkimuksessa.

Kondensaattorien kytkennän aiheuttamien transienttien yhteydessä absoluuttisten ylijännitteiden huippuarvojen lisäksi ongelmia voivat aiheuttaa myös ylijännitteiden kestoaika, jännitteen liiallinen hetkellinen romahtaminen sekä jännitteen liiallinen loveentuminen ja ylimääräiset nollakohdat.

EMC-standardien raja-arvojen puitteissa sähkölaitteiden tulisi toimia riittävän hyvin häiriintymättä. Toisaalta standardeista ei löydy tarkempaa tietoa siitä, kuinka paljon suurempia transienttiylijännitteitä (mm. absoluuttinen hetkellinen huippuarvo ja energiasisältö) laitteet niiden toiminnallisten komponenttien ja sähköisten piirien osalta sietävät rikkoontumatta. Tämän asian tarkempi selvittäminen edes jonkin laitetyypin osalta vaatisi ilmeisestikin laajahkoja laboratoriotestejä.

Tulokset tukevat myös sähköverkon vikatilanteiden hallintaa. Mm. keskijännitepuolen johdinkatkokset ovat perinteisillä menetelmillä olleet usein vaikeasti havaittavissa keskijännitepuolen suojareleistyksellä. Pj-puolella vikapaikan takana katkos näkyy kuitenkin selvästi jännitemuutoksina. Simulointitulokset tukevat osaltaan tarvittavien päättelyalgoritmien muodostamista ja muutosten arviointia.

Sähkö- ja televerkkojen yhteensopivuutta ja suojausta tarkasteltiin suppeahkosti. Keskeistä on niissä erityisesti potentiaalin tasaus ja maadoitusten oikea suorittaminen.

LÄHDELUETTELO

1. Rakennusten ylijännite- ja ukkossuojaus. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry STUL. Espoo 2005. 170 s.

2. Viestintävirasto 25 C/2004 M. Määräys viestintäverkon sähköisestä suojauksesta. Helsinki 2004. 9 s.

3. Luotettava elektroniikka –opetusmateriaali

4. Dugan, C., McGranaghan, M., Santoso, S., Beaty, H. Electrical Power Systems Quality. ISBN 0-07-138622-X. McGraw-Hill, New York.

