



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Sähkötekniikan laitos

A. Nikander, A. Mäkinen

Jännitetyönä tehtäviin 20 kV sähköjakeluverkon vajaanapaisiin kytkentöihin liittyvät sähköiset ilmiöt

Tampere 2014, Finland

Jännitetyönä tehtäviin 20 kV sähkönjakeluverkon vajaanapaisiin kytkentöihin liittyvät sähköiset ilmiöt

Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2014

Raportti / Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos

ALKUSANAT

Tutkimus on tehty Sähkötutkimuspoolin ja Sähköturvallisuuden edistämiskeskuksen STEK:n rahoituksella. Elenia Oy ja Sallila Sähkönsiirto Oy osallistuivat projektin rahoitukseen järjestämällä kenttäkokeet vajaanapaisiin kytkentöihin liittyen ja mahdollistivat siten kenttämittausten suorittamisen. Tutkimus on tehty hankkeessa ”Jännitetyönä tapahtuvat 20 kV jakeluverkon vajaanapaiset kytkennät”. Sen tavoitteena oli selvittää 20 kV verkon vajaanapaisiin kytkentöihin liittyvät suojausten ja turvallisuuden kannalta keskeiset ilmiöt ja luoda pohjaa JT kytkentöjen ohjeistukselle.

TTY:n osalta tutkimuksen toteutukseen osallistuivat:

- Prof. Pertti Järventausta
- TkT Ari Nikander
- TkL Antti Mäkinen
- TkT Pertti Pakonen

Tutkimusosapuolena toimineen TTY:n lisäksi projektin ohjausryhmään kuuluivat

Jussi Pekkarinen (HeadPower)
Antti Pitkänen (HeadPower)
Timo Mutila (HeadPower)
Viivi Naakka (Elenia Oy)
Nikolas Areva (Caruna Oy)
Esko Nummi (Sallila Sähkönsiirto Oy)
Timo Kiiski (Savon Voima Oy)

Tampereella 17.12.2014

TIIVISTELMÄ

Yhteiskunta on tullut entistä riippuvaisemmaksi katkottomasta sähkönjakelusta. Sähkönjakelun keskeytyksistä on haittaa sekä pienjänniteasiakkaille että verkkoon liitetyille sähköntuottajille. Keskeytyksillä on merkitystä myös verkkoyhtiöille sähkön siirtoa koskevan valvontamallin kautta. Sähkönjakelun ja tuotannon käyttövarmuuden ylläpito vaihtelevissa sääolosuhteissa edellyttää käyttövarmuutta parantavia investointeja. Tämä on johtanut mm. maakaapeloinnin lisääntymiseen ja tämä trendi jatkuu myös tulevaisuudessa. Lisääntyvä maakaapelointi kasvattaa verkon tuottamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa ja lisää siten tarvetta maasulkuvirran kompensoinnille. Verkkojen maakaapeloinnin myötä myös jakelumuuntamot muuttuvat avojohtoverkolle tyypillisistä pylväsmuuntamoista ns. puistomuuntamoiksi.

Keskijänniteverkon runkojohtojen ja haarojen lisääntyvä maakaapelointi sekä sähkökatkojen välttäminen ovat luoneet tarpeen kytkeä uusia maakaapeliosuuksia ja puistomuuntamoita verkkoon ilman sähkönjakelukeskeytyksiä. Verkkokomponentteja on mahdollista erottaa myös huoltoa varten jännitetyönä ilman käyttökeskeytyksiä. Mikäli uutta maakaapeliosuutta ei ole varustettu erottimella, kaapeli joudutaan kytkemään käyttönoton yhteydessä jännitetyönä vajaanapaisesti vaihe kerrallaan, mikäli käyttökeskeytyksiltä halutaan välttyä. Tämä synnyttää verkkoon hetkellisen epäsymmetrian, joka näkyy verkon nollajännitteen nousuna ja lähtöjen summavirtojen kasvuna. Tämä voi johtaa lähdön maasulkusuojauksen virhetoimintoon, mikäli suojauksen asetteluarvot ylittyvät. Kaapelin poikkipinnasta ja pituudesta riippuvan kaapelin kapasitiivisen varausvirran suuruus rajoittaa myös kytkettävän kaapelin pituutta.

Mikäli maakaapeloiduilla alueilla tyypillisesti käytettäviä 50 kVA ja 100 kVA puistomuuntamoita ei ole varustettu erottimella ja keskijännitelähdön käyttökeskeytys halutaan välttää, kaapeliosuuden päässä oleva muuntaja joudutaan kytkemään samalla kertaa sitä syöttävän maakaapelin kanssa vajaanapaisesti ilman sähkönkäyttäjien kuormia. Tällöin maakaapelin kapasitiivisen reaktanssin ja muuntajan epälineaarisen tyhjäkäynti-impedanssin välille saattaa syntyä sarjaresonanssi, jonka seurauksena maasulkusuojauksen kannalta keskeiset suureet, kuten nollajännite ja lähdön summavirta voivat nousta moninkertaisiksi pelkän kaapelin kytkentään verrattuna. Tämän ns. ferroresonanssin seurauksena myös vaihejännitteet erotuskohdan takana voivat nousta suuriksi rasittaen mm. kaapelin ja muuntajan ylijännitesuojina käytettäviä venttiilisuojia.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin keskijänniteverkon vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä esiintyviä, suojauksen kannalta keskeisiä sähköisiä ilmiöitä, jotta jännitetöiden yhteydessä voitaisiin toimia turvallisesti ja turhilta käyttökeskeytyksiltä voitaisiin myös välttyä. Tutkimusmenetelminä käytettiin PSCAD simulointia sekä kenttäkokeita. Kytkettäessä pelkkää maakaapelia, maasulkusuojauksen kannalta keskeisten suureiden käyttäytymistä voidaan arvioida raportissa esitettyjen menetelmien avulla ottaen huomioon epävarmuustekijät ja verkon epäideaalisuudet. Kaapelin ja tyhjäkäyvän muuntajan kytkeminen osoittautui sekä kenttäkokeissa että suoritetuissa simuloinneissa ongelmalliseksi, koska resonanssi näytti olevan mahdollinen laajalla kaapelin varausvirta-alueella tarkastelluilla muuntajilla. Resonanssin vaimentamiseksi selvitettiin myös jakelumuuntajan pienjännitepuolelle kytkettävän resistiivisen kuorman vaikutusta. Kenttäkokeissa havaittiin, että sopivan kokoisella muuntajan resistiivisellä kuormalla oli myönteinen vaikutus resonanssin sammumisen kannalta. Resisttiivisen kuormituksen yleispätevä, mitoittaminen osoittautui haasteelliseksi resonanssi-ilmiöön vaikuttavien epävarmuustekijöiden ja satunnaisuuden takia.

SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat	i
Tiivistelmä	ii
Sisällysluettelo	iii
1. Johdanto	1
2. Yksivaiheisten kytkentöjen kenttämittaukset	3
2.1 Mittaukset kohteessa A	3
2.1.1 Kohteen A ensimmäiset mittaukset	3
2.1.2 Kohteen A toiset mittaukset	5
2.2 Kohteen B mittaukset	12
3. Yksivaiheisten kytkentöjen mallinnuksen perusteoriaa	15
3.1 Sähkötekniset ilmiöt oletettaessa koko verkon käyttäytyvän lineaarisesti sekä nolajännitteen ja summavirtojen laskenta	15
3.2 Verkon epälineaarisuuksien vaikutus	18
4. Vajaanapaisten kytkentöjen mallintaminen ja simulointi	20
4.1 Tyypitapaukset	20
4.1.1 Maakaapelin kytkennät	21
4.1.2 Maakaapelin ja kuormittamattoman jakelumuuntajan kytkennät	21
4.1.3 Maakaapelin ja kuormitetun jakelumuuntajan kytkennät	22
4.2 Keskiänniteverkon mallintaminen vajaanapaisten kytkentöjen tarkastelua varten	23
4.2.1 Verkkomalli tyypitapausten simulointia varten	23
4.2.2 Verkkomalli simulointien verifiointia varten	25
4.3 Menetelmät ja tulosten esittäminen maakaapelin kytkennöissä	27
4.4 Vajaanapaisten kytkentöjen suunnittelu suojauksen kannalta	28
4.5 PSCAD mallin evaluointi	29
Tapaus: 1,16 km AXAL-TT 3x50/25 ja 50 kVA tyhjäkäyvä muuntaja, verkon kompensointiaste noin 30 %	29
4.6 Simulointi ja laskentatuloksia – maakaapelin kytkeminen	36
4.6.1 Maasta erotettu verkko	36
4.6.2 Sammutettu verkko	37
4.6.3 Käyrästöjen tulkitseminen ja normaalitilan nolajännitteen vaikutus	38
4.7 Tuloksia – maakaapelin ja jakelumuuntajan kytkeminen	39
4.7.1 Maakaapelin ja kuormittamattoman jakelumuuntajan kytkeminen	39
4.7.2 Maakaapelin ja jakelumuuntajan resonanssiin liittyvät riskit	42
4.7.3 Muuntajan resistiivisen kuorman vaikutus	42

4.8 Samalta sähköasemalta syötetyn rengaslähdön vajaanapainen kytkeminen tai avaaminen	43
5. Yhteenveto.....	45
Lähdeluettelo	46

1. Johdanto

Yhteiskunta on entistä enemmän riippuvainen häiriöttömästä sähkönjakelusta. Uusimpien keskeytyshaittoja koskevien selvitysten mukaan jo lyhyistäkin sähkökatkoista seuraa taloudellinen haitta eli kuluttajaryhmille [1]. Keskeytykset heikentävät sähkön laatua, jolla on nykyään merkitystä myös sähköyhtiön yrityskuvan kannalta. Sekä pidemmät että lyhyet keskeytykset ovat mukana myös viranomaisen verkkoyhtiöiden tehokkuuden arviointiin käytämässä valvontamallissa, joten asiakkaiden lisäksi keskeytyksillä on taloudellinen merkitys myös verkkoyhtiöille.

Pyrkimykset vähentää keskeytysten lukumäärää ovat johtaneet siihen, että jakeluverkon rakentamis- ja kunnossapitotyöt pyritään tekemään mahdollisimman vähillä käyttökeskeytyksillä. Suunniteltujen keskeytysten määrää voidaan pienentää suorittamalla verkon kytkentöjä jännitetyönä. Avojohtoon voidaan jännitetyönä sauvamenetelmällä asentaa yksivaiheiset erotuskohdat eli JT katkopaikat, joiden avulla saadaan verkon osa tai komponentti erotettua verkosta tai kytkettyä verkkoon jännitetyönä aiheuttamatta muulle verkolle huoltokeskeytystä. Jännitetyönä tehtävät kytkennät tehdään vajaanapaisesti eli yksi vaihe kerrallaan.

Vajaanapaisista kytkennöistä jakeluverkkoon aiheutuvia sähköisiä ilmiöitä ei tunneta kovin hyvin. Siksi kytkentäilmiöihin ei ole aina osattu varautua riittävän hyvin. Olemassa olevat ohjeistukset ja rajaukset eri yhtiöissä perustuvat yleensä käytännön havaintoihin ja liitinvalmistajan ohjeisiin. Vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä on havaittu mm. JT lähdön laukeamisia maasulkusuojauksen havahtumisen seurauksena, sähköaseman nollajännitteeseen perustuvan varasuojauksen toimintoja sekä venttiilisuojavaurioita ja niistä seuranneita maasulkuja JT erotuskohdan takana. Ongelmat ovat useimmiten liittyneet maakaapelin ja muuntajan vajaanapaisiin kytkentöihin. Tällöin on epäilty, että ilmiöt johtuvat kytkettävän kaapelin ja muuntajan muodostamasta sarjaresonanssista, joka vahvistaa merkittävästi lähdön maasulkusuojauksen kannalta keskeisiä suureita sekä aiheuttaa merkittäviä ylijännitteitä JT erotuskohdan takana olevaan verkkoon.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää keskijänniteverkon vajaanapaisten kytkentöjen jakeluverkkoon aiheuttamia sähköisiä ilmiöitä. Tässä tutkimuksessa päähuomio kohdistettiin pelkän maakaapelin kytkemiseen sekä maakaapelin ja muuntajan samanaikaiseen kytkemiseen. Maasulkusuojauksen toiminnan kannalta keskeisimpiä suureita ovat verkon nollajännite ja JT lähdön summavirta vajaanapaisten kytkentätilanteen aikana. Erotuskohdan takana sijaitseviin ylijännitesuojaiin mahdollisessa resonanssitilanteessa kohdistuvien rasiusten kannalta

keskeisimmät suureet ovat vaihejännitteet erotuskohdan takana vajaanapaisessa kytkentätilanteessa. Maasta erotetun ja sammutetun keskijänniteverkon maasulkusuojauksen toimintaperiaatteet on esitetty mm. viitteissä [2] ja [3]. Vajaanapaisten kytkennän tai erottamisen vaikutusten arvioinnissa rajoituttiin pääasiassa käyttötaajuisiin sähköisiin ilmiöihin, koska ne ovat suojauksen kannalta keskeisimpiä.

Vajaanapaisten kytkentöjen aiheuttamia sähköisiä ilmiöitä tutkittiin simuloimalla PSCAD ohjelmistolla tehtyjen dynaamisten verkkomallien avulla sekä suorittamalla kenttämittauksia jakeluverkossa vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä. Tavoitteena oli PSCAD verkkomallin verifioiminen vastaavissa kenttäkokeissa suoritettujen mittausten avulla. Tämän jälkeen ilmiöitä selvitettiin simuloimalla laajemmin erilaisissa tyyppitapaustilanteissa. Kytkettäessä pelkkää maakaapelia vajaanapaisesti verkkoon, verkon nolajännitettä ja JT lähdön summavirtaa voidaan arvioida Matlab ja Excel ympäristöihin tehtyjen laskentamallien avulla.

Tutkimuksen toteuttamisesta vastasi Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan laitos. Kenttäkokeita tehtiin Elenia Oy:n sekä Sallila Sähkönsiirto Oy:n verkoissa.

2. Yksivaiheisten kytkentöjen kenttämittaukset

Tässä luvussa esitetään kahdessa eri kohteessa tehtyjen yksivaiheisten kytkentöjen mittaus- tuloksia. Mittauksia tehtiin maasta erotetussa, osittain sammutetussa ja sammutetussa keski- jänniteverkossa. Kummankin verkon käyttömaadoitustapaa voitiin muuttaa. Tavoitteena oli, että jatkossa simulointien avulla tuloksia voitaisiin yleistää myös muunkinlaisiin kuin nyt mi- tattuihin verkkotilanteisiin. Mittaustulokset mahdollistavat simulointimallien verifiointin to- dellisia mittaustuloksia vastaan. Simulointiin liittyviä tuloksia käsitellään myöhemmin luvussa 4.

Yksivaiheisiin kytkentöihin liittyviä mielenkiintoisempia ilmiöitä olivat:

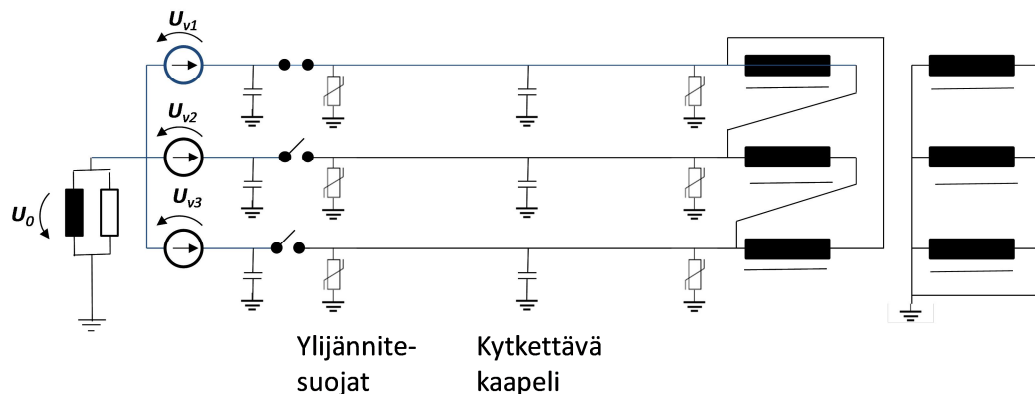
- Syöttävään verkkoon syntyvä tähtipisteen ja maan välinen nolajännite U_0
- Verkon summavirrat I_0
- Ylijännitteet erotuskohdan takana.

2.1 Mittaukset kohteessa A

2.1.1 Kohteen A ensimmäiset mittaukset

Ensimmäinen mittauskohde oli keskijänniteverkossa, jonka kapasitiivinen maasulkuvirta oli 140 A. Osittain sammutettuna verkon kapasitiivinen jäännösvirta oli noin 100 A. Verkkoa voitiin käyttää myös sammutettuna. Tällöin kompensointiaiste oli n. 95 % sekä sammutusku- ristimen tähtipisteen ja maan välisen lisävastuksen resistanssi oli 1400 ohmia.

Kuvassa 2.1 on esitetty erotuskohdan jälkeisen verkon rakenne kohteen A ensimmäisissä mi- tauksissa. Kytkettävän kaapelin pituus oli noin 1,2 km ja yhden vaiheen kapasitiivinen va- rausvirta oli noin 0,7 A. Jakelumuuntajan koko oli 50 kVA.



Kuva 2.1 Erotuskohdan jälkeisen verkon rakenne kohteen A ensimmäisissä mittauksissa

Mittauksia tehtiin neljällä Dranetz PX-5 sähkönlaatuanalysoitsijalla, joka täyttää standardin IEC 61000-4-30 luokan A vaatimukset. Lisäksi saatiin tapahtumia tallennettua suojauslaitteiden häiriötallentimilla. Mittauskohteiksi oli valittu:

- Sähköaseman vaihejännitteet ja tutkittavan johtolähdön vaihevirrät sekä verkon nollassa jännite ja johtolähdön summavirta
- Muuntamolla pienjännitepuolen vaihejännitteet
- Erotuskohdan vaihevirrät

Eri suureita pyrittiin tallentamaan ensisijaisesti käyrämuotoina sopivilta ajankohdilta. Mittari- en käynnistys tehtiin manuaalisesti ennen kunkin kytkennän tekoa. Käyrämuodoista pystytään jälkepäin laskemaan ja analysoimaan erilaisia suureita monipuolisesti ohjelmiston avulla. Puutteeksi jäi, että erotuskohdan virtamittaukset eivät onnistuneet. Syynä oli ilmeisesti se, että virtapihtikalusto ei ollut sopiva häiriöisten kytkentävirrojen mittaukseen ja analysointia toiminta takkuili. Lisäksi muista syistä kytkentöjen teko keskeytettiin suunniteltua aiemmin.

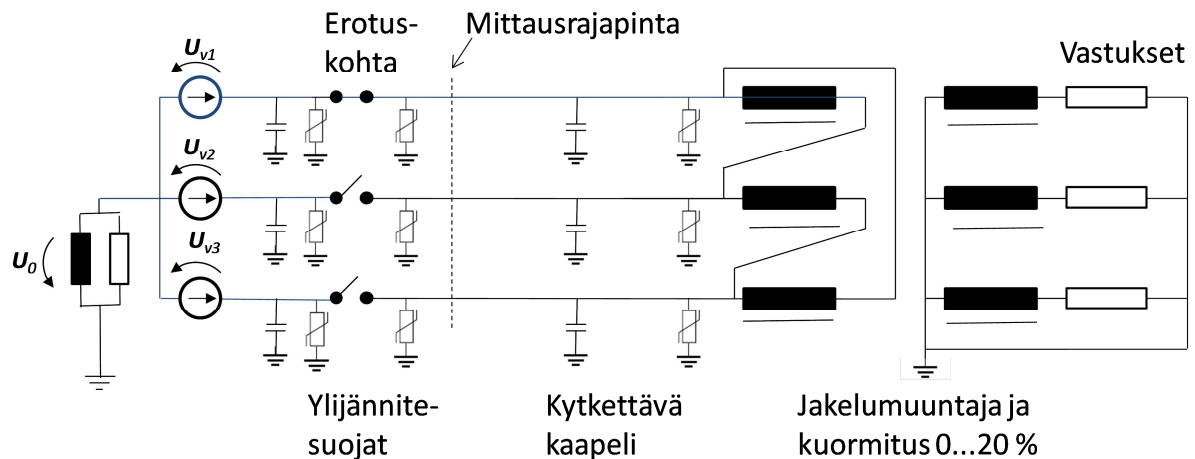
Yhteenvetona nollassajännitteen ja summavirran suuruuksista eri tilanteissa on esitetty taulukossa 2.1. Pelkän kaapelin kytkennöissä nollassajännite ja summavirta käyttäytyivät odotetusti ja niiden suuruudet jäivät alhaisille tasoille. Kaapelin ja muuntajan kytkennässä muutokset olivat selvästi suurempia.

