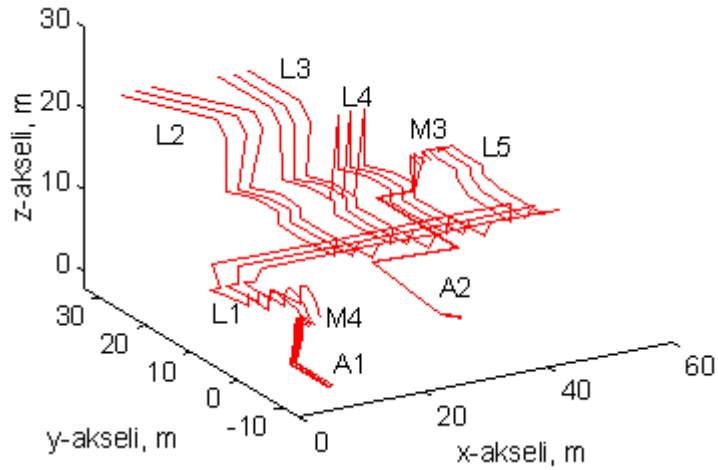


Pientaajuisten magneettikenttähäiriöiden pienentämismenetelmiä



Tommi Keikko, Jari Isokorpi, [Leena Korpinen](#)
[Tampereen teknillinen korkeakoulu](#)

Tutkimus on tehty Sähkövoimatekniikan kehityspoolin tuella.

Julkaistu 31.12.1997
[Palaute](#)

1 JOHDANTO	4
2 KESKEISIÄ MAGNEETTIKENTTÄLÄHTEITÄ	4
2.1 Voimansiirtojohdot ja sähköasemat	5
2.2 Jakelujohdot ja muuntamot	5
2.3 Elin- ja työympäristöjen kenttälähteitä	6
2.4 Magneettikenttiin liittyvät määräykset ja suositukset	8
2.4.1 Magneettikenttärajoja laitteille	8
2.4.2 Magneettikenttien altistumisrajoja	9
3 MAGNEETTIKENTTIEN MÄÄRITTÄMINEN	10
3.1 Magneettikenttien mittaaminen	11
3.2 Magneettikenttien laskeminen analyttisellä menetelmällä	11
3.3 Magneettikenttien laskeminen elementtimenetelmällä	15
3.4 Magneettikenttien määrittäminen vaikeissa käytännön esimerkeissä	16
3.4.1 Vaimennuskertoimen laskeminen suojakoteloinnille	16
3.4.2 Vaimennuskertoimen käyttäminen laskennassa	17
4 MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMISMENETELMIÄ	18
4.1 Vaimentaminen ferromagneettisella levyllä	18
4.2 Vaimentaminen hyvin sähköä johtavalla levyllä	19
4.3 Vähentäminen geometriaa muuttamalla	20
5 SÄHKÖASEMAN MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMINEN	20
5.1 Sähköaseman rakenne	20
5.2 Sähköasemalla suoritetut mittaukset	22
5.2.1 Kartoitussmittaus sähköasemalla	22
5.2.2 Linjamittaus sähköasemalla	23
5.2.3 Virran mittaus sähköasemalla	23
5.3 Sähköaseman magneettivuon tiheyden laskenta	23
5.3.1 Alueiden laskenta	24
5.3.2 Leikkausten laskenta	31
5.3.3 Laskennan vertailu eri menetelmillä	34
5.4 Magneettikenttien pienentäminen sähköasemalla	34
5.5 Yhteenveto sähköaseman magneettikenttien pienentämisestä	37
6 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMINEN	37
6.1 Muuntamon rakenne	37
6.2 Muuntamon mittaukset	40
6.2.1 Mittaukset alkuperäisellä rakenteella	40
6.2.2 Mittaukset parannetulla rakenteella	43
6.3 Muuntamon magneettikenttien laskentaa	45
6.3.1 Mittauksien ja laskennan vertailu	45
6.3.2 Magneettikenttien laskentaan perustuva pienentämiskeinojen vertailu	48
6.4 Yhteenveto kiinteistömuuntamon magneettikenttien pienentämisestä	53
7 VALOKAARIUUNIN MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMINEN	54
7.1 Valokaariuunin rakenne	54
7.2 Valokaariuunin mittaukset	56
7.3 Valokaariuunin magneettikenttien laskenta	58
7.3.1 Valokaariuunin magneettikenttien numeerinen laskenta	58
7.3.2 Valokaariuunin magneettikenttien analyttinen laskenta	60
7.4 Yhteenveto valokaariuunin magneettikenttien laskennasta	63
8 LASKENTAESIMERKEISTÄ TEHTYJÄ JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	64
8.1 Esimerkkitapaukset	65