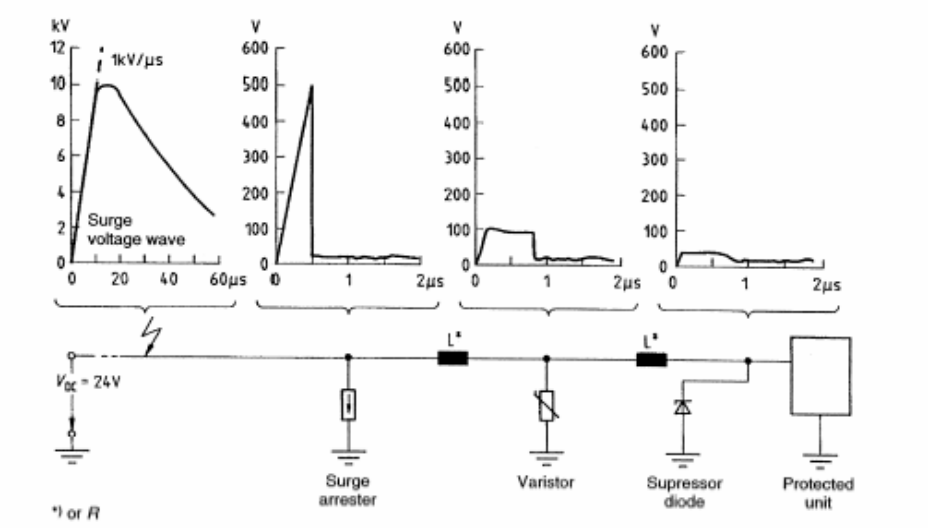
5. www.itic.org/technical/iticurv.pdf

6. Toim. Samuli Taimisto. Häiriösuojaus. Suomen Sähköurakoitsijaliiton Koulutus ja Kustannus Oy. Espoo 1991. 180 s.

LIITE 1 ELEKTRONIIKKALAITTEEN SUOJAUS JA TIETOKONEEN RAKENNE

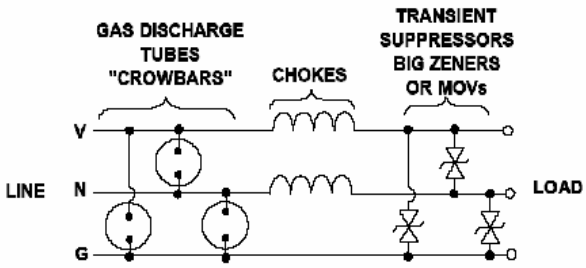
Elektroniikkalaitteiden sisäinen suojaus

Laitteiden sisäinen suojaus on yleensä hoidettu jonkinlaisella ylijännite- sekä ylivirtasuojilla, mutta suojausperiaatteet vaihtelevat nykyään huomattavasti laitteiden välillä. Hyvin suunnitellussa laitteessa suojaus on toteutettu moniosaisena suojauksena (ks. kuva alla).



Kuva 0-1: Laitteen tehokas suojaus erilaisia häiriöjännitteitä vastaan

Kuitenkin yleensä suojausta ei tehdä yhtä kattavasti kuin kuvassa on esitetty, vaan ylijännitettä vastaan laite suojataan yleisesti jollakin puolijohdesuojalla (TVS/Zener/Varistori). Televerkon laitteissa suojaus on usein toteutettu tällä tavalla, jolloin laite on suojattava ulkopuolelta esim. kaasupurkaussuojin (televerkon laitteen sisällä koordinaatiokomponentti sekä puolijohdesuoja).



Kuva 0-2: Esimerkki suojauksen toteuttamisesta

Kuvassa on esitetty periaatteet yhteis- ja eromuotoisilta häiriöiltä suojautumiseksi. Kuvassa kipinävälit estävät varistoreiden vioittumisen, jos jännite kasvaa liian suureksi. Kela toimii välissä koordinaatiokomponenttina [3]. Kela on mahdollista korvata myös vastuksella. Telelaitteen sisällä on koordinaatiokomponentti sekä puolijohdesuoja [1].

Alla olevassa taulukossa on listattu elektroniikkalaitteissa käytettyjä ylijännitesuojia ja niihin liittyviä ominaisuuksia.

Komponentti	Nopeus	jännitealue	typ max teho	typ max virta	Kapasitanssi
Diodi					
signaali	1-10 ns	estos. 500V	1W	0,1-2A	1-10pF
tasasuuntaus	10-60 ns	estos. 1500V	100W	1-200A	10-50pF
Zener	1p-10ns	5-200V	100W	0,1-200A	50p-1nF
TVS	10p-10ns	10-1000V	5kW	50-2kA	100p-10nF
Varistori	0,5-10ns	3-1000V	30kW	<20kA	100p-10nF
Kipinäväli	<1us	100V-	1MW	<100kA	0,1-1pF
Tyristori	<20us	estos. 5 kV	10 kW jatkuva	3000A jatk.	0,1-200pF

Ylivirtasuojaus:
Sarjavastus on paras keino ylivirralta suojautumiseen niissä kohteissa missä mahdollinen. Alla on listattu muita ylivirta/oikosulkusuojauksia, joita käytetään laitteen ylivirtasuojauksessa:

- Sulake (kytkentäaika, resistanssi, palamisvirta, eristyskyky)
- Vikavirtasuojat (sähköverkko)
- Virtarajat
- Lämpöreleet, termostaatit
- NTC, käynnistysvirtapiikin rajoitus
- PTC, ylivirtasuoja, ylilämpösuoja

Eri vaihtoehtojen ominaisuuksia ei tässä projektissa selvitetty tarkemmin.