Taulukko 2.1 Yhteenvetona kohteen A ensimmäisistä mittauksista sähköasemalla

Kytken nän kohde	Verkon käyttö- tapa		Nollassajännite U ₀ 50 Hz / V	Summavirta I ₀ 50 Hz / A
Kaapeli ja muuntaja	Osittain kompensoitu	L1, L2 ja L3 suljet- tuina	40	0,1
Kaapeli ja muuntaja	Osittain kompensoitu	L1, L2 ja L3 suljet- tuina -> L2 avaus	330	2,5
Kaapeli ja muuntaja	Osittain kompensoitu	L1, L2 ja L3 suljet- tuina ->L1 avaus	300	2,4
Kaapeli ja muuntaja	Osittain kompensoitu	L1 auki sekä L2 ja L3 kiinni -> L2 avaus	150	0,6
Pelkkä kaapeli	Osittain kompensoitu	L1, L2 ja L3 auki - > L3 kiinnikytken t	120	0,6
Pelkkä kaapeli	Osittain kompensoitu	L1 auki ja L3 kiin- ni -> L2 kiinnikyt- ken t	120	0,65
Pelkkä kaapeli	Sammutettu	L1 ja L3 kiinni -> L2 aukikytken t	730	0,9

2.1.2 Kohteen A toiset mittaukset

Kuvassa 2.2 on esitetty erotuskohdan jälkeisen verkon rakenne kohteen A toisissa mittauksissa. Kytettävän kaapelin pituus oli noin 1,2 km ja yhden vaiheen kapasitiivinen varausvirta oli noin 0,7 A. Jakelumuuntajan koko oli 50 kVA. Verrattuna aiempiin ensimmäisiin mittauksiin oli nyt lisätty erotuskohdan takaiset jännite- ja virtamittaukset. Näitä varten verkkoon oli lisätty 'mittauskärryn' liitäntäkaapelit ja yhdet tilapäisellä pylväällä tukieristiminä toimivat ylijännitesuojat. Jakelumuuntajan pienjännitepuolelle oli myös kytkettävissä resistiivisiä kuormituksia 0...20 % muuntajan nimelliskoosta.



Kuva 2.2 Erotuskohdan jälkeisen verkon rakenne kohteen A toisissa mittauksissa

Mittauksia tehtiin neljällä Dranetz PX-5 sähkönlaatuanalysointilaitteella, joka täyttää standardin IEC 61000-4-30 luokan A vaatimukset. Lisäksi saatiin tapahtumia tallennettua suoja- ja häiriötallentimilla sekä erotuskohdan takaa oskilloskoopilla. Mittauskohteiksi oli valittu:

- Sähköaseman vaihejännitteet ja tutkittavan johtolähdön vaihevirrät sekä verkon nollajännite ja johtolähdön summavirta
- Muuntamolla pienjännitepuolen vaihejännitteet
- Erotuskohdan takaiset vaihejännitteet ja erotuskohdan vaihevirrät

Eri suureita pyrittiin tallentamaan ensisijaisesti käyrämuotoina sopivilta ajankohdilta. Mittarinen käynnistys tehtiin manuaalisesti ennen kunkin kytkennän tekoa. Käyrämuodoista pystytään jälkepäin laskemaan ja analysoimaan erilaisia suureita monipuolisesti ohjelmiston avulla.

Taulukoissa 2.2 ja 2.3 on esitetty yhteenvetona tehdyistä kytkennöistä. Suurimmat nollajännitteen nousut ja summavirrät esiintyivät, kun kaapelia ja muuntajaa syötettiin yhdellä vaiheella. Maasta erotetussa osittain kompensoidussa verkossa ilman kuormitusta nollajännite nousi tällöin resonanssin seurauksena noin välille 700...800 V ja 9...14,5 % kuormituksilla välille 600...700 V. Osassa kytkentöjä ei haitallista resonanssia esiintynyt. Ilman kuormitusta nollajännite nousi enimmillään resonanssin seurauksena suuruusluokaltaan noin 9-kertaiseksi verrattuna tilaan, jossa resonanssia ei esiintynyt.

Taulukko 2.2 Yhteenvedoa verkkokokeista osittain kompensoidulla erilaisilla kuormituksilla. U₀ ja I₀ arvoja vain laukaisuihin johtaneista kytkennöistä.

- 1A 1. vaiheen avaus
- 2A 2. vaiheen avaus 1. ollessa auki
- AAA Kaikkien vaiheiden peräkkäiset avaukset
- KKK Kaikkien vaiheiden peräkkäiset sulkemiset
- 1K 1. vaiheen sulkeminen
- 2K 2. vaiheen sulkeminen 1. ollessa kiinni
- R % Muuntajan suhteellinen kuormitus

Tallenne	Kytkenät	R %	U ₀ 50 Hz V	I ₀ 50 Hz A
1	1A	0	300 ...	2...3
	2A	0	750	5,3
	2A	0	660...750	5
2	1K	0	750	5,4
3	1A	0	320...	2,2
	2A	0	770	5,5
4	1K, 2K	0	pieni	
5	1A	9	pieni	
	2A	9	pieni	
6	KKK		pieni	
7	1A	9	340	2,3
8	1A	9		
	2A	9	650	5
9	1A	9	Resonoi 4min., mutta ei laukaisua	
10	1A	11		
	2A	11	700	5
11	AAA	11	pieni, ei res.	
	1K	11	600	5
12	1A	11		
	2A	11	600	5
13	1A	14		
	2A	14	650	4,8
14	1A	14	Resonoi 1 min., mutta ei laukaisua	
15	1A	14	pieni	
	2A	14	pieni	
	K	14	pieni	
16	AAA	20	pieni	
	KKK	20	pieni	
17	AAA	20	pieni	
	KKK	20	pieni	
18	AAA	20	pieni	
	KKK	20	pieni	

Taulukko 2.3 Yhteenvetoa verkkokokeista sammutetulla verkolla erilaisilla kuormituksilla R, U₀ ja I₀ arvoja vain laukaisuihin johtaneista kytkennöistä.

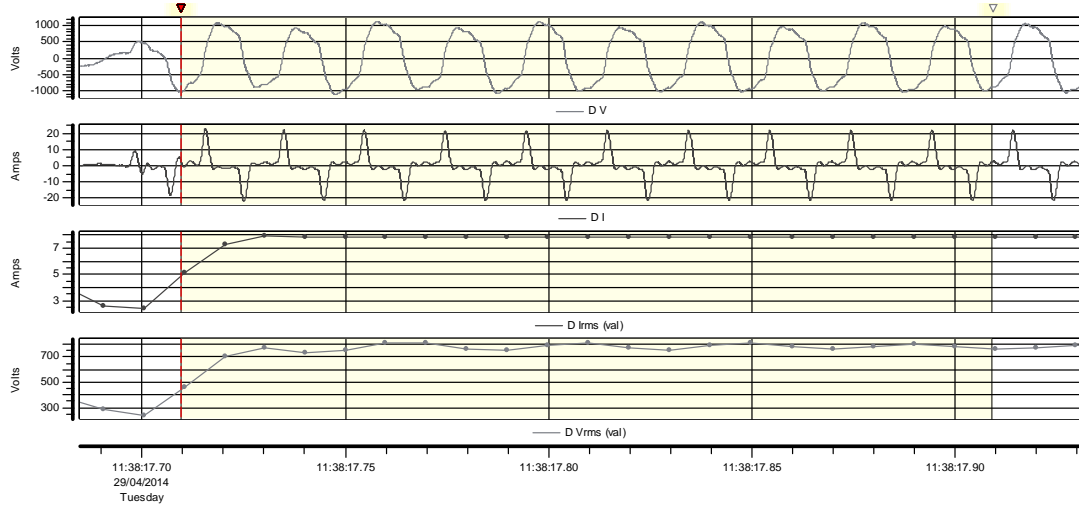
- 1A 1. vaiheen avaus
- 2A 2. vaiheen avaus 1. ollessa auki
- AAA Kaikkien vaiheiden peräkkäiset avaukset
- KKK Kaikkien vaiheiden peräkkäiset sulkemiset
- 1K 1. vaiheen sulkeminen
- 2K 2. vaiheen sulkeminen 1. ollessa kiinni
- R % Muuntajan suhteellinen kuormitus

Tallenne	Kytkenät	R %	U ₀ 50 Hz V	I ₀ 50 Hz A
19	1A	0	3000...5000	3...5
	2A	0	2500...	3
		0	1900	2,3
20	1A	9	1200	1,5
21	1A	14	1140	1,2
	2A	14		
	1K	14		
	2K	14		
22	AAA	14	1200	1,4
	KKK	14		
23	1A	14	1160	1,4
	2A	14		
24	1A	20	1200	1,6
	2A	20		

Kuvassa 2.3 on esitetty esimerkkitilanteessa nolajännite ja summavirta sähköasemalla osittain kompensoidussa verkossa kaapelin ja muuntajan ollessa syötettynä yhdellä vaiheella ja resonanssi esiintyy.

Kuvassa 2.4 on vaiheiden ja maan väliset jännitteet erotuspaikan takana osittain kompensoidussa verkossa sekä syöttävän vaiheen virta osittain kompensoidussa verkossa kaapelin ja muuntajan ollessa syötettynä yhdellä vaiheella ja resonanssi esiintyy. Kaksi vaiheen ja maan välistä jännitettä on noussut noin 3-kertaiseksi normaaliin nähden ja yksi on normaalitasolla. Syöttävän vaiheen virran 50 Hz komponentti on 6,38 A ja noin 9-kertainen verrattuna tilanteeseen, jossa resonanssia ei ole.

Event Details/Waveforms



Event #262 at 29/04/2014 11:38:17.709

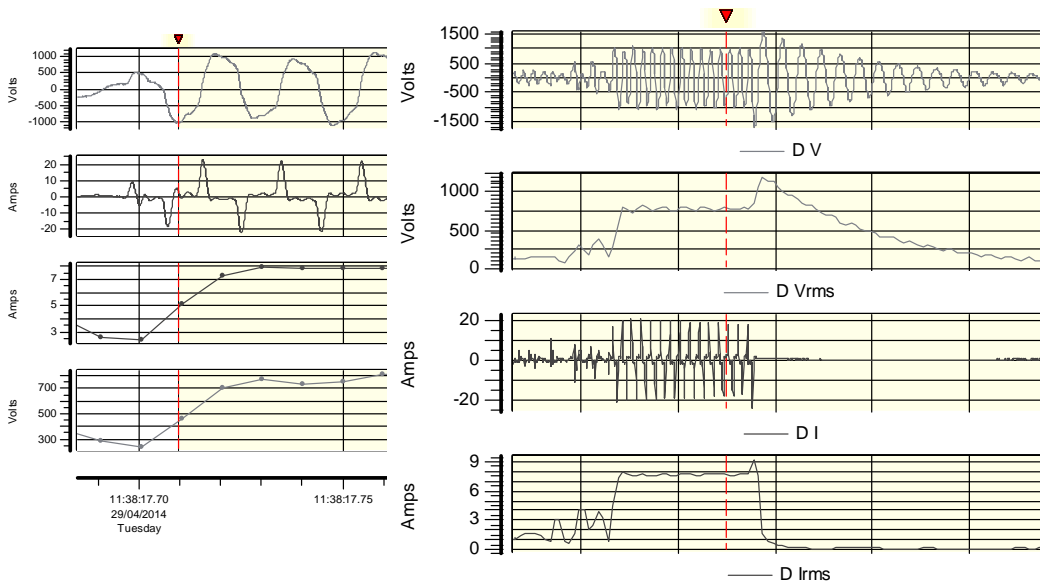
Waveforms

Created with DranView 6.9.0

	AV	BV	CV	DV	A-BV	B-CV	C-AV	AI	BI	CI	DI
RMS	11644.96	11414.50	12580.71	779.30	20592.97	20498.84	20568.30	32.23	25.65	25.41	7.88
FND	11642.75	11411.34	12578.91	766.18	20589.85	20496.68	20565.71	31.67	25.60	25.37	5.38
DC	-21.19	-40.53	65.66	0.23	19.34	-106.18	86.86	-0.29	-0.07	0.49	-0.01
THD	201.26	245.42	171.13	134.10	315.65	224.94	260.08	5.96	1.64	1.36	5.76

Dran-View 6.9.00 HASP : 1443594523 (560B81(B))

Event Details/Waveforms



	AV	BV	CV
RMS	11644.96	11414.50	12580.71
FND	11642.75	11411.34	12578.91
DC	-21.19	-40.53	65.66
THD	201.26	245.42	171.13

09:38:19.6 09:38:19.8 09:38:20.0 09:38:20.2 09:38:20.4
29/04/2014
Tuesday

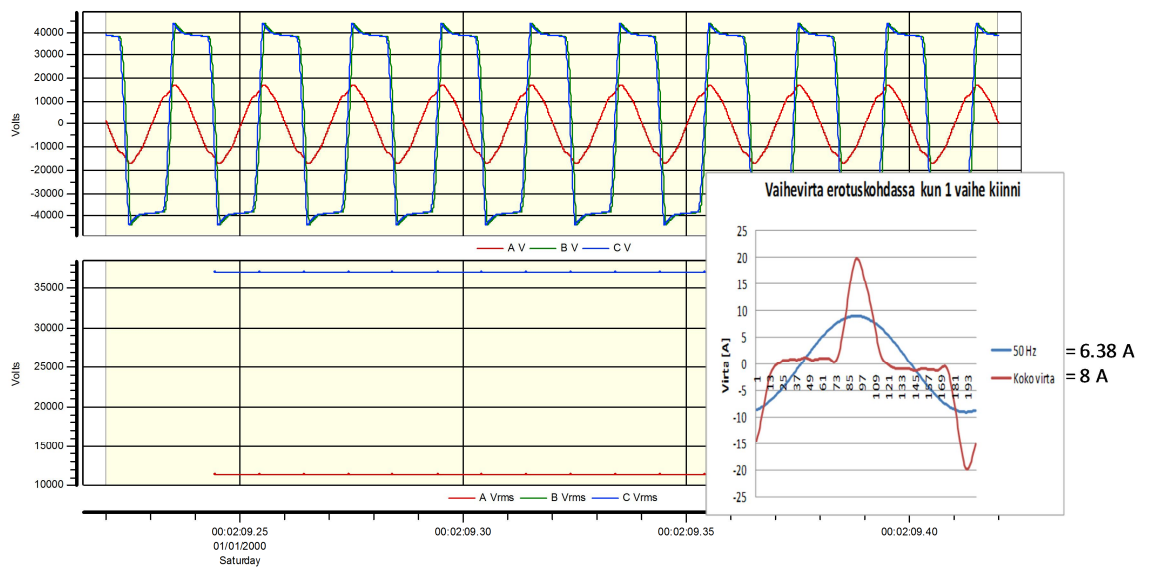
Event #1 at 29/04/2014 09:38:18.397

Waveform

Kuva 2.3 Nollajännite ja summavirta sähköasemalla osittain kompensoidussa verkossa kaapelin ja muuntajan ollessa syötettynä yhdellä vaiheella ja resonanssi esiintyy. FND viittaa perustaajuiseen 50 Hz komponenttiin.

Dran-View 6.9.00 HASP : 1443594523 (560B811Bh)

Event Details/Waveforms



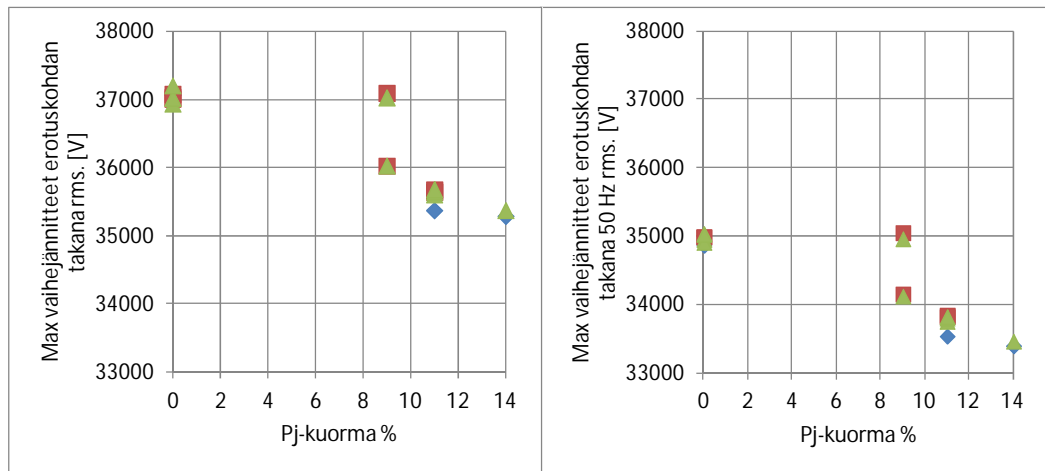
	AV	BV	CV	A-BV	B-CV	C-AV
RMS	11396.65	37065.18	37037.45	35554.23	7331.45	34206.28
FND	11385.08	35034.86	34980.35	33548.49	4478.12	32041.27
DC	-0.86	-141.63	-136.48	140.76	-5.14	-135.61
THD	511.72	12098.09	12170.73	11772.04	5804.73	11975.30

Kuva 2.4 Vaihejännitteet erotuspaikan takana osittain kompensoidussa verkossa sekä syöttävän vaiheen virta

Ylijännitteet

Kuvassa 2.5 on esitetty suurimpia vaiheiden ja maan välisiä ylijännitteitä erotuskohdan takana osittain kompensoidussa verkossa, kun kaapelia ja muuntajaa syötetään yhdellä vaiheella. Kuvassa on 11 eri kytkentätilannetta. Jännitteen 50 Hz komponentti jää jonkin verran alemmaksi kuin jännitteen tehollisarvo. Ilman kuormitusta ylijännitteet voivat nousta resonanssin seurauksena noin kolminkertaisiksi normaalitilaan verrattuna. Pienjännitekuormalla on ollut ylijännitteitä jonkin verran vaimentava vaikutus. 20 % kuormalla merkittävää resonoitumista ei esiintynyt eikä ylijännitteitä esiintynyt.