8.1.1 Sähköasema.....	65
8.1.2 Kiinteistömuuntamo.....	65
9 YHTEENVETO	66
LÄHTEET.....	67

1 JOHDANTO

Sähkön kulutus on lisääntynyt Suomessa jatkuvasti. Kulutuksen myötä myös sähköverkko on kehittynyt. Siirtojohtojen yleistyminen asutuksen läheisyydessä on saanut yleisön huolestumaan pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien mahdollisista terveyshaitoista. Myös herkkien elektroniikkalaitteiden ja elektronisten ohjausten yleistyminen, sekä erityisesti niissä esiintyvät häiriöt ovat lisänneet kenttien selvittämisen tarvetta. Pientaajuisista kentistä magneettikentät ovat erityisessä asemassa, sillä ne lävistävät muuttumattomina lähes kaiken materiaalin, toisin kuin sähkökentät. Tämän vuoksi magneettikenttien pienentämiseen pitää kiinnittää erityistä huomiota hyvien tulosten saavuttamiseksi.

Magneettikenttien pienentämiseen ryhdyttäessä on alkutilanteen magneettikentät ensin määritettävä tilanteen varmistamiseksi. Magneettikenttien määrittäminen on usein mahdollista sekä mittaamalla että laskemalla. Kun tarkasteltavana on useita erilaisia kenttälähteitä, niiden yhdessä aiheuttaman magneettikentän laskennallinen määrittäminen voi olla vaikeaa. Kun kenttien syntymiseen liittyy useita eri vaiheissa olevia monimutkaisia kenttälähteitä ja niiden läheisyydessä on metallirakenteita, joudutaan tilanteeseen, jossa kenttien laskennassa joudutaan käyttämään likimääräistyksiä. Jos kuitenkin tavoitteena on kenttien pienentäminen, täytyy löytää riittävän hyvät arviointimenetelmät kenttien luotettavaa määrittämistä varten.

Tässä raportissa on tavoitteena selvittää erilaisten magneettikentän pienennysvaihtoehtojen käyttömahdollisuuksia käytännön tilanteissa. Erilaisia pienentämiskeinoja tarkastellaan sähköaseman, muuntamon ja valokaariuunin esimerkkitapauksissa. Esimerkkitalaukset on valittu tarkastelun kohteeksi sen perusteella, että ne saattavat mahdollisesti aiheuttaa ympäristöönsä suurempia magneettikenttiä kuin mitä esiintyy tavallisesti muissa elin- ja työympäristöissä. Osa pienentämiskeinojen vertailuista on tehty laskennallisesti, mutta alkuperäisistä tilanteista on olemassa myös mittaustulokset.

Esimerkkitalauksien magneettikenttien laskentaan sovelletaan analyttistä ja numeerista menetelmää. Menetelmistä esitellään raportissa myös niiden ominaisuuksia, mahdollisuuksia ja rajoituksia. Laskentatehtävän yksinkertaistamiseksi näitä kahta menetelmää on käytetty myös yhdistetysti laskentaongelman ratkaisemiseksi.

Raportin loppuun on kerätty tutkimuksen perusteella saatuja ohjeita magneettikenttien pienentämiseksi. Ohjeita on aina tarkasteltava ja sovellettava käytäntöön tapauskohtaisesti, sillä käytännön kohteet poikkeavat aina toisistaan.

Raportissa käsitellään lyhyesti myös tämänhetkisiä määräyksiä ja suosituksia ympäristöjen magneettikentistä ja laitteiden magneettikenttien siedosta. Määräysten ja suositusten suhdetta suoritettuihin mittauksiin ja laskentaan ei ole kuitenkaan tarkasteltu.