Laitteen suunnittelun vaikutukset

Laitteen normaali- ja häiriöiden aikaiseen toimintaan voidaan vaikuttaa suuresti laitteen kunnollisella suunnittelulla. Tärkeimpiä tekijöitä ovat mm.:

- Maadoitustasojen eriyttäminen sekä kunnollinen paluuvirtojen suunnittelu
- Analogia/digitaalipuolet erikseen
- Tehonsyöttö erillisenä lohkonaan
- Lämpöä tuottavat komponentit ja jäähdytys kortin reunoille ja ylös (ei lämmitä muita komponentteja
- signaalivetojen pituudet (maksimipituus riippuu taajuudesta)
- signaalien suodatus
- EMC –suojaus
- muut suojaukset (ylijännite/ylivirtasuojaus) ja niiden sijainti piirilevyllä [3]

Tarkemmin laitteiden suojauksesta on käsitelty esim. viitteessä [3].

Komponenttivalinnat

Piirien tulee kestää kohtuullista ylijännitettä ja suojauksen pitää toimia kunnolla, jotta laitevaurioilta vältyttäisiin. Vauriot voivat tulla esiin heti häiriön jälkeen tai ajan kanssa, jolloin todellinen aiheuttaja on yleensä vaikea löytää. Komponentit mitoitetaan tietylle jännitetasolle, joka on yleensä hieman käyttöjännitetasoa suurempi. Yleisesti ottaen mitoituksessa käytetään riittäviä marginaaleja, mutta myös elektroniikkateollisuudessa laitteen suojaukseen ei kiinnitetä yhtä paljon huomiota kuin ennen. Kuitenkin laitteissa, joissa vikaantuminen voi aiheuttaa merkittävää vaaraa, pitäisi turvamarginaalien olla erittäin suuret. Komponenttien ylimitoittaminen pienentää vikaantumistaajuutta suhteellisen lineaarisesti ylikuormituksen osalta. Esimerkkinä riittävästä turvamarginaalista voidaan mainita, että verkkojännitekondensaattoreiden (230Vac) läpilyöntikestävyys testataan yleensä usean kilovoltin jännitteellä. Sama koskee verkkomuuntajia. Myös hakkureissa ja moottoriohjaimissa jännitekestot mitoitetaan tavallisesti moninkertaisiksi laitteen nimellisiin jännitteisiin nähden.

Pääosa elektroniikan vikaantumisilmiöistä liittyy ulkoiseen kuormitukseen, kuten lämpötila, kosteus, mekaaninen rasitus, lika. Tämä tarkoittaa, että kotelointiin tulee panostaa. Komponenttien hajoaminen on kuitenkin normaalikäytössä harvinaista. Toisaalta kaikki laitteen liitynnät ulkomaailmaan ovat sähköisesti alttiit väärille signaaleille ja mekaaniselle rasitukselle. Laitteissa, joiden tarkoitettu käyttöikä on muutamia vuosia, voidaan komponenttien ikääntyminen ja sisäiset ongelmat jättää huomiotta joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta, kuten akut, hehkulamput, säätökomponentit, liittimet, kytkimet, näytöt, muistit, tms.

Kuitenkin 2000-luvun alussa on havaittu paljon huonolaatuisista kondensaattoreihin liittyviä mikrotietokoneiden emolevyvikoja.

Tarkemmin piirien suunnittelusta ja komponenttivalinnoista on kerrottu esim. lähteessä [3].

Case tietokone

Projektissa selviteltiin hieman myös sähköverkon häiriöiden ja eri verkkojen välisten ilmiöiden vaikutuksia tietokoneeseen ja sen oheislaitteisiin. Tietokone valittiin tarkemman tarkastelun kohteeksi käytyjen keskustelujen pohjalta.