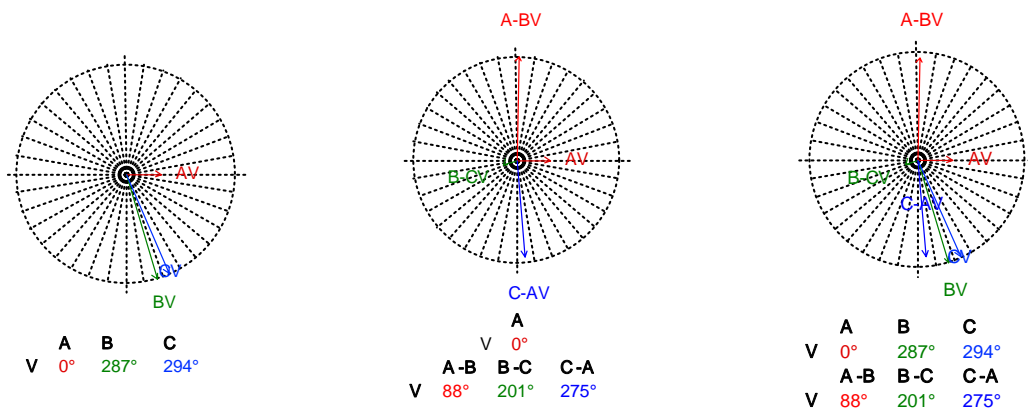
Sammutetussa verkossa suurin vaihejännite oli kahdessa avauksessa ilman kuormitusta noin 28 - 30 kV. 9 - 20 % kuormalla ei esiintynyt muutamaa jaksoa pidempää merkittävää ylijännitettä.



Kuva 2.5 Vaiheiden ja maan välisiä ylijännitteitä erotuskohdan takana osittain kompensoidussa verkossa, kun kaapelia ja muuntajaa syötetään yhdellä vaiheella. Kuvassa on 11 eri kytkentätilannetta.

Erotuskohdan takana esiintyvien jännitteiden suuruutta voi arvioida myös pienjänniteverkon jännitteiden perusteella. Ideaalisessa tapauksessa kuormittamattomassa Dyn-kytkentäisessä muuntajassa toision vaihejännitteiden suhteelliset muutokset ovat samoja kuin ensiöpuolen pääjännitteiden suhteelliset muutokset. Resonanssitilanteessa em. oletuksen tarkkuus on kyseenalainen. Tarkastellaan tilannetta kuitenkin esimerkinomaisesti.

Kuvassa 2.6 on esitetty pienjänniteverkon jännitteiden osoittimet kaapelin ja muuntajan ollessa syötettyinä yhdellä vaiheella.



Kuva 2.6 Erotuskohdan takaiset jännitteiden osoittimet esimerkkitapauksessa kaapelin ja muuntajan syötön ollessa osittain kompensoidussa verkossa yhdellä vaiheella resonanssitilanteessa. A, B, C ovat vaihejännitteet ja A-B, B-C ja C-A pääjännitteet

Kuvassa 2.7 on tarkasteltu jännitteiden suuruuksia sekä mittausten että muuntosuhteilla tapahtuvan päättelyn avulla. Näyttäisi siltä, että pj-puolen mittausten pohjalta tehty arvio kj-puolen vaihejännitteille antaa suuntaa-antavia, mutta jonkin verran kj-puolen mittauksia pienempiä arvoja. Ylijännitteet jäisivät tuon mukaan noin 89...92 %:iin mitatuista.

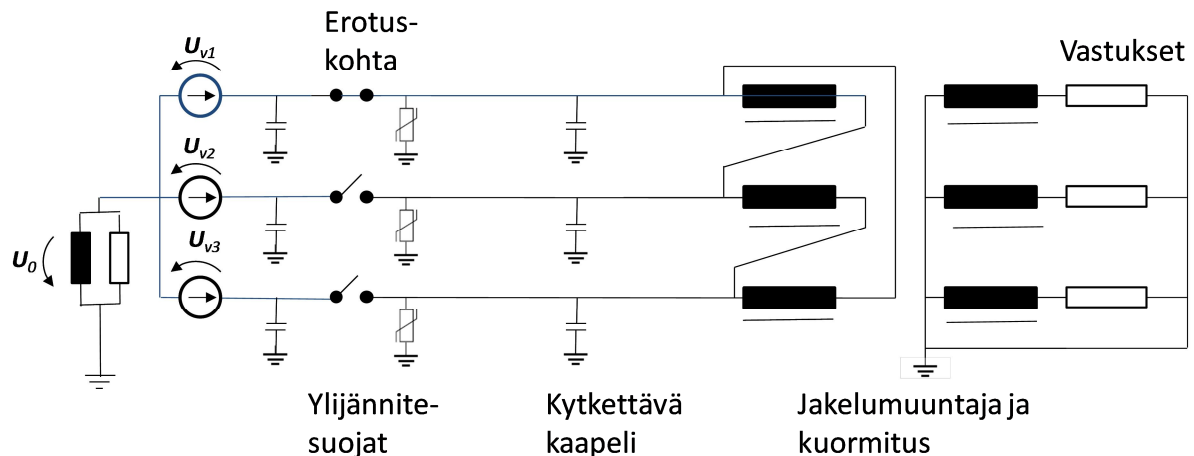
1. Ensin kj-puolen mittauksista pj_puolelle							
Mitatut kj-puolen jännitteet							
	AVrmsValu	BVRmsValu	CVrmsValu	ABrmsValue	BCrmsValu	CArmsValue[V]	
	11409	37020	37192	34189	8456	35509	
	56%	181%	181%	167%	41%	173%	
Lasketut pj-puolen jännitteet muuntosuhteella							
				384	95	398	
				167%	41%	173%	
Mitatut pj-puolen jännitteet							
				350	98	360	
				152%	43%	157%	
Vertailu kj-puolelta laskettuihin							
				91%	103%	90%	
2. Toiseksi pj-puolen mittauksista kj-puolelle							
Mitatut pj-puolen jännitteet							
	350	98	360				
	152%	43%	157%				
Em. suhteessa kj-puolelle pääjännitteet							
				31196	8735	32087	
Lisätään syöttävä vaihejännite (n. 90 asteen kulmassa suurimmille)							
	11500	34086	33248				
Vertailu kj-puolella mitattuihin							
	101%	92%	89%				

Kuva 2.7 Esimerkki erotuskohdan takaisten vaihejännitteiden likimääräisestä arvioinnista pj-puolen mittausten perusteella

2.2 Kohteen B mittaukset

Mittauskohde B oli keskijänniteverkossa, jonka kapasitiivinen maasulkuvirta oli 75 A. Verkkoa voitiin käyttää myös sammutettuna. Tällöin kompensointiaste oli n. 95 % sekä sammutuskuristimen tähtipisteen ja maan välisen lisävastuksen resistanssi oli 1400 ohmia.

Kuvassa 2.8 on esitetty erotuskohdan jälkeisen verkon rakenne kohteen B mittauksissa. Kytettävän kaapelin pituus oli noin 0,8 km ja yhden vaiheen kapasitiivinen varausvirta oli noin 0,6 A. Jakelumuuntajan koko oli 100 kVA. Jakelumuuntajan pienjännitepuolelle oli myös kytkettävissä resistiivisiä kuormituksia 0...30 % muuntajan nimelliskoosta.



Kuva 2.8 Erotuskohdan jälkeisen verkon rakenne kohteen B mittauksissa

Mittauksia tehtiin neljällä Dranetz PX-5 sähkölaatuanalysointilaitteella, joka täyttää standardin IEC 61000-4-30 luokan A vaatimukset. Lisäksi saatiin tapahtumia tallennettua suoja- ja häiriötallentimilla. Mittauskohteiksi oli valittu:

- Sähköaseman vaihejännitteet ja tutkittavan johtolähdön vaihevirrät sekä verkon nolajännite ja johtolähdön summavirta
- Muuntamolla pienjännitepuolen vaihejännitteet

Eri suureita pyrittiin tallentamaan ensisijaisesti käyrämuotoina sopivilta ajankohdilta. Mittarinen käynnistys tehtiin manuaalisesti ennen kunkin kytkennän tekoa. Käyrämuodoista pystytään jälkeenpäin laskemaan ja analysoimaan erilaisia suureita monipuolisesti ohjelmiston avulla.

Mittausten alkuvaiheessa kaapelin ja muuntajan ollessa kytkettyinä verkkoon 1. vaiheen avauksen jälkeen meni verkko yli minuutin kestäneeseen resonanssitilaan. Kahdella vaiheella syötettäessä nolajännite oli tällöin lähes 300 V ja nolavirta noin 2 A. Resonanssin sammuttua nolajännite oli 85 V ja nolavirta 0,5 A. Tämän jälkeen 2. vaiheen avauksen jälkeen uudessa resonanssitilassa nolajännite oli 650...660 V. 3. vaiheen avauksen jälkeen jonkin ajan kuluttua suljettiin jälleen yksi vaihe. Muutama sekunti tämän jälkeen maasulkusuojaus laukaisi katkaisijan auki. Syynä tähän oli ylijännitesuojan vaurio.

Mittauksia jatkettiin käyttämällä jakelumuuntajan toisiopuolella kuormitusvastuksia. Tavoitteena oli selvittää eri kokoisten kuormien vaikutusta resonanssin syntymiseen.

Taulukossa 2.4 on yhteenvetoa verkkokokeista maasta erotetulla verkolla erilaisilla kuormituksilla. Kytöntäjäjärjestyksiä muuteltiin kokeiden edetessä, vaikka tämä käykään suoraan taulukosta ilmi.

Käytetyt vastuskuormat olivat 12 kW (230/400 V) ja 10,5 kW (230/400 V). Mittausten aikana jännite oli nimellisarvoa jonkin verran korkeampi.

Taulukko 2.4 Yhteenvetoa verkkokokeista maasta erotetulla verkolla erilaisilla kuormituksilla.

- 1A 1. vaiheen avaus
- 2A 2. vaiheen avaus 1. ollessa auki
- AAA Kaikkien vaiheiden peräkkäiset avaukset
- KKK Kaikkien vaiheiden peräkkäiset sulkemiset
- 1K 1. vaiheen sulkeminen
- 2K 2. vaiheen sulkeminen 1. ollessa kiinni
- R Pj-puolen mitattu kuormitus
-

Tapahtumasarja	Kytännät	R kW	U ₀ 50 Hz V	I ₀ 50 Hz A
1	1A	12.5	< 100	≤0,6
	2A	12.5	< 100	≤0,6
	3A ja KKK	12.5	< 100	≤0,6
2	1A	12.5	< 100	≤0,6
	2A	12.5	< 100	≤0,6
	1K, 2K	12.5	< 100	≤0,6
3	1A	12.5	< 100	≤0,6
	2A	12.5	< 100	≤0,6
	1K, 2K	12.5	< 100	≤0,6
4	1A	11	80	3,8
	2A	11	570	
	1K, 2K	11		
5	1A	11	80	3,7
	2A	11	575	
	1K, 2K			
6	1A	11	80	3,7
	2A	11	597	
	1K, 2K	11		

Taulukossa 2.5 on yhteenvetoa verkkokokeista sammutetulla verkolla erilaisilla kuormituksilla. Kytöntäjäjärjestyksiä muuteltiin näissäkin kokeissa.

Taulukko 2.5 Yhteenvedoa verkkokokeista sammutetulla verkolla erilaisilla kuormituksilla R.

- 1A 1. vaiheen avaus
- 2A 2. vaiheen avaus 1. ollessa auki
- AAA Kaikkien vaiheiden peräkkäiset avaukset
- KKK Kaikkien vaiheiden peräkkäiset sulkemiset
- 1K 1. vaiheen sulkeminen
- 2K 2. vaiheen sulkeminen 1. ollessa kiinni
- R Pj-puolen mitattu kuormitus

Tapahtumasarja	Kytkenät	R kW	U0 50 Hz V	I0 50 Hz A
7	1A	12.5	700	0,58
	2A	12.5	4100	3,2
	3A ja KKK	12.5	<100	
8	1A	12.5	780	0,6
	1K	12.5	<100	
	2K	12.5	780	
	3K	12.5	<100	
9	1A	12.5	780	
	2A	12.5	952	
	1K, 2K	12.5	<100	
10	1A	12.5	933	1,6
	2A	12.5	2300	
	1K, 2K	12.5	<100	
11	1A	12.5	714	0,62
	2A	12.5	787	
	1K, 2K	12.5	<100	
12	1A	11	700	0,6
	2A	11	757	
	1K, 2K	11		
13	1A	11	2465	1,77
	2A	11	933	
	1K	11		
	2A		780	
14	1A	11	884	
	2A	11		
	1K, 2K	11		

Ylijännitteiden suuruuksiksi arvioitiin kohteessa B:

- Maasta erotettu verkko
 - o 12,5 kW kuormalla ei mitattuja ylijännitteitä
 - o 11 kW:lla n. 30 kV pääteltynä pj-puolen mitatuista jännitteistä. Suoraa mittaus-ta ei ollut.
- Sammutettu verkko
 - o Suurimmat ylijännitteet noin 28-30 kV pääteltynä pj-puolen jännitteistä. Suo-
raa mittausta ei ollut.

3. Yksivaiheisten kytkentöjen mallinnuksen perusteoriaa

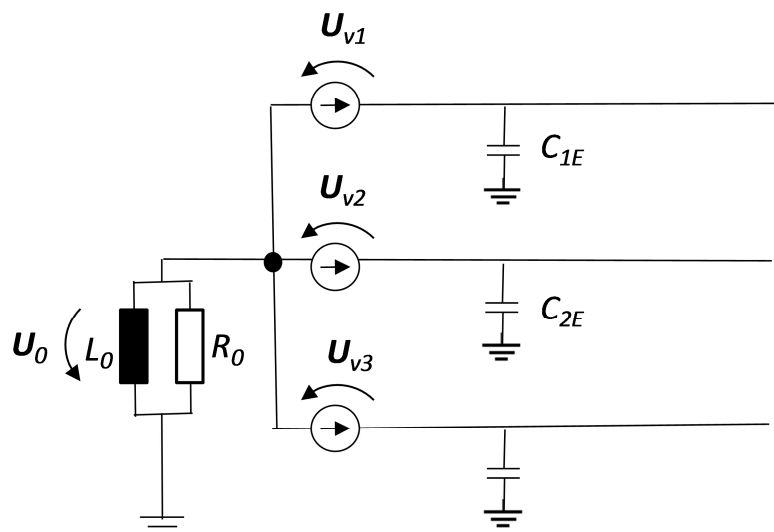
Tässä luvussa käsitellään yksivaiheisten kytkentöjen verkossa aiheuttaman epäsymmetrian vaikutuksia verkon nollajännitteeseen sekä johtolähtöjen summavirtoihin.

3.1 Sähkötekniset ilmiöt olettaessa koko verkon käyttäytyvän lineaarisesti sekä nollajännitteen ja summavirtojen laskenta

Nollajännite ja summavirrat yksinkertaistetussa perustapauksessa

Tarkastellaan aluksi kuvan 3.1 mukaista yksinkertaistettua verkkorakennetta. Verkko on kuormittamaton ja sen oletetaan käyttäytyvän lineaarisesti. Impedansseista on otettu huomioon vain vaiheiden ja maan väliset kapasitanssit sekä mahdolliseen maasulkuvirran kompensointiin liittyvät induktanssi ja resistanssi tähtipisteen ja maan välillä.

Mikäli esimerkiksi kaapelin vajaanapaisen kytkennän seurauksena verkon kapasitanssisymmetria muuttuu, muuttuu tämän seurauksena myös tähtipisteen ja maan välinen nollajännite U_0 . Myös johtolähtöjen vaihejohtimien summavirrat muuttuvat. Näitä suureita hyödynnetään myös verkon maasulkusuojauksessa. Mikäli kaapelin vajaanapainen kytkentä aiheuttaa näihin suojausasettelut ylittäviä lukemia, voi tapahtua ei-toivottu maasulkulaukaisu, vaikka kyse ei olekaan maasulusta. Em. suureiden muutoksia voidaan arvioida seuraavan teorian pohjalta.



Kuva 3.1 Yksinkertaistettu verkon sijaiskytkentä

Kuvan 3.1 verkon tähtipisteelle virtojen tasapainoyhtälö symmetrisessä tai epäsymmetrisessä tilassa voidaan kirjoittaa koko verkon vaiheiden ja maan välisiä kapasitansseja käyttäen:

$$-\mathbf{U}_0 \mathbf{Y}_0 = -\mathbf{U}_0 \cdot (1/(j\omega L_0) + 1/R_0) = \\ ((\mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{v1}) \cdot j\omega C_{1E} + (\mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{v2}) \cdot j\omega C_{2E} + (\mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{v3}) \cdot j\omega C_{3E}) \quad (3.1)$$

\mathbf{U}_0 = Verkon nollajännite

L_0 = Sammutuskuristimen induktanssi. Maasta erotetussa verkossa $1/(j\omega L_0) \approx 0$.

R_0 = Sammutuskuristimen ja lisävastuksen rinnankytkennän resistanssi.

Verkon ollessa maasta erotettu $1/R_0 \approx 0$.

ω = Kulmataajuus = $2\pi f$, jossa $f=50$ Hz

$\mathbf{U}_{v1}, \mathbf{U}_{v2}, \mathbf{U}_{v3}$ = Syöttävän verkon vaihejännitteet

C_{1E}, C_{2E}, C_{3E} = Koko verkon vaiheen ja maan väliset kapasitanssit

Nollajännitteelle \mathbf{U}_0 saadaan:

$$\mathbf{U}_0 = \frac{-(\mathbf{U}_{v1} \cdot j\omega C_{1E} + \mathbf{U}_{v2} \cdot j\omega C_{2E} + \mathbf{U}_{v3} \cdot j\omega C_{3E})}{(1/(j\omega L_0) + 1/R_0 + j\omega C_{1E} + j\omega C_{2E} + j\omega C_{3E})} \quad (3.2)$$

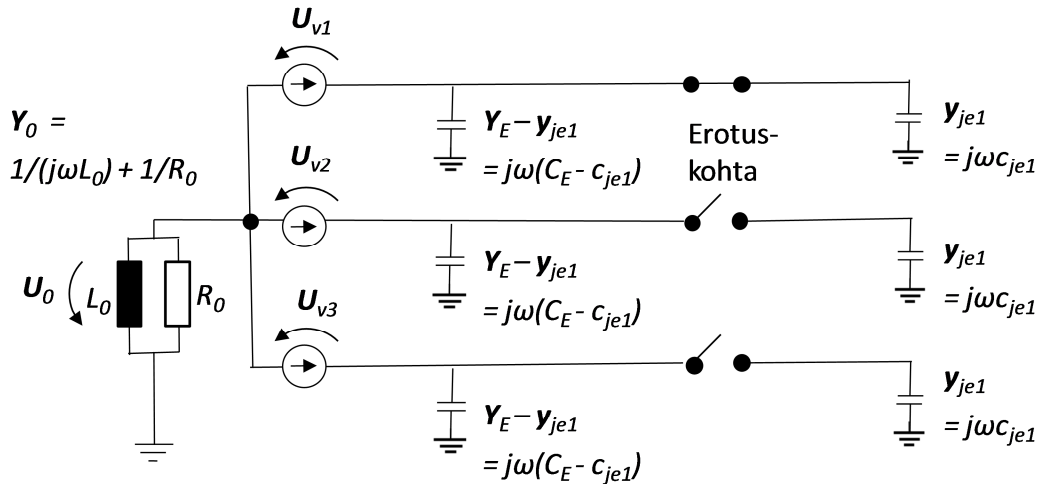
Tarkastellaan seuraavaksi yhtä johtolähtöä, joka on osa laajempaa verkkoa. Tällöin johtolähdön L alussa vaihevirtojen summavirraksi \mathbf{I}_{sum} tulee käyttäen ko. lähdön L kapasitansseja:

$$\mathbf{I}_{sum} = \mathbf{U}_0 \cdot (j\omega C_{1EL} + j\omega C_{2EL} + j\omega C_{3EL}) + \mathbf{U}_{v1} \cdot j\omega C_{1EL} + \mathbf{U}_{v2} \cdot j\omega C_{2EL} + \mathbf{U}_{v3} \cdot j\omega C_{3EL} \quad (3.3)$$

$C_{1EL}, C_{2EL}, C_{3EL}$ = Tarkasteltavan johtolähdön vaiheen ja maan väliset kapasitanssit

Esimerkkitapaus: Nollajännite ja summavirrat syötettäessä kaapelia yhdellä vaiheella

Tarkastellaan kuvan 3.2 mukaista yksinkertaistettua verkkorakennetta. Erotuskohdan takana olevat kaapelin vaihekapasitanssit ovat nyt eriteltyinä piirrettyjä. Kaksi vaihetta on kytkettyinä irti ja kaapelia syötetään yhdellä vaiheella. Kaikkien vaiheiden ollessa kytkettyinä verkossa olisi kapasitanssisymmetria.