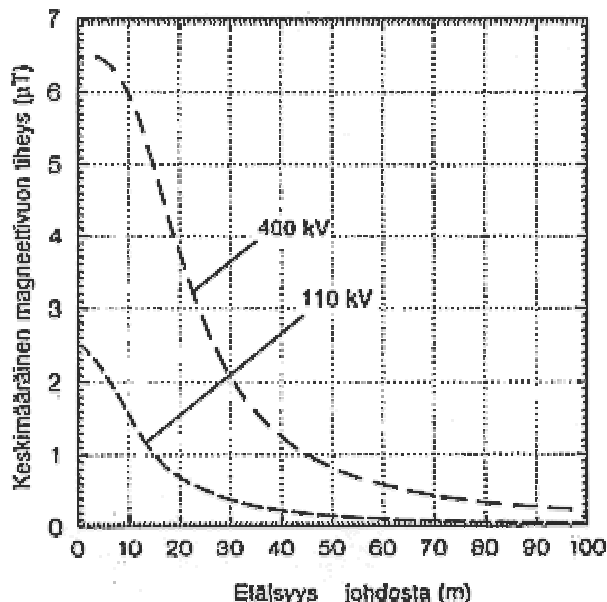
2 KESKEISIÄ MAGNEETTIKENTTÄLÄHTEITÄ

Magneettikenttiä esiintyy kaikissa sähköistetyissä ympäristöissä. Koska magneettivuon tiheys on suoraan verrannollinen sen synnyttävään sähkövirtaan, esiintyy suurten virtojen läheisyydessä usein suuria magneettikenttiä. Lisäksi käämitykset saattavat synnyttää suuria magneettikenttiä, vaikka käämiin syötettävä virta olisikin pieni, sillä vuontiheys on suoraan verrannollinen käämin kierrosten lukumäärään. Myös lähteiden aiheuttamat kentät vaimenevat eri tavalla riippuen lähteen koosta ja muodosta. Seuraavassa tarkastellaan tarkemmin erilaisia kenttälähteitä.

2.1 Voimansiirtojohdot ja sähköasemat

Voimansiirtojohtoja käytetään siirtämään suuria sähkötehoja pitkiä matkoja. Sähköasema on sellainen siirto- tai jakeluverkon kohta, jossa voidaan suorittaa kytkentöjä, jännitteen muuntamista tai sähköenergian siirron keskittämistä tai jakoa eri johdoille. Sähköasemien magneettikentistä on julkaistu joitakin suomalaisia tutkimuksia [/21/](#). Niissä 400 kV hoitokäytävällä esiintyi 7 - 28 μT , 110 kV hoitokäytävillä 4 - 11 μT ja yhden metrin etäisyydellä muuntajista 3 - 64 μT magneettikenttiä. Voimajohtojen ja sähköaseman läheisyydessä magneettivuon tiheyden vaikuttaa etäisyys johdosta, johtimien vaiheväli, niiden keskinäinen sijoitus ja johtimissa kulkeva kuormitusvirta. Kuormitusvirrat vaihtelevat esimerkiksi vuodenajan, viikonpäivän ja kellonajan mukaan. Myös samassa jänniteportaassa olevien johtojen keskivirroissa on eroja.

Koska johtojen kuormitusvirrat vaihtelevat, voidaan johtoja kuvata vuoden keskimääräisten virtojen avulla. IVO:n Ympäristönsuojeluyksikkö on laskenut IVO Voimansiirto Oy:n siirtojohtojen vuoden 1989 keskimääräisten virtojen perusteella magneettivuon tiheyden 400 kV ja 110 kV johdoille. Tuloksista on esitetty kuvassa 2.1 magneettivuon tiheyden 90%:n fraktiili



Kuva 2.1. 400 kV ja 110 kV johtojen keskimääräinen magneettivuon tiheys 90%:lla IVS:n johdoista jää käyrien tason alapuolelle. [/13/](#)