Tietokoneen rakenne

Tietokone voidaan jakaa pääkomponenteittain seuraaviin osiin: tehonlähde, emolevy, kovalevy sekä liitännäiskomponentit, joita ovat esim. CD/DVD –asema, äänikortti, modeemi, verkkokortti ja TV-kortti. Tietokoneen toimintajännite muodostetaan tehonlähteessä, jonka avulla verkkovirta muutetaan eri oheislaitteille sopivaksi tasajännitteeksi. Käytettyjä jännitetasoja ovat +/- 3,3 V, +/- 5 V, +/- 12 V. Tasajännitepuolella miinusnapa positiivisilla jännitetasoilla on kaikille yhteinen COM –napa, joka ei ole suoraan yhteydessä suojamaahan. Toisaalta taas pöytätietokoneen kotelo ja liitännäiskomponenttien rungot ovat yleensä maadoitettu (väite ei ole tosi uusien kannettavien yhteydessä, joissa suojamaata ei ole välttämättä ollenkaan) ja osa liitännäiskorteista puolestaan käyttää maatasonaan rungon tietokoneen rungon maatasoa, jolloin COM:n ja suojamaan välillä on yhteys. Jos tietokone pitää kytkeä maadoittamattomaan pistorasiaan, syntyy tietokoneen metalliosiin 115 Vac jännite ohituskondensaattoreiden vaikutuksesta. Kone toimii tässäkin tapauksessa miltei moitteetta (näytön värinät lisääntyvät, yms.). Rippelijännite (kohina) säilyy vakiona riippumatta siitä, onko pistorasia maadoitettu/maadoittamaton.

Jos tietokone kytketään suojamaadoittamattomaan pistorasiaan, voi se johtaa koneen I/O-porttien vaurioihin [6].

Seuraavissa alakappaleissa on kerrottu joidenkin tärkeimpien komponenttien toiminnasta ja niihin liittyvistä huomioitavista asioista.

Kovalevy

Kovalevy rakentuu yhdestä tai useammasta lasi- tai alumiinikiekosta, joiden pinnalle tieto tallennetaan ferromagneettiselle aineelle. Nykyään kovalevyt ovat usein ns. kerroslevyjä, jolloin kovalevy rakentuu useammasta kiekosta. Tällaisessa tapauksessa tarvitaan jokaiselle erilliselle levyllä omat luku- ja kirjoituspäät. Kovalevyjen kerrosten lisääminen ja tallennuskapasiteetin kasvattaminen on lisännyt kovalevyjen vikaantumisriskiä merkittävästi lisääntyneiden mekaanisten osien sekä pienemmän tilan vuoksi.

Kovalevyvioista n. 60 % onkin mekaanisia vikoja, jotka johtuvat mm. alla mainituista syistä:

- lukupään raapima levy, liiallinen lämpeneminen, tms.
- mikrokytkinrajoittimen liikkuminen (luku/kirjoituspää liikkuu levyn ulkopuolelle)
- servomoottorin toimintaviat
- kova isku tai tärähdys voi rikkoa levyn pintarakennetta (lukupään kosketus, tms.)

Muita vikoja, joita kovalevyillä voi esiintyä mekaanisten vikojen lisäksi, ovat mm.:

- muistin epästabiili tila, joka johtuu alijännitteestä (esim. lyhyen katkon seurauksena) ja voi estää muistin toiminnan (magnetointi kovalevyllä osin puutteellinen). Levyn toimintaan auttaa tällaisessa tapauksessa formatointi (ei fyysistä vikaa)
- muistin katoaminen ilman näkyvää syytä (magnetoinnin heikkous) voi johtua magneettisen materiaalin ominaisuuksista. Tällaisessa tapauksessa tiedot saattaa olla pelastettavissa kovalevyltä esim. pakastamalla (vähentää lämpövärähtelyn vaikutusta lukutilanteessa).

Erilaisia tietokoneisiin liittyviä ongelmia voidaan tutkia erilaisilla diagnostiikkaohjelmilla, joiden avulla vika voidaan selvittää melko helposti.