Kuva 3.2 Verkon sijaiskytkentä, kun kaapeliosuus on syötettynä yhdellä vaiheella

Verkon tähtipisteelle virtojen tasapainoyhtälö on:

$$-\mathbf{U}_0 \mathbf{Y}_0 = (\mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{v1}) \mathbf{Y}_E + (\mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{v2})(\mathbf{Y}_E - \mathbf{y}_{je1}) + (\mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{v3})(\mathbf{Y}_E - \mathbf{y}_{je1}) \quad (3.4)$$

\mathbf{U}_0 = Verkon nollajännite

$\mathbf{U}_{v1}, \mathbf{U}_{v2}, \mathbf{U}_{v3}$ = Verkon vaihejännitteet

\mathbf{Y}_0 = Tähtipisteen ja maan välinen admittanssi = $1/(j\omega L_0) + 1/R_0$.

Maasta erotetussa verkossa $1/(j\omega L_0) \approx 0$, $1/R_0 \approx 0$ ja $\mathbf{Y}_0 \approx 0$

ω = Kulmataajuus = $2\pi f$, jossa $f = 50$ Hz

L_0 = Mahdollisen sammutuskuristimen induktanssi

R_0 = Mahdollisen sammutuskuristimen ja lisävastuksen rinnankytkennän resistanssi

\mathbf{Y}_E = Koko verkon vaiheen ja maan välistä kapasitanssia C_E vastaava admittanssi = $j\omega C_E$

\mathbf{y}_{je1} = Kytkettävän kaapelin yhden vaiheen kapasitanssia C_{je1} vastaava admittanssi = $j\omega C_{je1}$

Tästä saadaan verkon nollajännitteelle \mathbf{U}_0 :

$$\mathbf{U}_0 = (\mathbf{U}_{v2} \mathbf{y}_{je1} + \mathbf{U}_{v3} \mathbf{y}_{je1}) / (\mathbf{Y}_0 + 3\mathbf{Y}_E - 2\mathbf{y}_{je1}) \quad (3.5)$$

Nollajännitteen itseisarvolle saadaan myös likimääräiskaava:

$$|\mathbf{U}_0| = \left| \frac{(\mathbf{U}_{v2} \mathbf{y}_{je1} + \mathbf{U}_{v3} \mathbf{y}_{je1})}{(\mathbf{Y}_0 + 3\mathbf{Y}_E - 2\mathbf{y}_{je1})} \right| = \left| \frac{-\mathbf{U}_{v3} \mathbf{y}_{je1}}{(\mathbf{Y}_0 + 3\mathbf{Y}_E - 2\mathbf{y}_{je1})} \right| \approx \left| \frac{i_{je1}}{I_{Esum}} \right| \cdot U_v \quad (3.6)$$

\mathbf{y}_{je1} = Kytkettävän kaapelin yhden vaiheen kapasitanssia C_{je1} vastaava admittanssi = $j\omega C_{je1}$

i_{je1} = Kaapelin yhden vaiheen kapasitanssia C_{je1} vastaavan varausvirran itseisarvo = $U_v \cdot \omega C_{je1}$

I_{Esum} = Verkon maasulkuvirran itseisarvo ilman vikaresistanssia kaapelin kaikkien vaiheiden ollessa kytkettynä = $U_v \cdot |Y_0 + 3Y_E| = (I_{res}^2 + I_R^2)^{0.5}$

U_v = Verkon vaihejännitteen itseisarvo

I_{res} = Kapasitiivinen jäännösvirta ottaen huomioon mahdollisen sammutuksen

I_R = Mahdollisen sammutuskuristimen ja lisävastuksen rinnankytkennän pätovirta

Jos esimerkiksi maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta on 50 A ja kaapelin yhden vaiheen varausvirta on 1 A, saadaan likimääräiskaavalla 3.6 kaapelin kahden vaiheen ollessa irti nollajännitteeksi 1/50 kertaa vaihejännite eli suhteellisenä arvona 2,00 %. Em. tarkemmilla kaavoilla tulos on 2,08 %. Sammutetussa verkossa likimääräiskaavan tarkkuus huononee.

Tarkastellaan seuraavaksi yhtä johtolähtöä, joka on osa laajempaa verkkoa. Tällöin johtolähdön L alussa vaihevirtojen summavirraksi I_{sum} tulee käyttäen ko. lähdön L admittanssia Y_{EL} :

$$I_{sum} = U_0(3Y_{EL} - 2y_{je1}) - U_{v2}y_{je1} - U_{v3}y_{je1} \quad (3.7)$$

I_{sum} = Johtolähdön summavirta

Y_{EL} = Johtolähdön vaiheen ja maan välistä kapasitanssia C_{EL} vastaava admittanssi = $j\omega C_{EL}$

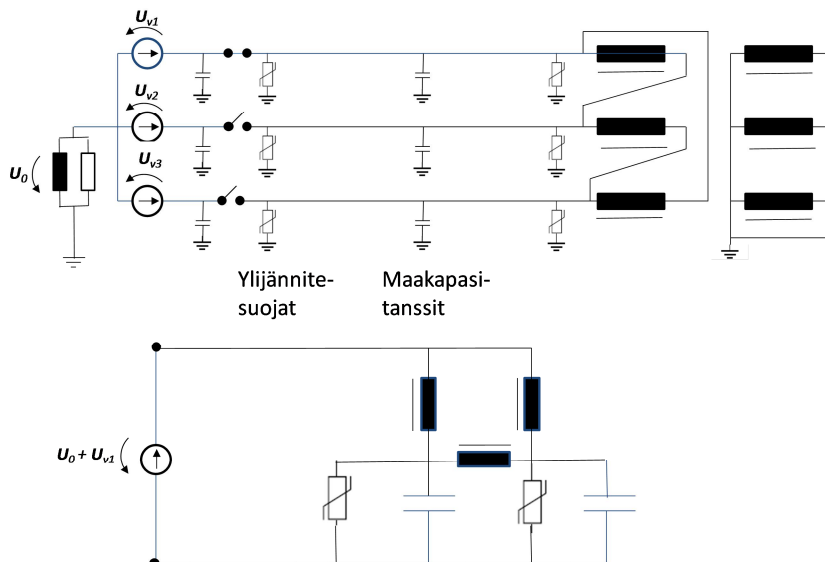
y_{je1} = Kytettävän kaapelin yhden vaiheen kapasitanssia C_{je1} vastaava admittanssi = $j\omega c_{je1}$

Yksinkertaisina em. kaavat soveltuvat helposti mm. Excel taulukkopohjaan tai jossakin muussa laskentasovelluksessa käytettäviksi.

Nollajännitteen suuruuteen vaikuttavat myös verkon normaalikäytön epäsymmetrioiden aiheuttamat nollajännite- ja summavirtakomponentit, jotka summautuvat kaapelin kytkennän aiheuttamiin muutoksiin.

3.2 Verkon epälineaarisuuksien vaikutus

Tarkastellaan seuraavaksi kuvan 3.3 mukaista verkkoa. Nyt verkkoon on lisätty jakelumuuntaja sekä ylijännitesuojat.



Kuva 3.3 Erotuskohdan jälkeisen verkon ja kuormittamattoman muuntajan impedanssien kytkeytyminen

Erityinen resonanssin tapainen ylijännitteen muodostumismekanismi on kapasitanssin ja epälineaarisen induktanssin muodostamassa sarjapiirissä syntyvä värähtely, jota nimitetään ferroresonanssiksi [5].

Kuvan 3.3 verkossa muuntajan epälineaarisen tyhjäkäynti-impedanssin induktanssit kytkeytyvät sarjaan kaapelin maakapasitanssien kanssa. Tällöin jakelumuuntajan kaksi pääjännitettä sekä myös irti olevien vaiheiden ja maan väliset jännitteet erotuskohdan takana voivat jopa moninkertaistua. Syynä on kytkentöjen vaikutus epälineaarisia induktansseja ja maakapasitansseja sisältävässä sähköisessä piirissä. Jännitteiden vahvistumista rajoittavat toisaalta ylijännitesuojat sekä impedansseihin sisältyvät resistanssit. Myös lisäämällä muuntajalle resistiivistä kuormaa voidaan vaikuttaa resonanssin syntymiseen.

Em. tilanteessa myös verkosta tuleva virta kasvaa ja syöttävän verkon epäsymmetria kasvaa. Tällöin myös syöttävän verkon nollajännite ja lähdön summavirta kasvavat mahdollisesti moninkertaisiksi verrattuna tilanteeseen, jossa resonanssia ei esiinny. Mikäli resonanssia ei synny, niin kaapelin ja muuntajan kytkentä vastaa likimain pelkän kaapelin kytkentää, jota käsiteltiin aiemmin kappaleessa 3.1.

Resonanssitilanteen matemaattinen analysointi laskennallisesti on erittäin vaativa tehtävä. Siksi tässä tutkimuksessa päädyttiin selvittämään eri ilmiöitä käytännön verkkokokeisiin liittyvillä mittauksilla sekä simuloinneilla. Esimerkkejä ja johtopäätöksiä näistä esitetään raportin muissa luvuissa.

4. Vajaanapaisten kytkentöjen mallintaminen ja simulointi

4.1 Tyypitapaukset

Tässä tutkimuksessa tehtiin sekä kenttämittauksia vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä että simulointeja PSCAD ohjelmiston avulla. Kenttäkokeita oli mahdollisuus tehdä varsin rajallisesti. Siksi vajaanapaisten kytkentöjen aikana esiintyviin ilmiöihin keskeisesti vaikuttavia suureita ei voitu varioida kovin paljoa. Tuloksia pyrittiin kuitenkin yleistämään muunkinlaisiin kuin mitattuihin verkkotilanteisiin. Siksi vajaanapaisia kytkentöjä tarkasteltiin myös simulointien avulla. Kenttäkokeita tarvittiin yleisemmän PSCAD verkkomallin verifiointiin, jotta voitiin arvioida tulosten luotettavuutta myös muissa verkkotilanteissa. Pelkän kaapelin kytkentää varten tehtiin laskentamalli Matlab ohjelmiston avulla.

Vajaanapaisten kytkentöjen aiheuttamiin sähköisiin ilmiöihin vaikuttavat mm.

- Verkon yhteenlaskettu kapasitiivinen maasulkuvirta eli verkon sähköinen laajuus
- Verkon käyttömaadoitustapa
 - maasta erotettu verkko
 - osittain kompensoitu verkko (esim. hajautettu kompensointi)
 - sammutettu verkko
 - lisäkuormitusvastuksen mitoitus ja käyttötapa
- Kytkettävän JT kaapelin varausvirta, johon vaikuttavat lähinnä kaapelin poikkipinta, tyyppi ja pituus
- Mikäli kaapelin kanssa kytketään myös muuntaja, sen nimellisteho ja kyllästymisominaisuudet

Simulointien kokonaismäärän pitämiseksi kohtuullisena, tutkimuksessa määriteltiin tarkasteltaville tilanteille ns. tyypitapaukset, joiden katsottiin kattavan tyypillisimpiä vajaanapaisissa kytkennöissä vastaan tulevia tilanteita. Täydelliseen kattavuuteen ei ollut mahdollista päästä, koska simuloitavien tapausten määrä olisi kasvanut kohtuuttoman suureksi. Maakaapelin vajaanapaisten kytkennän kannalta olennaisin parametri on kytkettävän maakaapelin varausvirta vaihetta kohti. Siksi kaapelin pituus esitettiin simulointien yhteydessä kaapelin edustamina varausvirtoina (0,25 – 1,5 A). Kyseiset varausvirrat voidaan muuttaa helposti kaapelipituudeksi, kun kaapelin tyyppi, poikkipinta ja valmistajan ilmoittama varausvirta kilometriä kohti

tunnetaan. Seuraavassa on esitetty määritellyt tyyppitapaukset pelkän maakaapelin sekä maakaapelin ja muuntajan kytkennöille.

4.1.1 Maakaapelin kytkennät

Seuraavassa on esitetty pelkän maakaapelin vajaanapaisten kytkentöjen simuloinnissa käytetyt tyyppitapaukset. Sammutetun verkon tapauksessa verkon kompensointiasteena oli 95 % ja lisäkuormitusvastus oli $2,5 \Omega$ (500 V). Tehdyissä laskelmissa ja simuloinneissa lisäkuormitusvastus oli verkkoon kytkettynä vajaanapaisten kytkentöjen aikana.

1. MAASTA EROTETTU VERKKO

- verkon kapasitiivinen maasulkuvirta 100 A
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A

2. MAASTA EROTETTU VERKKO

- verkon kapasitiivinen maasulkuvirta 150 A
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A

3. SAMMUTETTU VERKKO

- verkon tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta 100 A
- kompensointiaste 95 %
- lisäkuormitusvastus $2,5 \Omega$ (500 V), noin 1402Ω (20 kV)
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A

4. SAMMUTETTU VERKKO

- verkon tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta 150 A
- kompensointiaste 95 %
- lisäkuormitusvastus $2,5 \Omega$ (500 V), noin 1402Ω (20 kV)
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A

Maasulkusuojauksen toiminnan kannalta keskeisen nollajännitteen arvioimiseksi laskettiin käyrästä, jossa verkossa esiintyvä nollajännite vajaanapaisessa kytkentätilanteessa on esitetty verkon kapasitiivisen maasulkuvirran funktiona. Käyrästä nähdään verkon nollajännite, kun verkon kapasitiivinen maasulkuvirta vaihtelee välillä 50 – 300 A.

4.1.2 Maakaapelin ja kuormittamattoman jakelumuuntajan kytkennät

Verkon sähköisen laajuuden ja kytkettävän maakaapelin varausvirran lisäksi varioitiin tarkasteltavan jakelumuuntajan kokoa eli nimellistehoa. Simuloinneissa tarkasteltiin 50 kVA, 100 kVA ja 200 kVA jakelumuuntajia. Kenttämittauksissa oli 50 kVA ja 100 kVA muuntajat.

Simuloitavia tyyppitapauksia oli siis kolminkertainen määrä alla lueteltuihin tyyppitapauksiin verrattuna, koska kaikki muuntajakoot simuloitiin erikseen.

1. MAASTA EROTETTU VERKKO

- verkon kapasitiivinen maasulkuvirta 100 A
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A
- kuormittamaton muuntaja 50 kVA, 100 kVA ja 200 kVA

2. MAASTA EROTETTU VERKKO

- verkon kapasitiivinen maasulkuvirta 150 A
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A
- kuormittamaton muuntaja 50 kVA, 100 kVA ja 200 kVA

3. SAMMUTETTU VERKKO

- verkon kapasitiivinen maasulkuvirta 100 A
- kompensointiaste 95 %
- lisäkuormitusvastus 2,5 Ω (500 V), noin 1402 Ω (20 kV)
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A
- kuormittamaton muuntaja 50 kVA, 100 kVA ja 200 kVA

4. SAMMUTETTU VERKKO

- verkon kapasitiivinen maasulkuvirta 150 A
- kompensointiaste 95 %
- lisäkuormitusvastus 2,5 Ω (500 V), noin 1402 Ω (20 kV)
- JT maakaapelin varausvirta 0,25 – 1,5 A
- kuormittamaton muuntaja 50 kVA, 100 kVA ja 200 kVA

4.1.3 Maakaapelin ja kuormitetun jakelumuuntajan kytkennät

Sekä kenttäkokeissa että simuloinneissa havaittiin, että maakaapelin ja tyhjäkäyvän jakelumuuntajan vajaanapaisissa kytkennöissä syntyy helposti sarjaresonanssi maakaapelin kapasitanssin ja muuntajan tyhjäkäynti-induktanssin välille. Ilmiötä kutsutaan myös ferresonanssiksi. Muuntopiirin asiakkaiden kuormitukset otetaan aina kytkentöjen ajaksi irti asiakkaille aiheutuvien jännitteen laatuongelmien ja ylijännitteiden välttämiseksi. Tavoitteena oli selvittää, voidaanko resonanssin syntymiseen vaikuttaa kytkemällä muuntajan pienjännitepuolelle ulkoinen resistiivinen kuorma. Resonanssin vaimentamiseen tarvittavan vastuskuorman suuruudesta ei ollut ennakkoon tietoa. Kuormitetun jakelumuuntajan tapauksessa tarkasteltiin vastaavia tyyppitapauksia kuin kuormittamattoman muuntajan tapauksissa.

4.2 Keskijänniteverkon mallintaminen vajaanapaisten kytkentöjen tarkastelua varten

Vajaanapaisten kytkentöjen mallintamista ja simulointia varten tehtiin dynaamisiin tarkasteluihin soveltuva verkkomalli PSCAD ohjelmiston avulla. Ensimmäisessä vaiheessa tavoitteena oli mallin ja simulointitulosten evaluointi. Mallin tuloksia verrattiin vastaaviin kenttäkokeista saatuihin mittaustuloksiin. Kenttäkokeita tehtiin Elenia Oy:n verkossa (kohde A). Kyseisestä verkosta tehtiin PSCAD malli, jonka avulla simuloitiin vastaavia vajaanapaisia kytkentätilanteita kuin kenttäkokeissa. Seuraavassa on kuvattu PSCAD verkkomallia ja sen komponentteja.

4.2.1 Verkkomalli tyyppitapausten simulointia varten

Tyyppitapausten mallintamiseksi PSCAD ohjelmistolla tehty verkkomalli sisälsi seuraavat osat.