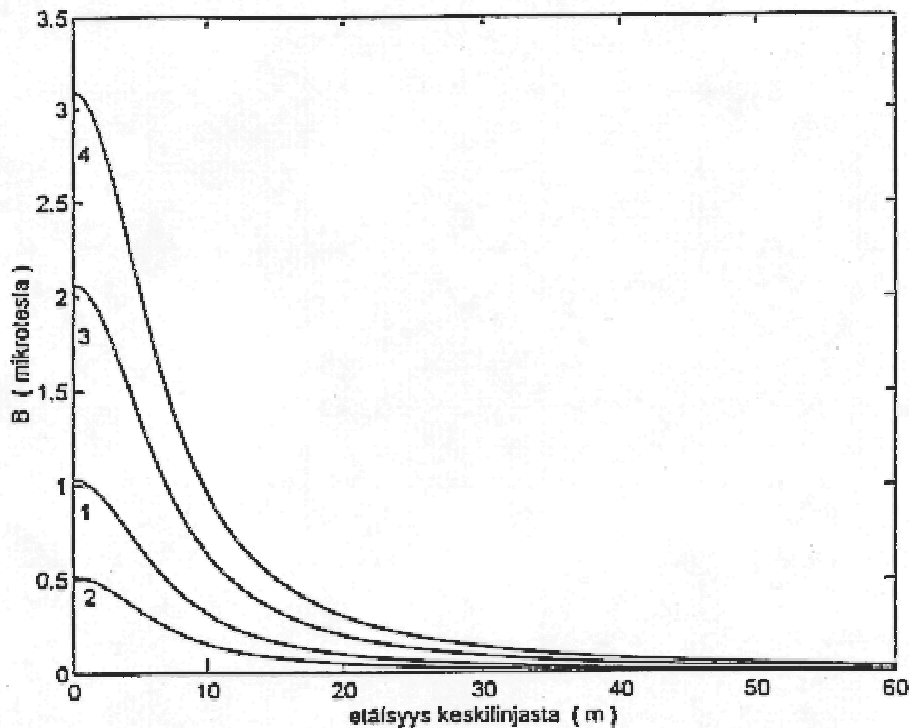
Kuvan perusteella keskimääräinen magneettivuon tiheys oli silloin 90 %:lla 400 kV:n johdoista maksimissaan 6,5 μT ja 110 kV:n johdoista maksimissaan 2,5 μT . [/13, 37/](#)

2.2 Jakelujohdot ja muuntamot

Jakeluverkoilla siirretään sähköä siirtoverkosta kuluttajille. Jakeluverkossa on runsaasti muuntamoita, joissa jännitetaso muutetaan yleiseksi käyttöjännitteeksi 400/230 V.

Jakeluverkoissa käytetään keskijännitteellä yleisimmin 20 kV avojohdoteja tai kaupunkialueilla kaapeleita. Kuvassa 2.2 on esitetty magneettivuon tiheydet tyypillisen 20 kV avojohdon

läheisyydessä yhden metrin korkeudessa kun virta on 50, 100, 200 tai 300 A /22/. Yleensä avojohtojen kentät jäävät alle 3 μT :an.



Kuva 2.2. 20 kV jakelujohdon magneettivuon tiheys erilaisilla virroilla; 1: 100 A, 2: 50 A, 3: 200 A, 4: 300 A. /22/

Jakelujohdoilla kuormitusvirrat ovat pienempiä kuin siirtojohdoilla. Tällöin myös jakelujohtojen magneettikentät jäävät pienemmiksi kuin siirtojohdoilla.

Muuntamoista rakennuksiin sijoitetut kiinteistömuuntamot ovat merkittävämpiä altistus- ja häiriölähteitä kuin puisto- ja pylväsmuuntamot, koska ne sijaitsevat yleensä lähempänä sähkökäyttökohteita. Muuntamon laitteista suurimman magneettivuon tiheyden yleensä aiheuttaa muuntajalta lähtevä kisko- tai kaapelisilta. Kiinteistömuuntamosta aiheutuvan magneettikentän suuruuteen vaikuttavat virran ohella oleellisesti muuntamon virtakiskojen rakenteet ja mitat. Tyypillisen kiinteistömuuntamon, jonka alajännitepuolen virta on enintään 1000 A, sisällä magneettivuon tiheys on yleisesti tasoa 2 - 5 μT . Pienjännitepuolen läheisyydessä voi magneettikenttä olla jopa 60 μT . Kiinteistömuuntamon kentät ovat yläpuolisessa huoneessa tasoa 2 - 12 μT yhden metrin korkeudella lattiasta. /10, 38/