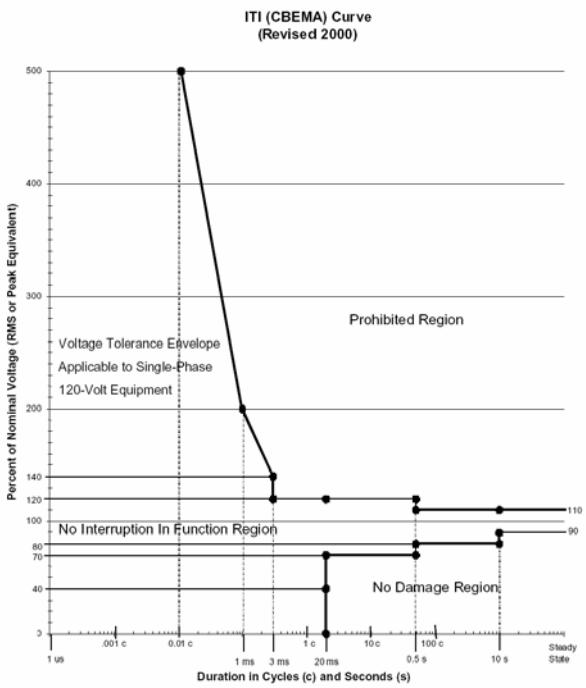
Tehonlähde

Uusimmissa tehonlähteissä käytetään hakkurirakenteita, jotka käyttävät input –jännitteenään suoraan tasasuunnattua verkkojännitettä ja muuttavat sen regulaattoripiirien sisääntuloille sopiviksi. Aiemmin rakenteeseen kuului vielä muuntaja, joka muutti jännitetason alemmaksi. Tehonlähteen toiminta-alue on kannettavissa PVC –laitteissa tänä päivänä melko laaja, sillä hakkurien sisääntulojännite voi vaihdella n. 90-250 Vac välillä ulostulojännitteen siitä kärsimättä (Universaalit adapterit). Toisaalta mitä matalampi jännite, sitä kovempi virrankulutus laitteella on, sillä hakkurit pitävät yllä vakiokuormaa. Pöytäkoneiden tehonlähteet toimivat lähinnä vain lähellä nimellistä jännitetasoa olevilla jännitteen arvoilla, vaikkakin esim. eri nimellisjännitteille ne pystyvät säätymään automaattisesti (aiemmin kytkimellä). Tehonlähteiden rakenne ja ominaisuudet vaihtelevat tietysti valmistajittain ja komponenteittain.

Tehonlähteiden suojaus on toteutettu useimmiten melko monipuolisesti ja useimmasta tehonlähteestä löytyy seuraavat ominaisuudet:

- oikosulkusuojaus
- ylijännitesuojaus
- ylikuormasuojaus

Jännitekatkon tapauksessa tietokoneen hold-up aika on luokkaa 20 ms, jonka jälkeen tehonlähde ei pysty pitämään yllä riittävää jännitettä. Tarkemmin tietokoneen reagointi erilaisiin jännitteen alenemiin selviää alla olevasta ITIC –käyrästä, joka kuvaa tietotekniikkalaitteiden toimivuutta 120 Vac jännitetasolla [5].



Kuva 0-3: Tietokoneiden ITIC –käyrän mukaiset jännitesietoisuusrajat

Modeemi

Modeemityyppejä on olemassa monia erilaisia ja yleisimmin ne voidaan luokitella seuraaviin kategorioihin: 1. kaapelimodeemit 2. korttimodeemit 3. ulkoiset modeemit (USB/sarjakaapeli). Kaikissa modeemeissa on maadoitusten osalta sama perusrakenne riippumatta liityntätavasta. Ulkoisen modeemini sarjaporttiliittimen johdotus on kuvattu alla olevassa taulukossa.