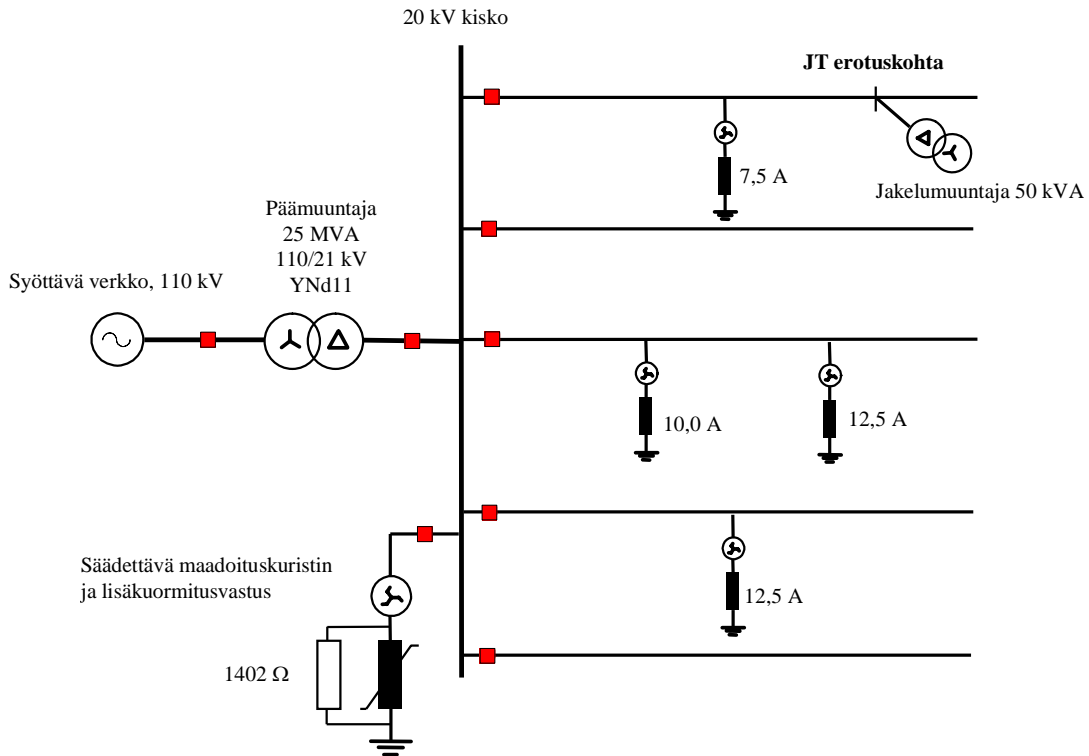
- 110 kV jännitelähde
- Päämuuntaja 25 MVA, kytkentäryhmä YNd11
- Verkon tähtipiste sammutetun verkon tapauksessa
 - Tähtipiste muodostettiin maadoitusmuuntajalla.
 - Maadoituskuristin maadoitusmuuntajan tähtipisteessä
 - Koko verkon kompensointiaste säädettiin 95 %:iin säädettävän maadoituskuristimen avulla.
 - $\text{Kompensointiaste} = (I_L / I_C) * 100 \%$
 - Kompensointiaste muuttuu hieman JT kaapelin pituutta muutettaessa
- Lisäkuormitusvastus maadoitusmuuntajan tähtipisteessä
 - 500 V apukäämiin kytketyn lisäkuormitusvastuksen arvona käytettiin 2,5 Ω
 - 2,5 Ω vastaa noin 1402 Ω resistanssia 20 kV puolella
 - Jäykässä maasulussa vastus tuottaa noin 8,5 A resistiivisen komponentin maasulkuvirtaan.
 - Valmistajan mukaan lisäkuormitusvastuksen laskennallinen vaikutus vikavirtaan +20°C lämpötilassa on 7,7 – 9,4 A huomioiden vastusvalmistajan +/- 10 % toleranssi.
- JT lähtö
 - Lähdön tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta oli 20 % koko verkon tuottamasta kapasitiivisesta maasulkuvirrasta.
 - Lähdön kuormitus mallinnettiin 200 kVA muuntajilla, joiden kuormitusta voitiin säätää.
- JT maakaapeli
 - JT kaapeli mallinnettiin käyttämällä AHXAMK-W 3x95Al+35Cu maakaapelia

-
- JT kytkentöihin liittyvien ilmiöiden kannalta keskeisin suure on JT kaapelin kapasitanssi ja sen synnyttämä varausvirta kaapelin muiden ominaisuuksien vaikuttaessa vähemmän.
 - JT kaapelin edustamat varausvirta-arvot säädettiin halutuiksi muuttamalla JT kaapelin pituutta.
 - Sama varausvirta vastaa eri poikkipinta-aisilla kaapeleilla eripituista kaapelia.
 - Tietyn varausvirran edustamat kaapelipituudet eri poikkipinta-aisilla kaapeleilla saadaan mm. kaapelivalmistajien taulukoista.
 - Taustaverkon lähdöt
 - Koko verkon kapasitiivinen maasulkuvirta oli 100A / 150 A tyyppitapausten mukaisesti.
 - JT lähdön lisäksi kytkettynä oli neljä muuta lähtöä.
 - Taustaverkon kapasitanssimalli
 - Säädettävä kapasitanssimalli, jolla voidaan säätää koko verkon kapasitiivinen maasulkuvirta halutuksi.
 - Suojaus
 - Suojareleistä oli toiminnalliset mallit.
 - Mallilla voidaan tarvittaessa tarkastaa suojauksen toiminta halutuilla asetuksilla.
 - Erotuskohta
 - Mallinnettiin yksivaiheisena katkaisijana.
 - Logiikan avulla voidaan valita kaikki avaus- ja sulkemiskombinaatiot.
 - Erotettavan / kytkettävän kaapelin molempiin päihin sijoitettiin metallioksidilyjännitesuojat.
 - Jakelumuuntaja vajaanapaisissa kytkennöissä
 - Jakelumuuntaja mallinnettiin PSCAD muuntajamallin avulla.
 - Kilpiarvojen lisäksi malli ottaa huomioon myös muuntajan kyllästymisen.
 - Simuloinneissa tarkasteltiin 50 kVA, 100 kVA ja 200 kVA muuntajia.
 - Muuntajan kyllästymisilmiöiden mallintamisessa käytettiin muuntajavalmistajan toimittamia tyhjäkäyntikäyriä.

Maakaapelin kapasitiivisen reaktanssin ja jakelumuuntajan epälineaarisen tyhjäkäyntireaktanssin välisen sarjaresonanssin syntymisen kannalta muuntajan tyhjäkäyntikäyrä ja epälineaarinen tyhjäkäyntireaktanssi ovat keskeisiä. Laittevalmistajan mukaan yksittäisten muuntajien ominaisuuksien yksilökohtainen vaihtelu tyhjäkäyntikäyrän nimellispisteen ympärillä on suuri (toleranssi standardissa 30 %). Lisäksi tulee huomioida eri valmistajien muuntajien välillä mahdollisesti olevat erot. Energiaa käyttävien tuotteiden EcoDesign-direktiivi laajenee vuonna 2015 koskemaan muuntajia. Uuden direktiivin mukaiset muuntajat tulevat saamaan erilaiset käyrät, koska vuontiheys on huomattavasti alhaisempi.

4.2.2 Verkkomalli simulointien verifiointia varten

Jotta simulointitulosten tarkkuutta ja oikeellisuutta voitiin arvioida, kohteen A verkosta tehtiin erillinen PSCAD malli, jossa tarkasteltava JT lähtö mallinnettiin yksityiskohtaisesti, johtosittain. Tällöin samassa verkossa tehtyjen kenttämittausten tuloksia voitiin verrata simulointituloksiin. Simulointitulosten evaluointi kenttämittausten avulla oli edellytys laajempien ja yleisempien tyyppitapauksissa suoritettujen simulointien tekemiselle. Seuraavassa on esitelty ko. malliin liittyviä tietoja sikäli kuin ne poikkeavat tyyppitapauksissa käytetyistä malleista. Kuva 4.1 havainnollistaa kenttäkokeissa käytetyn verkon kytkentätilannetta.



Kuva 4.1 Kohteen A mukaisen verkon malli.

- Jännitelähde 110 kV
 - Kolmivaiheinen oikosulkuvirta $I_{k3} = 6,8 \text{ kA}$ (20 kV)
 - 20 kV kiskojännite noin 20,6 kV (laskentajännite)
- Päämuuntaja 25 MVA, kytkentäryhmä YNd11
- JT lähdön yksityiskohtainen malli
 - Lähtö mallinnettiin solmupisteväleittäin, samoja johdinlajeja yhdisteltiin jonkin verran.
 - Lähdön kokonaiskuormitus asetettiin vastaamaan suunnilleen koeajankohtaa
- Muista sähköaseman lähdöistä tehtiin yksinkertaistetut mallit, joissa lähinnä lähdön tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta säädettiin vastaamaan ao. lähtöä.

Vajaanapaisiin kytkentöihin liittyvät kenttäkokeet tehtiin lähdöllä, jonka koostumus oli seuraava.

- Avojohtoa noin 49 km
- PAS johtoa noin 23 km
- Maakaapelia noin 10 km
- Lähdön kompensoimaton kapasitiivinen maasulkuvirta oli 24,9 A
- JT erotuskohta sijaitsi noin 28 km sähköasemalta
- JT maakaapeli: 1,16 km AXAL-TT 3x50/25
- Mitattu muuntamo: 50 kVA, 20500/410 V, Dyn11

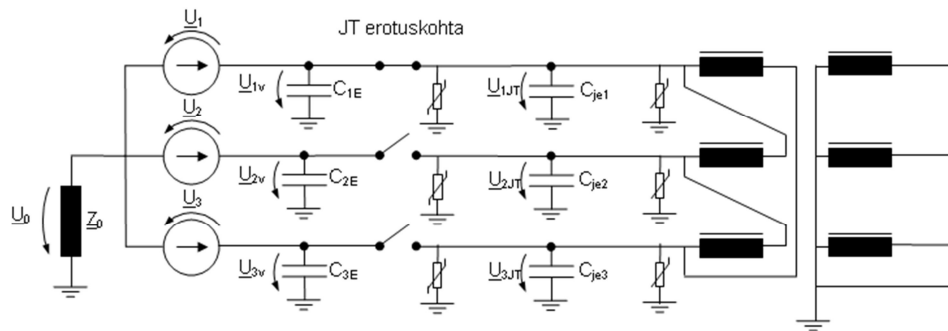
Muiden neljän lähdön avojohto, PAS- ja maakaapelipituudet säädettiin vastaamaan verkkotietoja siten, että lähdön tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta vastasi suunnilleen todellista arvoa.

- Jokaisen lähdön tuottama maasulkuvirta vastaa verkostolaskentaa.
- Myös osa kuormituksesta jaettiin muille lähdoille

Kohteen A verkko on sammutettu sisältäen sekä keskitettyä että hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Seuraavassa on esitetty kompensoinnin mallinnuksessa käytetyt tiedot.

- Maasulkuvirran keskitetty kompensointi
 - Koko verkon tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta 141 A
 - Kokonaiskompensointiaste 95 %
 - Lisäkuormitusvastus $2,5 \Omega$ (500 V)
- Maasulkuvirran hajautettu kompensointi
 - JT lähtö: 7,5 A
 - Lähtö 3: 10 A ja 12,5 A
 - Lähtö 4: 12,5 A
 - Hajautettua kompensointia oli yhteensä 42,5 A vastaten noin 30 % kokonaiskompensointiastetta.
 - Hajautetun kompensoinnin yksiköt mallinnettiin säädettävän kuristimen avulla, joka oli kytketty maadoitusmuuntajan avulla tehtyyn tähtipisteeseen.
- Keskitetyn kompensoinnin ollessa päällä kokonaiskompensointiaste oli 95 %.
- 20 kV syötössä oikosulkusuojaus ja varasuojaus nollajännitteestä
 - Asettelut vastasivat todellisia suojausasetteluja
- JT lähdöllä, lähdöllä 2 ja 3 suojaelemallit
 - Asettelut vastaavat todellisia suojausasetteluja

Erotuskohta mallinnettiin vastaavasti kuin tyyppitapauksissa yksivaiheisesti ohjattavana katkaisijana. Logiikan avulla voidaan valita kaikki mahdolliset avaus- ja sulkemiskombinaatiot. Oheisessa kuvassa 4.2 on esitetty tilanne JT erotuskohdassa kytkettäessä maakaapelia ja muuntajaa.



Kuva 4.2 Maakaapelin ja muuntajan vajaanapainen kytkentä kenttäkokeissa, kun muuntajaa syötetään maakaapelin yhdellä vaiheella.

4.3 Menetelmät ja tulosten esittäminen maakaapelin kytkennöissä

Maasulkusuojauksen havahtumisen kannalta keskeisin suure on vajaanapaisten kytkentöjen verkkoon synnyttämä nollajännite. Tämä nollajännite syntyy vajaanapaisten kytkennän verkkoon aiheuttaman kapasitiivisen epäsymmetrian seurauksena. Tämän epäsymmetrian suuruus määräytyy lähinnä kytkettävän JT kaapelin varausvirran perusteella. Syntyvän nollajännitteen suuruuteen vaikuttavat merkittävästi myös verkon käyttämädoitustapa ja verkon sähköinen laajuus. Sammutetussa verkossa nollajännitteen nousu on selvästi suurempaa maasta erotettuun verkkoon verrattuna. Nollajännitteen suuruuteen vaikuttavat myös verkon kompensointiaste ja lisäkuormitusvastuksen mitoitus ja käyttötapa.

Maakaapelin vajaanapaisissa kytkennöissä nollajännite on likimain samaa suuruusluokkaa yksi- ja kaksinapaisen kytkentätilanteen aikana. Tilanteessa, jossa ainoastaan kaapelin yksi vaihe on verkkoon kytkettynä, nollajännite nousee teoriassa hieman suuremmaksi, koska verkon kokonaismaakapasitanssi on silloin pienempi. Käytännössä ero on pieni, jos kaapelin kapasitanssi on pieni koko verkon maakapasitanssiin verrattuna. Vajaanapaisten kytkennän aiheuttama epäsymmetria ja nollajännite synnyttävät JT lähdölle myös summavirran, jota käytetään myös maasulkusuojauksessa.

Kun vajaanapaisesti kytkettävä verkon osa koostuu pelkästään maakaapelista, verkon nollajännite ja JT lähdön alkupäässä mitattava summavirta voidaan laskea yksinkertaisemmilla malleilla PSCAD simulointiin verrattuna, koska resonanssia tai muita merkittäviä muutoksiä ei esiinny. Tässä tutkimuksessa laskettiin verkon nollajännitteitä ja summavirtoja kaapelin vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä. Matlab ohjelmistolla laskettuja käyrästä verifioitiin myös PSCAD verkkomallin avulla määritellyissä tyyppitapauksissa. Sen sijaan kaapelin kapasitanssin ja muuntajan epälineaarisen tyhjäkäynti-induktanssin sarjaresonanssin mallintamiseen tarvittiin dynaaminen PSCAD verkkomalli.

Jotta voitaisiin arvioida, toimiiko JT lähdön maasulkusuojaus suunniteltavissa vajaanapaisissa kytkennöissä, pitää tuntea kytkettävän kaapelin varausvirtaa edustavan epäsymmetrian vaikutus verkon nollajännitteeseen ja JT lähdön summavirtaan. Tällöin nollajännitteelle voidaan laskea käyrästä vastaten tilannetta, jossa verkon kapasitiivinen epäsymmetria aiheutetaan

0,25 A – 1,5 A varausvirtaa edustavilla maakaapeleilla. Tällöin jokaista varausvirtaa edustavalle kaapelipituudelle lasketaan oma kuvaaja. Maasta erotetun tai sammutetun verkon nollajännite riippuu verkon sähköisestä laajuudesta eli verkon kokonaismaakapasitanssista. Siksi käyrästöt laskettiin verkon kapasitiivisen maasulkuvirran funktiona. Laskennassa verkon kapasitiivinen maasulkuvirta vaihteli välillä 50 – 300 A. JT kaapelin kapasitanssin tuottamina varausvirta-arvoina käytettiin 0,25 A, 0,5 A, 0,75 A, 1,0 A, 1,25 A ja 1,5 A. Käyrästön laskennassa käytettiin oheista kaavaa nollajännitteelle, joka vastaa myös luvussa 3 esitettyä nollajännitteen lauseketta 3.2. Maakapasitanssien rinnalle kytkettyjen vuotoresistanssien merkitys katsottiin vähäiseksi eikä niitä ole esitetty kaavassa. Kaavaa sovellettiin tilanteeseen, jossa ainoastaan erotuskohdan vaihe 1 on kiinni vastaten kuvan 4.2 mukaista tilannetta. Kapasitanssit C_{je1} , C_{je2} ja C_{je3} ovat JT maakaapelin vaiheiden maakapasitanssit ja \underline{a} on vaiheen-siirto-operaattori. Laskentajännitteenä käytettiin 20,6 kV.

$$\underline{U}_0 = \frac{-(j\omega(C_{1E}+C_{je1})+\underline{a}^2 \cdot j\omega C_{2E}+\underline{a} \cdot j\omega C_{3E})}{(1/(j\omega L_0)+(1/R_0)+j\omega(C_{1E}+C_{je1})+j\omega C_{2E}+j\omega C_{3E})} * U_{nom} \quad (4.1)$$

Kuvaajista voidaan arvioida, kuinka suuren nollajännitteen tietyn varausvirran omaava kaapeli aikaansaa tietyn laajuudessa (kapasitiivinen maasulkuvirta) verkossa. Nollajännitekäyrästöt laskettiin erikseen maasta erotetulle ja sammutetulle verkolle tyyppitapausten mukaisesti.

JT lähdön maasulkusuojauksen toimintaan vaikuttaa myös lähdön alkupäässä mitattava summavirta. Summavirta riippuu kyseisen lähdön sähköisestä pituudesta eli lähdön tuottamasta kapasitiivisesta maasulkuvirrasta, joka täytyy kiinnittää summavirtaa laskettaessa. Lähdön maasulkusuojaus perustuu maasta erotetussa tai osittain kompensoidussa verkossa normaalisti summavirran loiskikomponenttiin ja sammutetussa verkossa summavirran pätkökomponenttiin. Vanhemmat releet mittaavat summavirran itseisarvoa sekä summavirran ja nollajännitteen välistä vaihekulmaa. Tällöin vaihekulmakarakteristika on maasta erotetun verkon tapauksessa erilainen kuin sammutetussa verkossa [3]. Em. seikoista johtuen summavirralla ei voida piirtää yleispäteviä käyrästöjä toisin kuin verkon nollajännitteelle. Mikäli vajaanapaisten kytkennän aiheuttamaa lähdön summavirtaa halutaan arvioida laskennallisesti, se tulisi määrittää tapauskohtaisesti esim. luvussa 3 esitetyllä menetelmällä.

4.4 Vajaanapaisten kytkentöjen suunnittelu suojauksen kannalta

Vajaanapaisten kytkentöjen suunnittelussa tulisi arvioida voiko lähdön maasulkusuojaus toimia käytetyillä asetuksilla vajaanapaisten kytkentöjen seurauksena. Koska JT kytkentöjen tavoitteena on sähkön jakelukeskeytysten välttäminen, lähdön maasulkusuojaus ei saisi toimia. Seuraavassa on lueteltu vajaanapaisten kytkentätoimenpiteiden suunnittelussa tarvittavat tiedot.

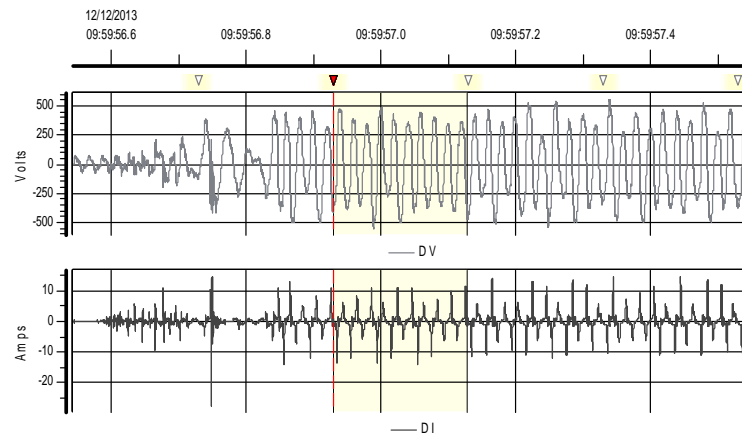
- Verkkotiedot
 - JT kaapelin varausvirta vaihetta kohti (verkkotietokanta / kaapelivalmistajan taulukko)
 - Koko verkon tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta
 - Verkon käyttömaadoitustapa
 - maasta erotettu
 - kompensoitu, kompensointiaste
 - Sammutetussa verkossa lisäkuormitusvastuksen käyttötapa ja mitoitus
 - JT lähdön tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta
- Suojauksen asetellut
 - JT lähdön maasulkusuojauksen nollajännitteen asetusarvot
 - JT lähdön maasulkusuojauksen summavirran asetusarvot
 - Sähköaseman varasuojauksen nollajännitteen asetusarvo
- Mittaukset
 - JT kytkentöjä edeltävän verkon normaalitilan nollajännite

4.5 PSCAD mallin evaluointi

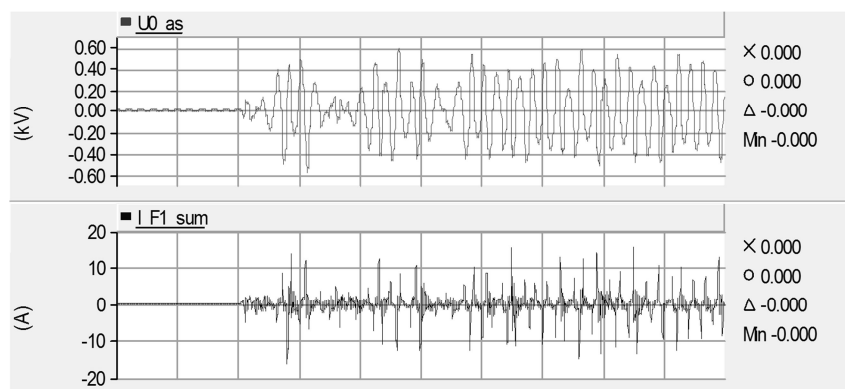
Tutkimuksessa mallinnettiin kohteen A mukainen verkko PSCAD ohjelmiston avulla. JT lähtö, jolla tehtiin kenttäkokeita kahteen otteeseen, mallinnettiin yksityiskohtaisesti. Kenttäkokeissa kytkettiin vajaanapaisesti 1,16 km AXAL-TT50 maakaapelia, jonka varausvirta vaihetta kohti oli noin 0,7 A. Kyseisen kaapelin kanssa kytkettiin myös 50 kVA kuormittamaton jakelumuuntaja. Maakaapelia ja jakelumuuntajaa kytkettäessä saattoi syntyä resonanssi kaapelin kapasitiivisen reaktanssin ja muuntajan epälineaarisen tyhjäkäyntireaktanssin välille erityisesti yhdellä vaiheella syötettäessä.