0,4 kV johdot ovat useimmiten riippukierrejohtoja tai kaapeleita, joilla molemmilla vaihejohtimet ovat lähes kiinni toisissaan. Siksi niiden aiheuttama magneettikenttä rajautuu sähköisesti symmetrisessä tilanteessa aivan johdon läheisyyteen. /21/

2.3 Elin- ja työympäristöjen kenttälähteitä

Edellä kuvattujen sähköverkon kenttälähteiden lisäksi elin- ja työympäristöjen keskeisiä kenttälähteitä ovat rakennusten sisäiset lähteet. Rakennusten sisällä esiintyvät magneettikentät ovat

peräisin sähkölaitteista, rakennusten sisäisistä sähköjohdoista ja johtavissa rakenteissa, kuten vesijohdoissa, betoniraidoituksissa ja vesikouruissa mahdollisesti kulkevista harhavirroista. /29/

Käytettävät sähkölaitteet ovat usein merkittävämpiä kenttälähteitä kuin sisäasennukset. Laitteiden tuottamiin kenttiin vaikuttavat muun muassa laitteiden teho ja rakenne. Gaugerin tutkimuksien mukaan pienten laitteiden, kuten esimerkiksi partakoneen, silitysraudan ja kahvinkeitinien kentät vaimenevat usein etäisyyden kolmanteen potenssiin, kun taas suurilla laitteilla, kuten pesukoneen ja sähkölieden kentät vaimenevat hitaammin, kuitenkin nopeammin kuin etäisyyden toiseen potenssiin. Vaimenemisnopeuteen vaikuttaa kuitenkin oleellisesti tarkastelu-etäisyys, joka oli kyseisessä tutkimuksessa 0,03 - 3 metriä. /12/

Sisäasennuksien yksi- ja kolmivaihekaapeleista aiheutuvat kentät ovat normaalisti pieniä, koska yleensä virrat ovat suhteellisen pieniä ja eri vaihejohtimet tai vaihe- ja nollajohdin sijaitsevat usein lähellä, jolloin niiden aiheuttamat kentät kumoavat toisiaan. Rakennuksen johtavissa rakenteissa esiintyvät virrat saattavat olla merkittävä kenttälähde. /25/

Toimistoympäristössä laitteet ovat pitkälti saman tyyppisiä ja suhteellisen pienitehoisia kuten elinympäristössä. Teollisuusympäristöissä kenttälähteet vaihtelevat huomattavasti eri teollisuuden toimialoilla ja laitteistoilla. Taulukkoon 2.1 on koottu joitakin teollisuudessa käytettävien laitteiden magneettivuon tiheyksiä tavallisilla työskentelyetäisyyksillä.

Taulukko 2.1. Työympäristöjen laitteiden magneettivuon tiheyksien arvoja työskentelyetäisyyksillä /19, 21, 26, 27/.

Mittauskohde	B/ μ T
Antimagnetointi	1 000 - 48 000
Hitsausaamojen tarkistus	1 000 - 8 000
Induktiiviset lämmittimet	10 000 - 70 000
Induktiouunit	1 000 - 10 000
Valokaarihitsaus	10 - 10 000
Tavalliset hitsauslaitteet I = 20 - 280 A	5 - 350
Hitsauslaitteet, joilla erilaiset toimintajaksot, I = 7 000 - 14 500 A	180 - 4 100
Sähkömoottorit	10 - 100
Jyrsin I = 10 A	0,5
Hiomakone I = 1,4 - 10 A	2,3 - 17,3
Kipinätyöstölaitteisto I = 3,5 A	1,4
Saha I = 2,2 A	0,2
Kompressori I = 1,4 A	0,3
Teroituskone I = 5,7 A	0,8
Kiillotuskone I = 9,0 A	60
Taittokone I = 5,2 A	0,5 - 5,9

2.4 Magneettikenttiin liittyvät määräykset ja suositukset

Magneettikenttiin liittyviä määräyksiä ja suosituksia on esitetty sekä laitehäiriöiden, että ihmisaltistuksen kannalta. Sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyen magneettikentille on annettu määräyksiä sekä häiriön päästölle, että häiriön siedolle. Laitehäiriöihin liittyvät säännökset ovat kuitenkin edelleen kehittymässä, joten niitä luultavasti tullaan tarkastamaan. Ihmisaltistuksen rajoitukset liittyvät mahdollisiin kenttien terveysvaikutuksiin ja ovat yleensä luonteeltaan suosituksia.