Taulukko 1: Modeemin ja tietokoneen liityntärajapinta

Taulukko A-3. Modeemin sarjaporttiliittimen johdotus.

DB25	DB9	Piiri	Toiminto	Signaalin lähde: (tietokone vai modeemi)
1	--	AA	Rungon maadoitus	Molemmat
2	3	BA	Lähtevä data	Tietokone
3	2	BB	Saapuva data	Modeemi
4	7	CA	Lähetyspyyntö	Tietokone
5	8	CB	Valmis lähettämään	Modeemi
6	6	CC	Tietopaketti valmiina	Modeemi
7	5	AB	Signaalimaadoitus	Molemmat
8	1	CF	Kantoaallon tunnistus	Modeemi
12	--	SCF	Liikennöintinopeus	Modeemi
20	4	CD	Päätelaite valmis	Tietokone
22	9	CE	Soiton tunnistus	Modeemi

Taulukosta on nähtävissä, että sekä modeemin rungon maadoitus tapahtuu kummastakin mahdollisesta lähteestä (modeemilta ja tietokoneelta) samoin kuin modeemin signaalimaadoitus. Tämä tarkoittaa vahvaa maatasoa (signaalitasot pysyvät vakaina), mutta vikatilanteessa tämä voi johtaa virtojen kulkemiseen maatasossa, mikä saattaa pahimmassa tapauksessa johtaa komponenttivaurioon.

Modeemin liityntä televerkkoon on suunniteltu erilliseksi kokonaisuudeksi, jolla ei ole suoraa yhteyttä sähköverkkoon (vain kondensaattorien kautta), mikä estää pienten häiriöiden suoran kytkeytymisen eri piirilevyn osioihin (tele/signaalipuoli). Vaarallisten suurien jännitteiden tapauksessa (esim. indusoituneet salamajännitteet toisen verkon puolelta) voivat kuitenkin johtaa piirien väliseen läpilyöntiin ja tuhota modeemin. Vaara tähän on aiempaa suurempi sillä komponenttikoon pienentyessä myös etäisyydet modeemin osioiden välillä on pienentynyt (suurempi läpilyöntivaara). Läpilyöntivaaraa voidaan pienentää esim. ylijännitesuojauksella. Modeemille asetettu jännitekestoisuusvaatimuksia standardissa IEC 950, jonka pohjalta TUKES on julkaissut myös tiedotteen 10.10.1997.

Rakennetta tulisi kuitenkin tutkia tarkemmin, jotta voisi selvittää tarkemmin modeemin mahdolliset vauriomekanismit.

Tehdyt mittaukset

Tietokoneiden toimintaa jälleenkytkentöjen aikana testattiin kahdella eri kokonaisuudella. Tulosten perusteella arvioitiin, millä tavalla koneet käyttäytyvät jälleenkytkentätilanteessa. Samassa yhteydessä testattiin yhden UPS –laitteen toimintaa. Alla on kuvattu testatut laitteistokokonaisuudet

Kokonaisuus 1:

- Intel Pentium II, 333 MHz, muistia 32 Mb
- koottu 1997
- koneessa ei käyttöjärjestelmää
- kuormana kovalevy ja näyttö
- tehonlähde Fortron 235 W

Kokonaisuus 2:

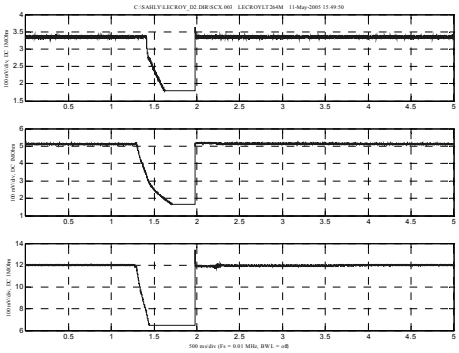
- Intel Pentium II, 333 MHz, muistia 64 Mb
- koottu 1997
- koneessa käyttöjärjestelmänä Windows 98
- kuormana kovalevy, näyttö, äänikortti, yms.
- tehonlähde Fortron 235 W
- osassa kokeita myös off-line UPS -laitteisto