Tapaus: 1,16 km AXAL-TT 3x50/25 ja 50 kVA tyhjäkäyvä muuntaja, verkon kompensointiaste noin 30 %

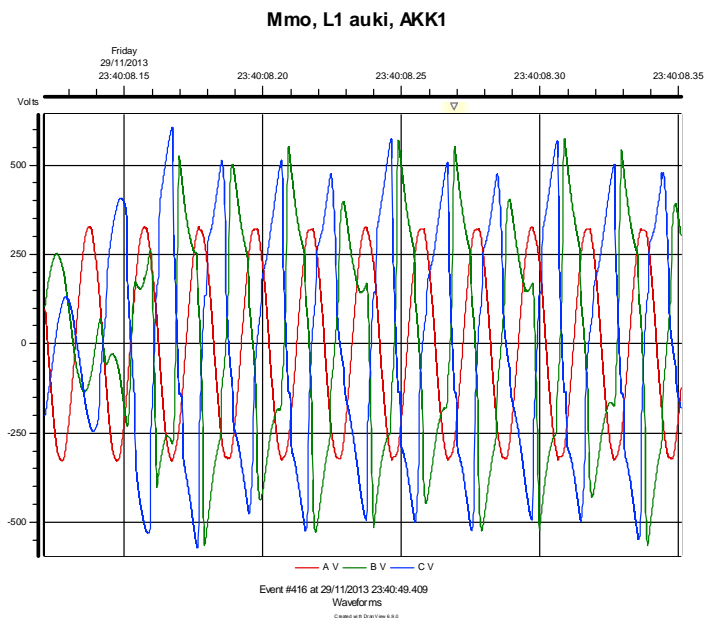
Kuvassa 4.3 on esitetty sähköasemalla mitattu verkon nollajännite ja JT lähdön summavirta, kun verkossa on pelkästään hajautettua kompensointia vastaten noin 30 % kokonaiskompensointiastetta. Kaksi alinta kuvaajaa edustavat vastaavien suureiden tehollisarvoja. Kuvassa 4.4 on vastaavat suureet simuloituina. Kuvassa 4.5 on esitetty jakelumuuntajan pienjännitepuolelta mitatut vaihejännitteet, kun yksi vaihe avataan ja kuvassa 4.6 on esitetty vastaavat simuloituvat jännitteet. Kuvassa 4.7 on esitetty jakelumuuntajan pienjännitepuolen mitatut vaihejännitteet, kun vaihe L3 suljetaan. Kuvassa 4.8 on esitetty vastaavat simuloituvat jännitteet. Kuvassa 4.9 on jakelumuuntajan pienjännitepuolelta mitatut vaihejännitteet, kun vaihe L2 suljetaan vaiheen L3 lisäksi ja kuvassa 4.10 on esitetty vastaavat simuloituvat jännitteet.



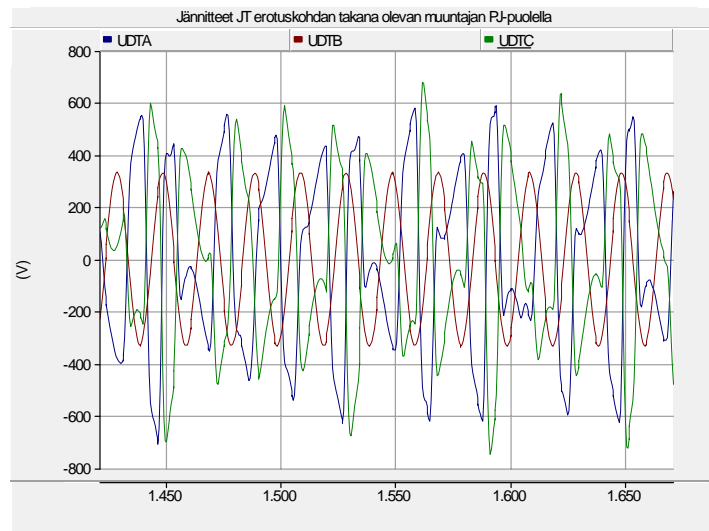
Kuva 4.3 Sähköasemalla mitattu nollijännite ja summavirta, kun yksi vaihe avataan.



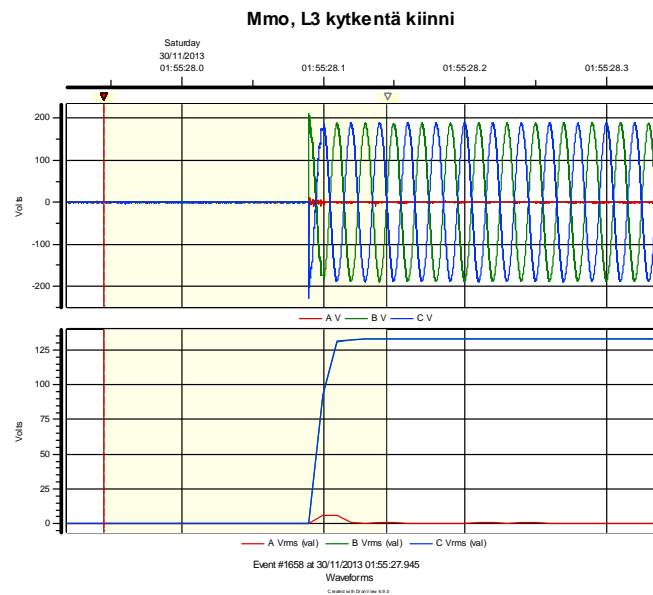
Kuva 4.4. Simuloitu nollijännite ja summavirta sähköasemalla, kun yksi vaihe avataan.



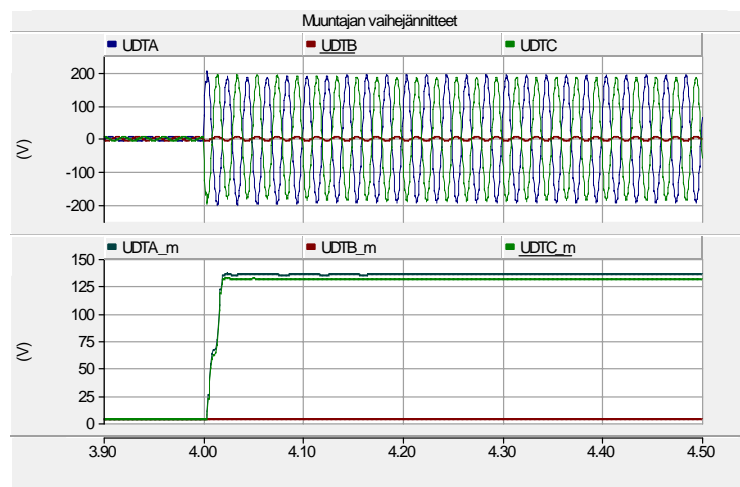
Kuva 4.5 Jakelumuuntajan pj puolelta mitatut vaihejännitteet, kun yksi vaihe avataan.



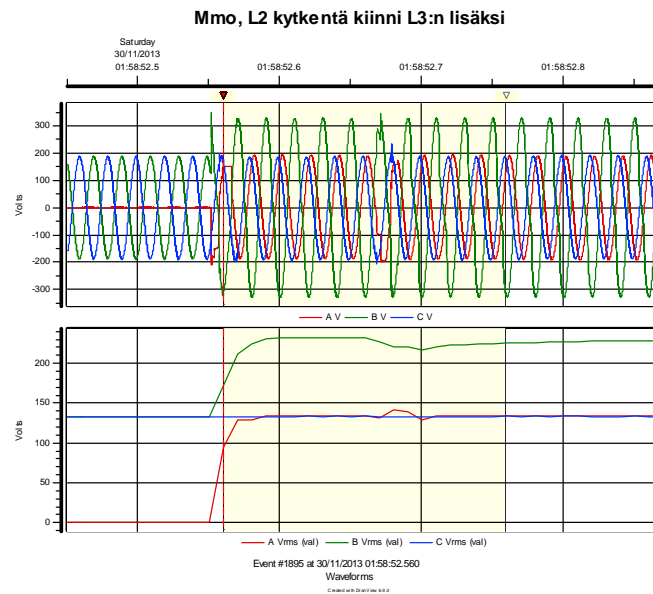
Kuva 4.6 Jakelumuuntajan pj puolen simuloituid vaihejännitteet, kun yksi vaihe avataan.



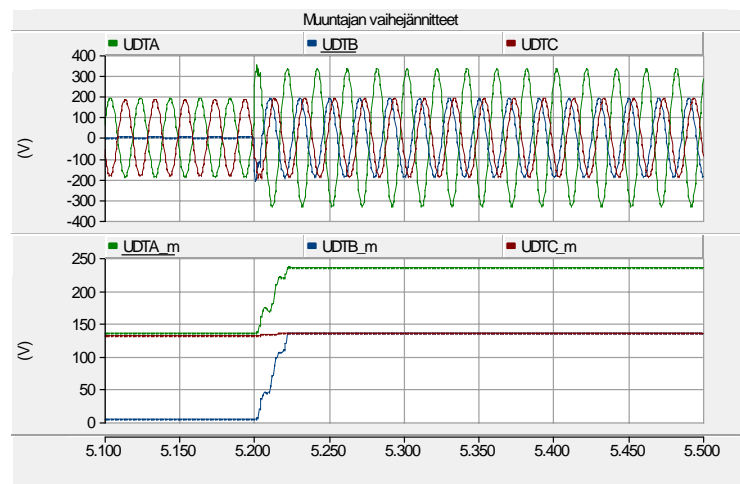
Kuva 4.7 Jakelumuuntajan pj puolen mitatut vaihejännitteet, kun vaihe L3 suljetaan.



Kuva 4.8 Jakelumuuntajan simuloituid pj puolen vaihejännitteet, kun vaihe L3 suljetaan.



Kuva 4.9 Jakelumuuntajan pj puolen mitatut vaihejännitteet, kun vaihe L2 suljetaan vaiheen L3 lisäksi.



Kuva 4.10 Jakelumuuntajan pj puolen simuloituid vaihejännitteet, kun vaihe L2 suljetaan L3:n lisäksi.

Johtopäätöksenä kohteessa A suoritettujen kenttämittausten ja vastaavien simulointitulosten vertailusta voidaan sanoa, että pelkän maakaapelin kytkennöissä simuloineilla saadaan riittävän hyvä kuva ilmiöiden suuruudesta, koska tilanteeseen ei liity resonanssia eikä muitakaan merkittäviä muutosilmiöitä. Siten pelkän maakaapelin kytkentöjen osalta verkon nolajännite ja JT lähdön summavirta voidaan laskea yksinkertaisemmilla malleilla ja laskentatyökaluilla.

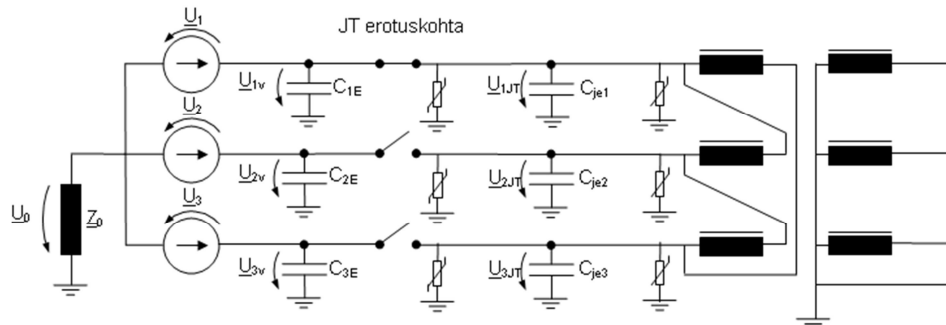
Ferroresonanssi-ilmion merkitys on turvallisuuden, maasulkusuojauksen toiminnan ja erotuskohdan takana esiintyvien ylijännitteiden kannalta keskeinen. Suojauksen toiminnan ja erotuskohdan takana esiintyvien ylijännitteiden osalta ilmiöiden suuruusluokista saadaan realistinen kuva simulointitulosten avulla. Sen sijaan resonanssin kesto aikaan on simuloimalla vaikea päästä kiinni, koska resonanssin päällä pysymiseen ja sammumiseen liittyy kenttäko-

keissa havaittua merkittävää satunnaisuutta. Resonanssin kestolla on vaikutusta mm. venttiilisuojiin kohdistuvan energiarasituksen kannalta.

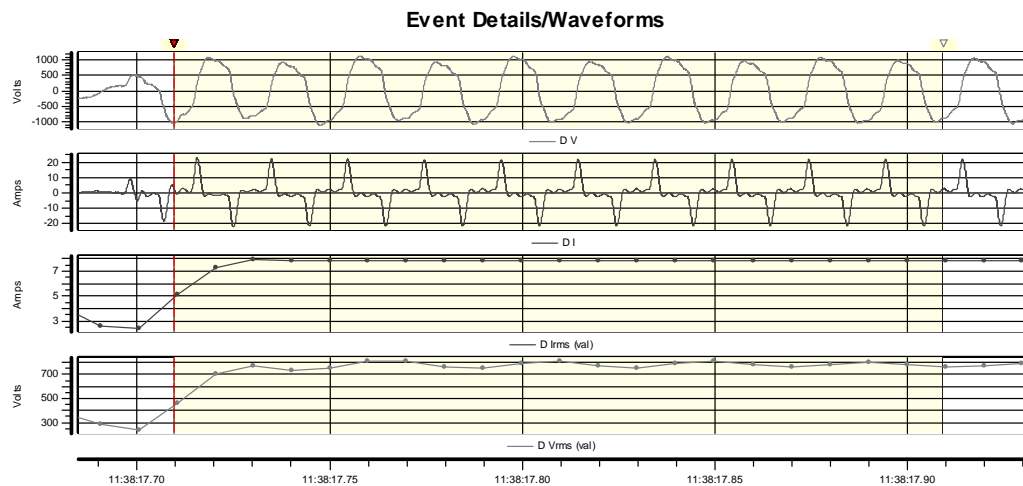
Kohteessa A kuvan 4.1 mukaisessa verkossa suoritettiin toiset kenttämittaukset vajaanapaisien kytkentöjen yhteydessä verkon ollessa osittain kompensoitu ja sammutettu. JT kohdan takana mitattiin vaiheen ja maan väliset jännitteet myös 20 kV puolelta. Kohteen A verkosta tehdyllä PSCAD mallilla saatuja simulointituloksia verrattiin vastaaviin kenttäkokeista saattuihin mittaustuloksiin. JT kytkentöjen kannalta keskeiset suureet ovat

- Vaihejännitteet ja virrat JT erotuskohtan takana
 - Venttiilisuojiin kohdistuvat ylijänniterasitukset resonanssitilanteessa
 - Varausvirran suuruus erotuskohtan takana
- Verkon nollajännite ja JT lähdön summavirta sähköasemalla
 - Lähdön maasulkusuojausten ja verkon varasuojauksen toiminta

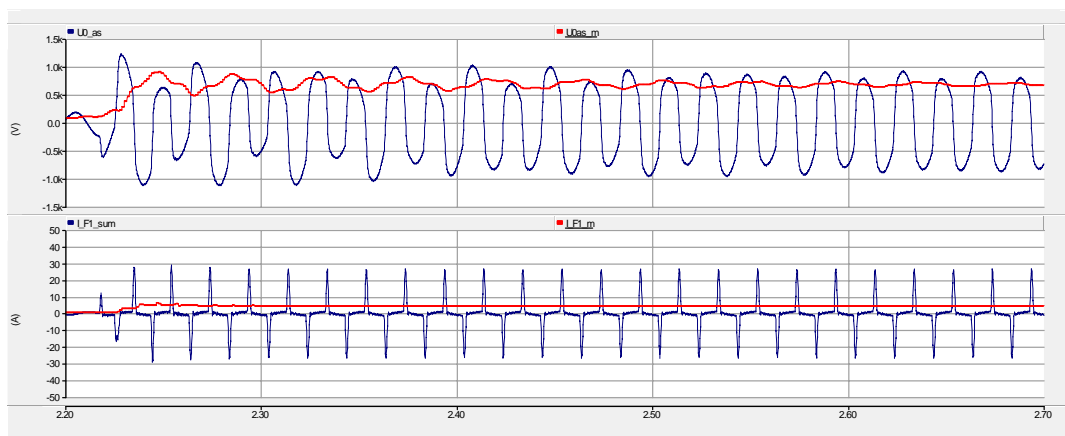
Kuvassa 4.11 on esitetty erotuskohtan tilanne kenttäkokeissa, jossa muuntajaa syötetään yhdellä vaiheella. Kuvasta poiketen maakaapelin alkupäässä oli koetilanteessa kahdet rinnakkaiset venttiilisuojat sekä muuntamon päässä yhdet. Kuvassa 4.12 on esitetty sähköasemalla mitattu verkon nollajännite ja JT lähdön summavirta osittain kompensoidussa verkossa kompensointiasteen ollessa noin 30 %. Kaksi alinta kuvaajaa edustavat vastaavien suureiden kokonaistehollisarvoja. Kuvassa 4.13 on esitetty vastaavat simuloidut suureet.



Kuva 4.11. JT kohdan komponentit kenttäkokeissa.

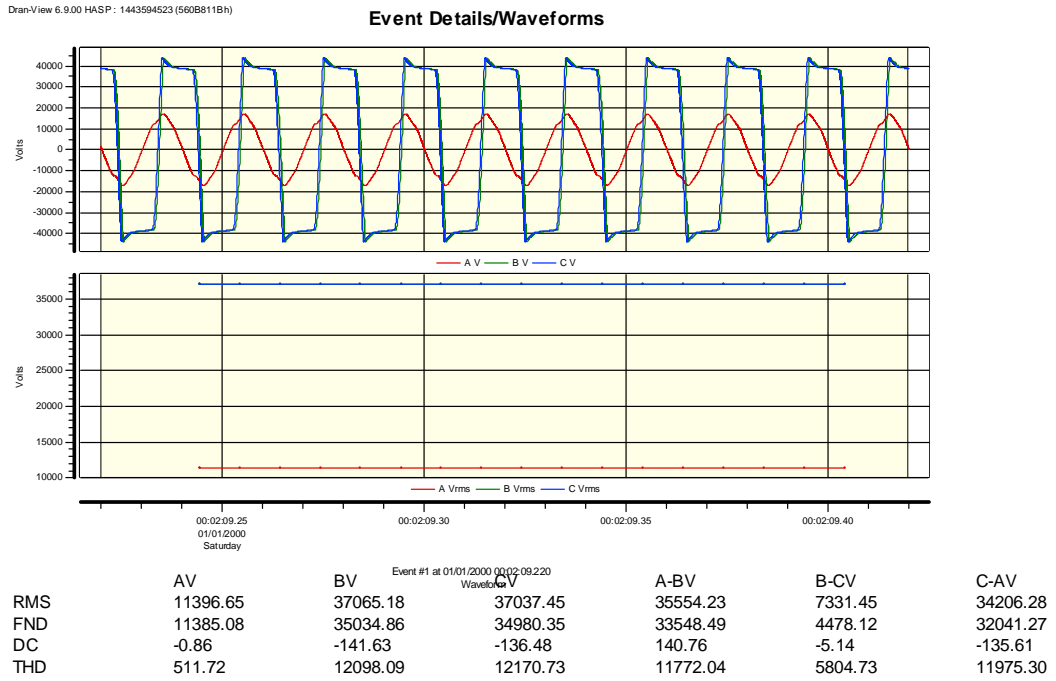


Kuva 4.12 Sähköasemalla mitattu nollajännite ja summavirta, kun muuntajaa syötetään yhdellä vaiheella.