2.4.1 Magneettikenttärajoja laitteille

Laitehäiriöiden kannalta keskeisin määräys on EU:n EMC-direktiivi [/11/](#). Sen mukaan mikään laite ei saa häiritä muita sähkölaitteita eikä toisaalta saa häiriintyä määrätyn kenttätason alittavassa ympäristössä.

Sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevan standardin, Sähkömagneettinen yhteensopivuus häiriönsieto kotitaloudet, toimistot ja kevyt teollisuus, opastavassa liiteosassa on annettu raja-arvona 1 A/m (1,26 µT) kuvaputkinäyttöjen häiriönsiedolle. Tätä pienemmissä kentissä näytön täytyy toimia häiriöttömästi. Kaikkien laitteiden toimimiselle on annettu raja-arvo 3 A/m (3,77 µT), jota suuremmissa kentissä saa ilmetä häiriöitä, mutta toiminnan täytyy palata normaaliksi kentän pienennyttyä alle raja-arvon [/31/](#). Muuta teollisuutta koskevassa standardissa vastaava raja-arvo on 30 A/m (37,7 µT) [/32/](#).

Ammattielektroniikkalaitteille on määritelty ympäristöluokitukset ja rasisusasteet, sekä ohjeet niiden testaukseen standardissa Ammattielektroniikkalaitteiden häiriönsieto. Luokitukset on ryhmitelty seuraavasti: ulkotilat, sairaala, telesema, toimisto, teollisuuslaitos ja sähköasema. Taulukkoon 2.2 on koottu ympäristöluokitukset ja rasisusasteet 50 Hz magneettikentille. [/30/](#)

Taulukko 2.2. Ammattielektroniikkalaitteiden häiriönsiedon vaatimukset ja testaus 50 Hz häiriökentille. [/30/](#)

**ympäristöluokka ympäristöluokituksen
rasitusaste A/m (µT)**

rasitusaste testauksessa, toiminta

		normaali A/m (µT)	pieni häiriö A/m (µT)	suuri häiriö A/m (µT)	keskeytyy A/m (µT)	laite vikaantuu A/m (µT)
ulkotila	60 (75,4)	60 (75,4)	100 (126)	200 (251)	-	-
sairaala	30 (37,7)	30 (37,7)	100	200	-	-

			(126)	(251)		
teleasema	30 (37,7)	30 (37,7)	100 (126)	200 (251)	-	-
toimisto	30 (37,7)	10 (12,6)	30 (37,7)	100 (126)	-	-
teollisuus	30 (37,7)	30 (37,7)	-	400 (503)	-	-
sähköasemat	30 (37,7)	30 (37,7)	-	400 (503)	-	-

Ympäristöluokitukset tarkoittavat samankaltaisia ympäristöolosuhteita sisältäviä paikkoja. Häiriökentälle kussakin ympäristöluokassa on annettu rasisusaste ja sen testaukseen liittyvät testausarvot. Arvot perustuvat mittaustuloksiin ja kokemukseen siten, että arvojen ylittymistodennäköisyys on 1%. /30/

Taulukossa esiintyvä normaali toiminta tarkoittaa, että laitteen toimiminen testauksessa täyttää sille asetetut vaatimukset. Pienessä häiriössä jokin laitteen epäoleellinen toiminta katkeaa hetkellisesti. Suuri toimintahäiriö katkaisee laitteen jonkin oleellisen toiminnan tai huonontaa sitä, mutta toiminta palautuu alkuperäiselle tasolle itsestään ilman, että suoritetaan huoltotoimenpiteitä. Häiriökenttien testauksessa ei sallita pahempia haittavaikutuksia, kuten toiminnan keskeytymisiä tai vikaantumisia, jotka vaativat käyttäjän toimenpiteitä tai johtavat huoltotoimiin. Tästä syystä taulukossa 2.2 ei myöskään esitetä arvoja laitteen toiminnan keskeytymiselle tai vikaantumiselle. /30/