Tietokoneet altistettiin kokeissa eri mittaisille jännitekatkoille ja samalla mitattiin, millä tavalla tietokone reagoi eri tapauksissa. Kumpikin kokonaisuus altistettiin seuraavanlaisille katkoille:

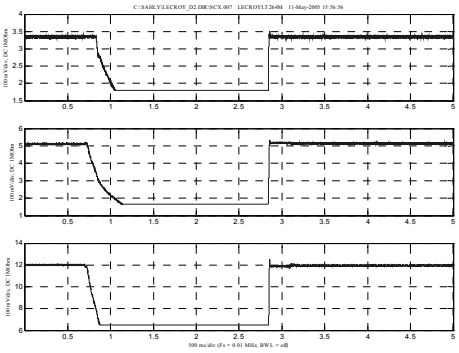
1. 200 ms; 2. 500 ms; 3. 1 s; 4. 1,5 s; 5. 2,0 s; 6. 2,5 s sekä 7. 3 s.

Kokonaisuus 2 testattiin sekä UPS-laitteen kanssa että ilman UPS-laitetta.

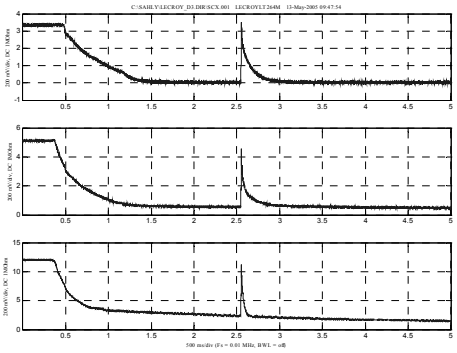
Kokonaisuudella 1 saaduista tuloksista voidaan päätellä, että tietokone ei sammu ollenkaan hyvin lyhyiden katkojen aikana. Toisaalta tuloksista on nähtävissä, että tietokone käynnistyy automaattisesti uudelleen jännitekatkon jälkeen, jos sen kestoaika on alle 2 sekuntia (ks. kuva 0-4 ja kuva 0-5). Jos katkon aikaa kasvatettiin yli 2 sekunnin, tietokone ei lähtenyt enää käyntiin ilman uudelleen käynnistämistä. Kuvaajissa on esitelty tietokoneen positiiviset käyttöjännitetasot 3,3 V, 5,0 V sekä 12,0 V.



Kuva 0-6: 700 ms jälleenkytkentä

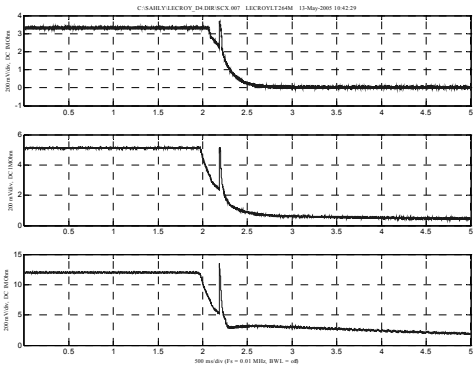


Kuva 0-7: 2 sekunnin jälleenkytkentä

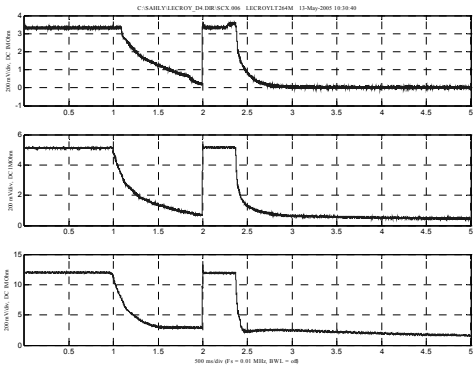


Kuva 0-8: Katkon pituus 2,5 s

Kokonaisuudella 2 saatuja kuvaajia jännitteiden käyrämuodoista on nähtävissä alla olevissa kuvissa. Niistä on nähtävissä, että käyttöjärjestelmä estää tietokoneen käynnistymisen jo hyvin lyhyissä katkoissa (ks. alla olevat kuvat) . Kuvaajissa on esitelty tietokoneen positiiviset käyttöjännitetasot 3,3 V, 5,0 V sekä 12,0 V.