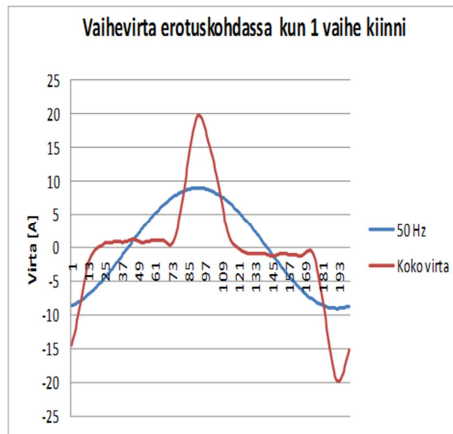


Kuva 4.13 Simuloitu nollajännite ja summavirta sähköasemalla, kun muuntajaa syötetään yhdellä vaiheella (punaiset kuvaajat ovat 50 Hz tehollisarvoja).

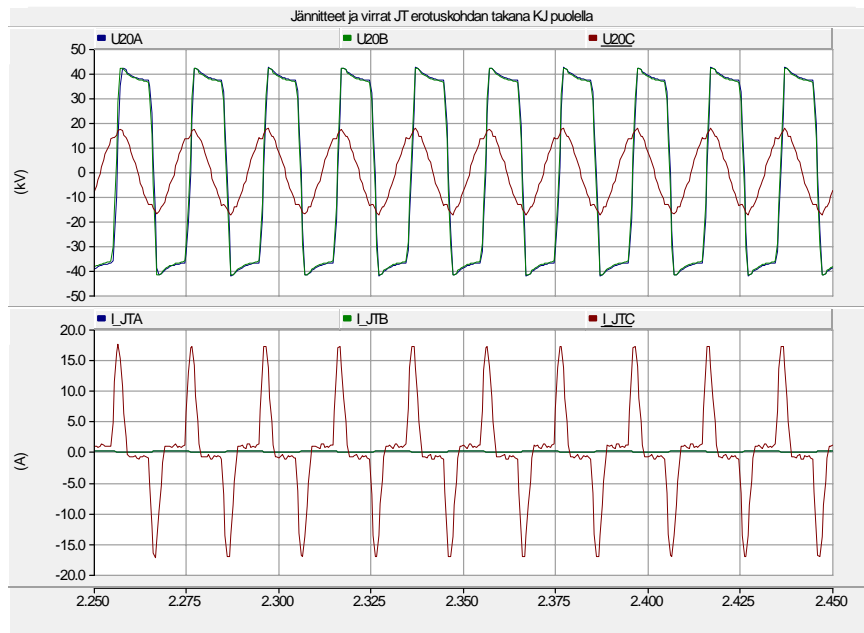
Kuvassa 4.14 on esitetty mitatut vaihejännitteet 20 kV puolella erotuskohdan takana, kun yksi vaihe on kiinni. Kuvassa 4.15 on esitetty 20 kV puolelta erotuskohdasta mitatun vaihevirran käyrämuoto, kun yksi vaihe on kiinni. Kuvassa 4.16 on esitetty simuloitua vaihejännitteitä ja vaihevirrat erotuskohdassa, kun yksi vaihe on kiinni.



Kuva 4.14 Mitatut vaihejännitteet 20 kV puolella erotuskohdan takana, kun yksi vaihe on kiinni.



Kuva 4.15 Mitattu vaihevirta 20 kV puolella erotuskohdassa, kun yksi vaihe on kiinni.



Kuva 4.16 Simuloidut vaihejännitteet ja vaihevirrat 20 kV puolella erotuskohdan takana.

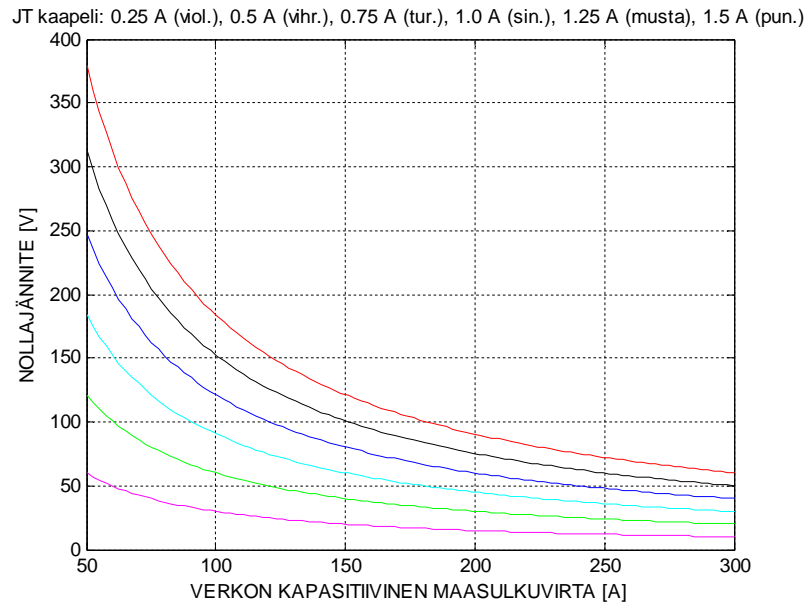
Vajaanapaisten kytkentöjen suunnittelun kannalta keskeisten suureiden osalta simuloimalla saadaan kuva ilmiöiden suuruusluokista. Erotuskohdan takana resonanssin aikana esiintyvien vaihejännitteiden suuruuteen vaikuttavat myös venttiilisuojat ja niiden mitoitus (kuva 4.11). Vaihejännitteiden 50 Hz tehollisarvot olivat 35 kV luokkaa. Ilman venttiilisuojiin vaikutusta vaihejännitteet nousisivat resonanssitilanteessa vieläkin korkeammiksi. Maakaapelin ja muuntajan resonanssitilanteessa erotuskohdan takana kulkeva varausvirta ja verkon nollajännite vahvistuvat moninkertaisiksi pelkän kaapelin kytkentään verrattuna.

4.6 Simulointi ja laskentatuloksia – maakaapelin kytkeminen

Kytettäessä pelkkää maakaapelia vajaanapaisesti verkon nollajännite ja JT lähdön summavirta voidaan laskea yksinkertaisemmalla laskentamallilla Matlab ohjelmistolla. Laskentamallilla määritettiin verkon nollajännitteet maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa symmetrisessä lähtötilanteessa verkon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran funktiona. Kukin käyrä vastaa tiettyä kaapelin varausvirtaa. Tarkastellut varausvirrat olivat 0,25 A, 0,5 A, 1,0 A, 1,25 A ja 1,5 A.

4.6.1 Maasta erotettu verkko

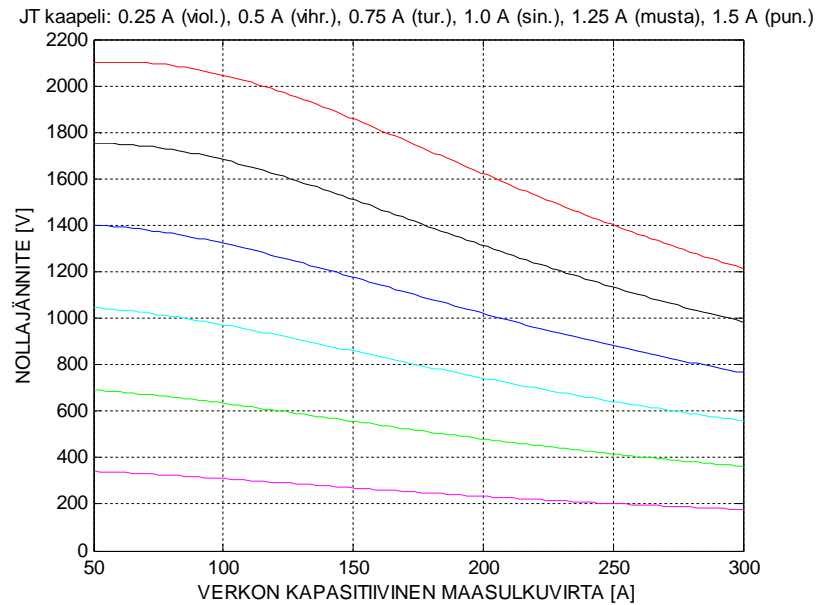
Maasta erotetun verkon nollajännite voidaan esittää 0,25 A – 1,5 A varausvirtoja edustavilla kaapelipituuksilla verkon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran funktiona seuraavan käyrästä (kuva 4.17) avulla. Käyrästä on laskettu tilanteessa, jossa JT kaapelin kaksi vaihtoa ovat auki. Verkon normaalitilan nollajännite on oletettu nolaksi eli verkko on lähtötilanteessa symmetrinen. Normaalitilan nollajännitteen vaikutus tulee arvioida erikseen.



Kuva 4.17 Maasta erotetun verkon nollajännite JT kaapelin varausvirroilla 0,25 – 1,5 A

4.6.2 Sammutettu verkko

Sammutetun verkon nollajännite voidaan esittää 0,25 A – 1,5 A varausvirtoja edustavilla kaapelipituuksilla verkon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran funktiona kuvassa 4.18 esitetyn käyrästä avulla. Kompensoidun verkon nollajännitteen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi verkon kompensointiaste ja kompensointikuristimen rinnalle kytkeytyvä lisäkuormitusvastus. Kuvan 4.18 käyrästä on laskettu 95 % kompensointiasteella ja 2,5 Ω (500 V) lisäkuormitusvastus ollessa kytkettynä verkon tähtipisteeseen. Kompensointiaste määritettiin ilman JT kaapelia. Jos kaapelia ollaan erottamassa verkosta vajaanapaaisesti, kompensointiasteessa on mukana myös JT kaapelin osuus. Verkon normaalitilan nollajännite on oletettu nolaksi eli verkko on lähtötilanteessa symmetrinen. Käytännössä sammutetun verkon nollajännite verkon normaalitilassa voi olla merkittävä ja siksi sen vaikutus vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä tulisi arvioida erikseen.



Kuva 4.18 Sammutetun verkon nollajännite JT kaapelin varausvirroilla 0,25 – 1,5 A

4.6.3 Käyrästöjen tulkitseminen ja normaalitilan nollajännitteen vaikutus

Kun keskijänniteverkon tuottama kapasitiivinen kokonaismaasulkuvirta vajaanapaisten kytkentöjen aikaisessa kytkentätilanteessa ja JT kaapelin varausvirta vaihetta kohti tunnetaan, käyrästöistä voidaan arvioida, kuinka suuren nollajännitteen JT kaapelin vajaanapainen kytkeminen aiheuttaa kyseisessä verkossa. Nollajännitekäyrästöt mahdollistavat siis vajaanapaisten kytkentöjen aikana esiintyvän nollajännitteen arvioimisen etukäteen pelkkää kaapelia kytkettäessä, jolloin ei synny resonanssia. Verkon nollajännite vajaanapaisia kytkentöjä edeltävässä ns. verkon normaalissa tilassa voi olla merkittävä erityisesti sammutetussa verkossa. Normaalitilan nollajännite aiheutuu verkon luontaisesta epäsymmetriasta ja riippuu verkon käyttömaadoitustavasta, kompensointiasteesta ja käytettävästä lisäkuormitusvastuksesta sekä sen käyttötavasta. Verkon luontaisesta epäsymmetriasta aiheutuva nollajännite summautuu JT kytkennän aiheuttamaan nollajännitteeseen ja sen vaikutus tulisi arvioida erikseen. Koska verkon normaalitilan nollajännitteen vaihekulmaa ei tiedetä, sen summautumista vajaanapaisesta kytkennästä aiheutuvaan nollajännitteeseen ei voida laskea etukäteen. Pahimmassa tapauksessa verkon normaalitilan nollajännite summautuu suoraan vajaanapaisen kytkennän aiheuttaman nollajännitteeseen. Joissain tapauksissa verkon normaalitilan epäsymmetria ja JT kytkennän aiheuttama epäsymmetria voivat myös osittain kompensoida toisiaan.

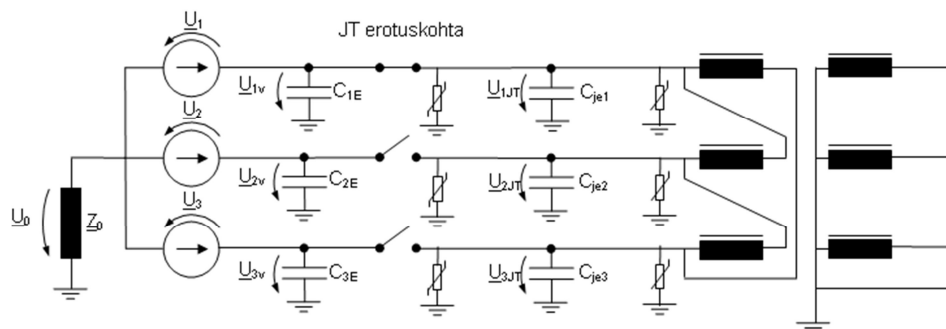
Käyrästöistä luettua nollajännitettä normaalitilan nollajännitteen vaikutus huomioiden verrataan lähdön maasulkusuojauksen nollajänniteasetteluihin sekä verkon nollajännitteeseen perustuvan varasuojauksen asetusarvoon. Mikäli verkon kompensointiaste, lisäkuormitusvastus ja/tai sen käyttötapa poikkeavat kuvan 4.18 käyrästön laskennassa käytetyistä arvoista, nollajännite tulisi laskea tapauskohtaisesti erikseen.

JT lähdön alkupäässä sähköasemalla mitattavan summavirran suuruuteen vaikuttaa myös ko. lähdön kokonaismaakapasitanssi, joka joudutaan kiinnittämään laskennassa. Lisäksi lähdön maasulkusuojaus voi perustua summavirran itseisarvoon sekä summavirran ja nollajännitteen väliseen vaihekulmaan, summavirran loiskomponenttiin tai summavirran pätökomponenttiin. Summavirralla ei voida siis esittää yleispätevää käyrästä vaan summavirta joudutaan laskemaan yleensä tapauskohtaisesti, mikäli sitä halutaan arvioida ennen JT kytkentöjä. Normaalisti maasulkusuojausten mahdollista havahtumista suunniteltavan JT kytkennän seurauksena on helpompi arvioida pelkän nollajännitteen avulla. Turvallisen toiminnan kannalta tulee huolehtia kosketusjännitevaatimusten toteutumisesta ja maasulkusuojausten riittävästä herkkyydestä [4].

4.7 Tuloksia – maakaapelin ja jakelumuuntajan kytkeminen

4.7.1 Maakaapelin ja kuormittamattoman jakelumuuntajan kytkeminen

Kun maakaapeliosuus ja sen perään kytketty kuormittamaton jakelumuuntaja kytketään verkkoon tai erotetaan verkosta vajaanapaisesti, kaapelin kapasitanssin ja muuntajan epälineaarisen tyhjäkäynti-induktanssin välille voi syntyä sarjaresonanssi, jota kutsutaan myös ferroresonanssiksi. Ferroresonanssiin liittyvää teoriaa on esitelty mm. viitteessä [5]. Syötettäessä jakelumuuntajaa yhdellä vaiheella maakaapelin kahden avoimena olevan vaiheen maakapasitanssit kytkeytyvät sarjaan jakelumuuntajan epälineaaristen tyhjäkäynti-induktanssien kanssa kuvan 4.19 mukaisesti. Erotuskohdassa, missä kytkettävä maakaapeli liittyy kaapeli päätteen kautta avojohtoon, on normaalisti vaiheen ja maan välille kytketyt venttiilisuojat. Niiden tehtävänä on suojata maakaapelia ylijännitteiltä. Myös jakelumuuntamolla on normaalisti venttiilisuojat. Venttiilisuojat kytkeytyvät avoimena olevien vaiheiden maakapasitanssien rinnalle. Resonanssitilanteessa ylijännitesuojat rajoittavat vaihejännitteiden nousua erotuskohdan takana.



Kuva 4.19. Kaapelin ja jakelumuuntajan vajaanapainen kytkentä, kun kaksi vaihetta on auki.

Maakaapelin maakapasitanssien ja jakelumuuntajan tyhjäkäynti-induktanssin välinen sarjaresonanssi on mahdollinen, koska muuntajan tyhjäkäyntireaktanssi on hyvin epälineaarinen muuntajan nimellisjännitteen ja tyhjäkäyntikäyrän käännepisteen välisellä alueella. Tämä saattaa johtaa ferroresonanssiin kun kaapelin maakapasitanssin edustama reaktanssi saa saman arvon muuntajan tyhjäkäyntireaktanssin kanssa.

Maakaapelin ja jakelumuuntajan vajaanapaisia kytkentöjä tarkasteltiin PSCAD ohjelmiston avulla edellä määritellyissä tyyppitapauksissa suoritettujen simulointien avulla. Kenttäkokeita tehtiin Elenia Oy:n verkossa sekä Sallila Sähkönsiirto Oy:n verkossa Punkalaitumella.

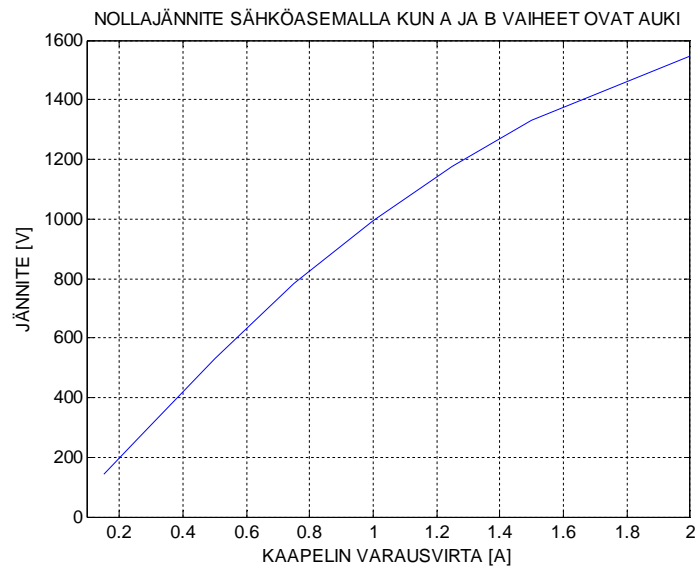
- Kohde A: 1,16 km AXAL TT50 (varausvirta noin 0,7 A) ja 50 kVA jakelumuuntaja
- Kohde B: 0,81 km AHXAMK-W 3*70Al (varausvirta noin 0,6 A) ja 100 kVA jakelumuuntaja.

Suoritettujen kenttäkokeiden ja määritellyissä tyyppitapauksissa tehtyjen simulointien perusteella JT kaapelin ja jakelumuuntajan sarjaresonanssi näyttäisi mahdolliselta tarkastelluilla 50 kVA ja 100 kVA muuntajilla. PSCAD malli verifioitiin kenttämittausten avulla. Tässä yhteydessä on syytä kuitenkin muistaa kohdassa 4.2.1 mainitut epävarmuustekijät muuntajan tyhjäkäyntiominaisuuksien mallintamisen osalta. Vajaanapaisten JT kytkentöjen kannalta keskeiset suureet ovat

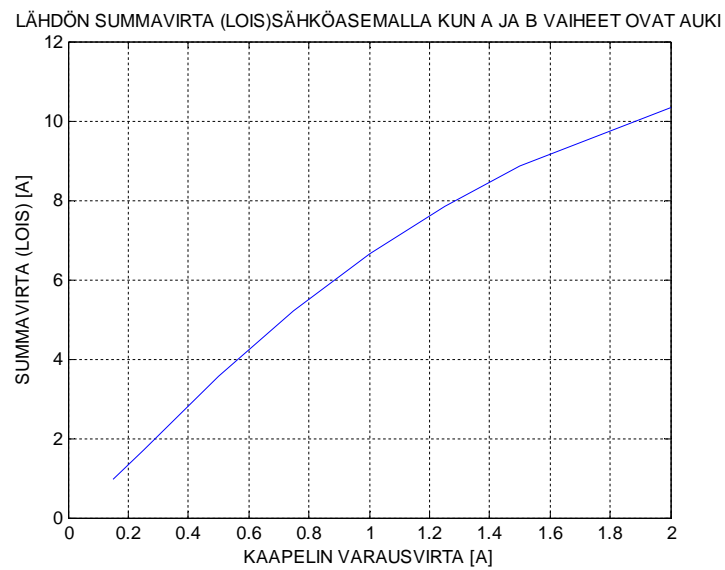
- vaihejännitteet ja virrat JT erotuskohdan takana 20 kV puolella ja
- verkon nollajännite ja JT lähdön summavirta sähköasemalla.

Verifiointien perusteella vajaanapaisten kytkentöjen kannalta keskeisiä suureita voidaan arvioida simuloimalla ottaen kuitenkin huomioon ferresonanssi-ilmiöön liittyvä satunnaisuus (mm. resonanssin kesto) ja komponenttimalleihin, erityisesti epälineaarisiin komponentteihin (jakelumuuntaja ja ylijännitesuojat) liittyvät epävarmuustekijät. Resonanssitilanteessa vajaanapaisten kytkentöjen kannalta keskeinen suure, kiinni olevan vaiheen varausvirta, voi nousta moninkertaisiksi normaalitilaan verrattuna. Koko verkon epäsymmetria ja sitä kuvaava nollajännite nousevat suunnilleen samassa suhteessa, mikä johtaa helposti lähdön maasulkusuojauksen toimimiseen ja siten jakelukeskeytykseen. Seuraavassa tarkastelussa ja esityksissä kuvaajissa rajoituttiin jännitteiden ja virtojen 50 Hz komponentteihin, jotka ovat olennaisimpia suojauksen toiminnan kannalta. Sähköasemalla mitattavissa nollajännitteessä ja lähdön summavirrassa on muitakin taajuuksia, mikä näkyy esimerkiksi kuvassa 4.12. Erotuskohdan takana esiintyvissä ylijännitteissä ja erotuskohdassa kulkevassa varausvirrassa on resonanssitilanteessa myös muita taajuuksia, jotka vaikuttavat mm. ylijännitesuojiin kohdistuviin rasituksiin ja erotuskohdassa katkaistavan virran suuruuteen (ks. kuvat 4.14 ja 4.15).

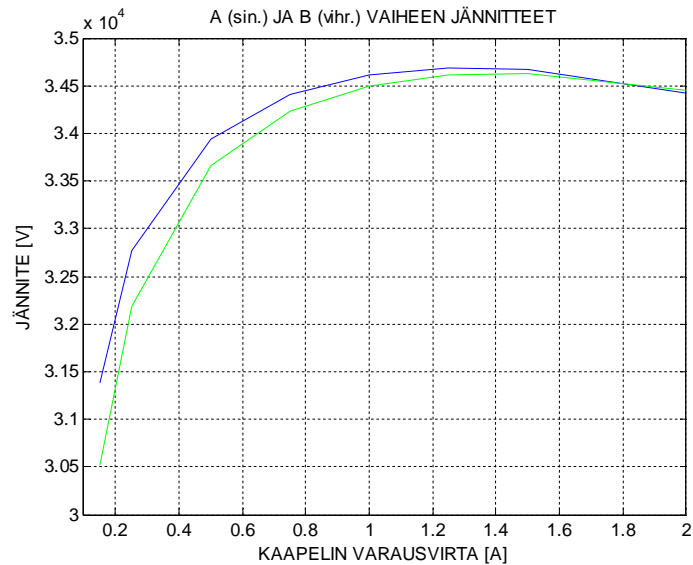
Seuraavassa kuvassa 4.20 on esitetty simulointeihin perustuva verkon nollajännitteen 50 Hz tehollisarvo maasta erotetussa verkossa kaapelin normaalitilan varausvirran funktiona, kun JT kaapelin ja jakelumuuntajan välille syntyy sarjaresonanssi. Verkon kapasitiivinen maasulkuvirta oli 100 A ja verkko oli lähtötilanteessa symmetrinen. Kuvassa 4.21 on esitetty vastaava kuvaaja JT lähdön summavirralla vastaavassa tyyppitapauksessa, jossa maasta erotetun verkon maasulkuvirta oli 100 A ja lähdön kapasitiivinen maasulkuvirta oli 20 % verkon maasulkuvirrasta. Kuvassa 4.22 on esitetty auki olevien vaiheiden jännitteiden 50 Hz tehollisarvot maasta erotetussa verkossa, kun muuntajaa syötetään yhdellä vaiheella resonanssitilanteessa. Jännitteisiin vaikuttavat myös maakaapelin ja jakelumuuntajan suojana olevat venttiilisuojat ja niiden mitoitus.



Kuva 4.20 Simuloitu verkon nollijännitteen tehollisarvo (50 Hz) resonanssitilanteessa.



Kuva 4.21 Simuloitu JT lähdön summavirran tehollisarvo (50 Hz) resonanssitilanteessa, kun lähdön kapasitiivinen maasulkuvirta on 20 % verkon kapasitiivisesta maasulkuvirrasta.



Kuva 4.22 Simuloidut auki olevien vaiheiden jännitteiden tehollisarvot (50 Hz) erotuskohdan takana resonanssitilanteessa.

4.7.2 Maakaapelin ja jakelumuuntajan resonanssiin liittyvät riskit

Maakaapelin varausvirta vahvistuu moninkertaiseksi sen normaalitilan varausvirtaan verrattuna maakaapelin ja jakelumuuntajan ferroresonanssitilanteessa. Verkon nolajännite, joka on verrannollinen vajaanapaisten kytkennän aiheuttamaan epäsymmetriaan, vahvistuu suunnilleen samassa suhteessa, mikä saattaa aiheuttaa lähdön maasulkusuojauksen toiminnan. Lähdön maasulkusuojauksen toiminnan ehtona on myös summavirta-asettelu. Avojohtoon liittyvän maakaapeliosuuden ylijännitesuojina käytetään venttiilisuojia. Myös kytkettävän muuntajan suojana ovat usein venttiilisuojat. Erotuskohdan takana olevat venttiilisuojat altistuvat kohonneille vaihejännitteille resonanssitilanteessa. Suoritettujen kenttäkokeiden ja simulointien perusteella erotuskohdan takana esiintyvät vaihejännitteet voivat resonanssitilanteessa olla kokonaistehollisarvoltaan suuruusluokkaa 30 – 37 kV ja huippuarvoltaan runsaan 40 kV suuruusluokkaa. Kyseiset vaihejännitteet riippuvat myös venttiilisuojien mitoituksesta, koska suojat rajoittavat resonanssitilanteessa esiintyviä ylijännitteitä. Venttiilisuojan mahdollinen terminen ylikuormittuminen johtaa suojan vaurioitumiseen ja maasulkuun, mistä seuraa JT lähdölle maasulkulaukaisu ja käyttökeskeytys asiakkaille. Mikäli vajaanapaistenkytkentöjen seurauksena syntyy resonanssi kahden vaiheen ollessa auki, kahden avoinna olevan vaiheen suojat altistuvat esiintyville ylijännitteille. Resonanssi voi syntyä myös yhden vaiheen ollessa auki.

4.7.3 Muuntajan resistiivisen kuorman vaikutus

Tehtyjen kenttäkokeiden ja simulointien perusteella näyttäisi, että maakaapelin maakaapasitanssin ja jakelumuuntajan tyhjäkäynti-induktanssin väliseen ferroresonanssiin voidaan jossain määrin vaikuttaa muuntajan resistiivisen kuormituksen avulla. Koska asiakkaiden

kuormitukset ovat irti JT kytkentöjen aikana, jakelumuuntajan pienjännitepuolelle joudutaan kytkemään ulkoinen resistiivinen kuormitus tätä tarkoitusta varten. Tehtyjen kenttäkokeiden ja simulointien perusteella resonanssin vaimentamiseen tarvittavan vastuskuorman suuruuteen vaikuttavat mm.

- Jakelumuuntajan nimellisteho
 - Yksittäisten muuntajien ominaisuuksien yksilökohtainen vaihtelu, joka voi olla tyhjäkäyntikäyrän nimellispisteen ympärillä suuri (toleranssi standardissa 30 %)
 - Hajonta eri valmistajien muuntajien välillä
 - Uuden EcoDesign-direktiivin mukaisten muuntajien tyhjäkäyntiominaisuudet tulevat poikkeamaan vanhoista muuntajista (erilaiset tyhjäkäyntikäyrät)
- JT maakaapelin varausvirta (kaapelin poikkipinta, tyyppi ja pituus)
- Verkon sähköinen laajuus ja käyttömaadoitustapa

Resonanssin vaimenemiseen resistiivisen kuorman avulla vaikuttavat siis useat eri tekijät. Siksi tyyppitapauksissa tehdyillä simuloinneilla ei voida saada yleispäteviä tuloksia. Kenttäkokeissa havaittiin, että maasta erotetussa verkossa noin 20 % (suhteessa muuntajan nimellistehoon) vastuskuormalla resonanssia ei esiintynyt 50 kVA muuntajalla osittain kompensoidussa verkossa, kun JT maakaapelin varausvirta oli noin 0,7 A. Toisissa kenttäkokeissa resonanssia ei esiintynyt 100 kVA muuntajalla 12,5 kW kuormalla maasta erotetussa verkossa, kun JT maakaapelin varausvirta oli noin 0,6 A. Kyseisiä kenttäkokeita vastaavien tilanteiden simuloinneissa tulokset olivat samansuuntaiset. Kun muuntajan kanssa vajaanapaisesti kytkettävän maakaapelin varausvirta kasvaa, myös resonanssin vaimentamiseen tarvittavan vastuskuorman suuruus näyttäisi simulointien perusteella kasvavan. Tätä ei voitu varmistaa kenttäkokeiden avulla, koska kaapelin pituutta ei ollut mahdollisuutta muuttaa. Muuntajan tyhjäkäyntiominaisuuksissa tapahtuvat muutokset (toleranssit) vaikuttavat resonanssin syntyymiseen myös lisäkuormitusta käytettäessä.

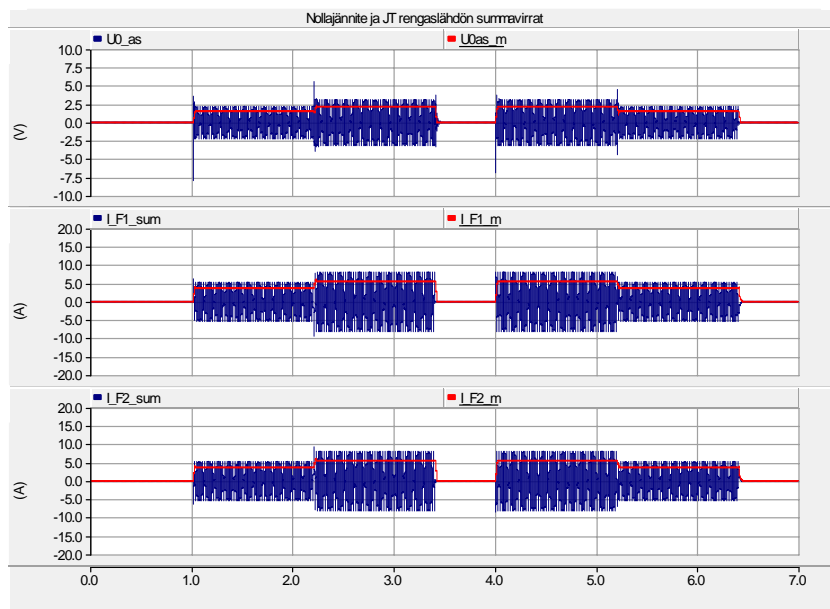
Mallinnuksen lähtötietoihin liittyvistä epävarmuustekijöistä ja kenttäkokeiden vähäisistä variointimahdollisuuksista (mm. JT kaapelin varausvirta) johtuen tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat ainoastaan suuntaa antavia eikä niitä voida pitää suosituksina. Resisttiivisen kuorman mitoituksen kannalta kenttäkokeet ovat olennaisimmat. Koska resonanssin vaimenemiseen vaikuttaa käytetyn vastuskuorman lisäksi muutkin tekijät ja lisäksi ilmiöön liittyy myös satunnaisuutta, asian tarkempi selvittämien edellyttäisi laajempien kenttäkokeiden suorittamista.

4.8 Samalta sähköasemalta syötetyn rengaslähdön vajaanapainen kytkeminen tai avaaminen

Vajaanapaiset kytkennät keskijänniteverkon rengaskytkentöjen yhteydessä oli rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle eikä kenttäkokeita rengaskytkentöihin liittyen tehty. Tutkimuksessa käsiteltiin hyvin suppeasti samalta sähköasemalta syötettyjen kahden lähdön muodostaman

renkaan runkojohdon vajaanapaisia kytkentöjä. Tältä osin rajoituttiin esimerkinomaiseen simulointitarkasteluun, jossa vajaanapainen kytkentä tehdään renkaan runkojohdolla.

Kun molemmat renkaan muodostavat lähdöt syötetään samalla päämuuntajalla, verkon kokonaismakapasitanssi ei muutu renkaan runkojohdon vajaanapaisessa kytkentätilanteessa. Kuormitus- ja varausvirrat jakautuvat vajaanapaisen kytkentätilanteen seurauksena uudella tavalla. Runkojohdolla tehtävistä kytkennöistä ei aiheudu normaalisti merkittävää kapasitiivista epäsymmetriaa. Riippuen mm. erotuskohdan sijainnista, renkaan koostumuksesta (johdinlajit ja impedanssit), kuormitusten suuruudesta ja jakautumisesta renkaan varrelle lähtöjen alussa mitattavat vaihevirit ovat epäsymmetriset renkaan vajaanapaisessa kytkentätilanteessa. Renkaassa voi kiertää vajaanapaisessa kytkentätilanteessa myös summavirtaa vaihevirtojen epäsymmetrian seurauksena. Maasulkusuojauksen toiminnan ehtona on yleensä, että verkon nollajännite ylittää tietyn asetusarvon. Erotuskohdassa kulkee kuormavirtaa lähdön kuormituksen ja kuormitusten jakautumisen määräämällä tavalla. Avausväliin muodostuva jännite määräytyy lähinnä rengaslähtöjen erilaisten jännitehäviöiden perusteella, mikä tekee katkaisutapahtumasta helpomman säteittäisen johtohaaran vajaanapaiseen erottamiseen verrattuna. Seuraavassa kuvassa 4.23 on esitetty esimerkki verkon nollajännitteestä ja renkaaksi kytkettyjen lähtöjen summavirroista sähköasemalla esimerkkitalanteessa, kun renkaan runkojohto avataan vaihe kerrallaan ja sen jälkeen suljetaan vaihe kerrallaan vajaanapaisesti. Renkaan koostumuksesta ja pituudesta, JT erotuskohdan sijainnista, kuormituksista, kuormitusten jakautumisesta, taustaverkon laajuudesta, verkon käyttömaadoitustavasta yms. tekijöistä riippuen tilanne voi olla hyvin erilainen kuin oheisessa esimerkkitalanteessa.



Kuva 4.23 Nollajännite ja summavirrat esimerkkitalauksessa, kun rengas avataan ja suljetaan vajaanapaisesti vaihe kerrallaan.

5. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa selvitettiin keskijänniteverkon vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä esiintyviä sähköisiä ilmiöitä, jotka ovat keskeisiä turvallisuuden, verkkokomponentteihin kohdistuvien ylijänniterasitusten ja verkon suojauksen toiminnan kannalta. Verkon suojauksen kannalta on tärkeää, että vajaanapaisten kytkentöjen yhteydessä voitaisiin toimia turvallisesti, mutta turhilta käyttökeskeytyksiltä voitaisiin kuitenkin välttyä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää keskijänniteverkon vajaanapaisissa kytkentätilanteissa esiintyviä sähköisiä ilmiöitä. Päähuomio kohdistui pelkän maakaapelin sekä maakaapelin ja jakelumuuntajan samanaikaiseen kytkemiseen.

Kytettäessä vajaanapaisesti pelkkää maakaapelia, maasulkusuojauksen kannalta keskeisten suureiden, nollajännitteen ja summavirran suuruutta voidaan arvioida kohtuullisen hyvin raportissa esitettyjen menetelmien avulla.

Maakaapelin ja jakelumuuntajan muodostaman ns. ferroresonanssin seurauksena syntyvät ilmiöt ja niiden suuruusluokat selvitettiin kenttäkokeiden ja PSCAD simulointien avulla. Resonanssin seurauksena vaihejännitteet erotuskohdan takana voivat nousta korkeiksi. Kaapelin ja tyhjäkävän muuntajan kytkeminen osoittautui sekä kenttäkokeissa että suoritetuissa simuloinneissa ongelmalliseksi, koska resonanssi näytti olevan mahdollinen varsin laajalla maakaapelin varausvirta-alueella tarkastelluilla jakelumuuntajilla.

Kenttäkokeissa maakaapelin ja muuntajan sarjaresonanssi poistui joissakin kytkentätilanteissa tietynsuuruisen ulkoisen vastuskuorman avulla. Resistiivisen kuormituksen mitoittamiseen resonanssin vaimenemisen kannalta vaikuttavat monet tekijät ja lisäksi resonanssi-ilmiöön liittyy satunnaisuutta. Siksi ulkoisen resistiivisen kuorman yleisempi mitoittaminen edellyttäisi laajempia kenttäkokeita. Nyt tehdyt kenttäkokeet antavat suuntaa antavia referenssiarvoja jatkoa ajatellen.

Lähdeluettelo

- [1] Silvast A., Heine P., Lehtonen M., Kivikko K., Mäkinen A., Järventausta P. Sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuva haitta. Teknillinen korkeakoulu & Tampereen teknillinen yliopisto, Joulukuu 2005, 175 s.
- [2] Lakervi E. ja Partanen J. Sähkönjakelutekniikka. Otatieto, Helsinki, 2008, 285s.
- [3] Mörsky, J. Relesuojaustekniikka. Otatieto, Hämeenlinna, 1992, 459 s.
- [4] Suurjännitesähköasennukset (High-voltage electrical installations), SFS 6001, Suomen Sähköteknillinen Standardoimisyhdistys SESKO, vahvistettu 23.4.2001, 118 s.
- [5] Aro M., Elovaara J., Karttunen M., Nousiainen K. ja Palva V. Suurjänniteneikka. Otatieto Oy, Jyväskylä, 2003, 520 s.

Tampereen teknillinen yliopisto
PL 692
33101 Tampere

Tampere University of Technology
P.O. box 692
FI-33101 Tampere, Finland