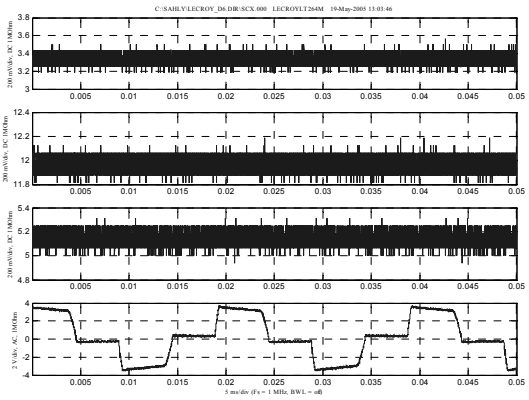


Kuva 0-9: Katkon pituus 500 ms

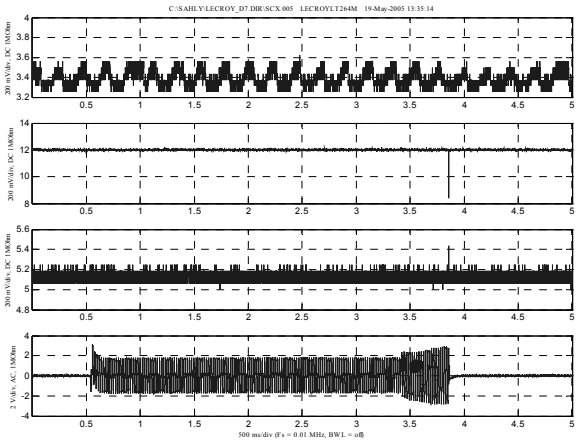


Kuva 0-10: katkon pituus 1 s

Testattaessa kokonaisuutta 2 UPS-laitteen kanssa ei tietokone havainnut jälleenkytkentöjä millään tavalla. Toisaalta kokeissa huomattiin, että UPS-laitteen ulostulojännite ei ole lähellekään sinimuotoista (vain 3 jännitetasoa), mutta silti riittävän hyvää tietokoneen toiminnan varmistamiseksi.



Kuva 0-11: UPS-laitteen syöttämä jännite sekä positiiviset koneen käyttöjännitteet



Kuva 0-12: UPS:n toiminta 3 sekunnin jännitekatkossa

Yleisesti tuloksista voidaan sanoa, että jälleenkytkennän ei pitäisi aiheuttaa vaurioita tietokoneelle, vaikkakin joissakin tapauksissa nopeat jännitemuutokset voivat näkyä jännitetason hetkellisinä nousuina tai laskuina koneen käyttöjännitteissä (ks. kuva 0-13). Ilmiö on havaittavissa sekä UPS-laitteen kanssa että ilman UPS-laitteistoa. käyttöjännitteet kohosivat kokeissa maksimissaan 1,5-kertaiseksi verrattuna nimelliseen arvoonsa.

Tietokonetta testattiin myös kondensaattorikytkentöjen yhteydessä KSS:n verkossa, asiakkaan liityntäpisteessä. Tietokone ei reagoinut yhteenkään kytkentätransienttiin, joka aiheutui kondensaattorin päälle/poiskytkennästä. Transienttien taso asiakkaan liityntäpisteessä on kuvattu raportin luvussa 4.

Tampereen teknillinen yliopisto
Sähkövoimatekniikan laitos
PL 692
33101 Tampere

Tampere University of Technology
Institute of Power Engineering
P.O. Box 692
FIN-33101 Tampere, Finland