2.4.2 Magneettikenttien altistumisrajoja

Magneettikentille on viime vuosina valmisteltu uusia altistumisrajoja. Nykyään rajat on olemassa taajuusalueelle 0 - 300 GHz. 50 Hz taajuudella rajat perustuvat magneettivuon tiheyden indusoimaan virrantiheyteen kehossa. Taulukossa 2.3 on esitetty tärkeimpiä altistumisrajoja 50 Hz magneettikentille (International Radiation Protection Association (IRPA) 1990, Commission of the European Communities (CEC) 1993, European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) 1995, National Radiological Protection Board (NRPB) 1993, Deutsche Electrotechnische Commission im DIN und VDE (DIN) 1990, American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) 1997).

Taulukossa esitetyillä valvotuilla olosuhteilla tarkoitetaan sellaista työpaikkaa, jossa käytetään voimakkaita magneettikenttiä tuottavia laitteita, ja toisaalta työntekijöiden altistumista valvotaan jollain tavalla. Jatkuvan altistuksen rajat ovat valvotuissa olosuhteissa 400 - 5 000 μ T koko keholle. Tiukimmat altistumisrajat ovat CEC:n direktiiviehdotuksessa, jonka toimenpideraja valvotuissa olosuhteissa on 400 μ T. Lyhytaikaisina altistuksina sallitaan huomattavasti suurempia arvoja, 5 000 - 12 500 μ T. Yleisesti ottaen altistumisrajat ovat melko korkeita, mutta saattavat kuitenkin ylittyä joidenkin teollisuusprosessien läheisyydessä.

Työpaikat, joissa valvontaa ei suoriteta, asunnot ja muu elinympäristö määritellään valvomattoman altistumisen alueiksi. Valvomattomiin olosuhteisiin kuuluu myös asunnot ja elinympäristö, joten sen piiriin kuuluu herkempiä yksilöitä, kuten esimerkiksi lapset. Koska magneettikenttäaltistusta ei seurata kuten valvotuissa olosuhteissa, on valvomattomissa olosuhteissa raja-arvot valvottuja

olosuhteita tiukempia. Raja-arvona jatkuvalle altistukselle on esitetty 100 μT ja lyhytaikaisena altistuksena 1 000 μT .

Taulukko 2.3. Altistumisrajoja 50 Hz magneettikentälle.

standardi	organisaatio status	magneettivuon tiheys (μT)				huom.
		valvottu		valvomaton		
		jatkuva lyhytaikainen		jatkuva lyhytaikainen		
IRPA ¹⁾	kansainvälinen	500	5000 (2h/d)	100	1000 (2h/d)	koko keholle
	suositus	25000	-	-	-	raajoille
CEC ²⁾	direktiiviehdotus	400	-	-	-	toimenpideraja
CENELEC ³⁾	ENV-standardi	1600	-	640	-	koko keholle
		25000	-	10000	-	raajoille
NRPB ⁴⁾	kansallinen suositus	1600	-	-	-	tutkimusraja
DIN ⁵⁾	kansallinen	5000	12500 (5 min/h)	100	1000 (2h/d)	koko keholle
	stand. luonnos	50000	-	-	-	raajoille
ACGIH ⁶⁾	kansallinen suositus	1200	-	-	-	

1) International Radiation Protection Association, 1990

2) Commission of the European Communities, 1993

3) European Committee for Electrotechnical Standardization, 1995

4) National Radiological Protection Board, 1993

5) Deutsche Electrotechnische Commission im DIN und VDE, 1990

6) American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1997

3 MAGNEETTIKENTTIEN MÄÄRITTÄMINEN

Olemassa olevien kenttien määrittäminen on helpoin tehdä magneettikenttämittauksilla, mutta se voidaan tehdä myös laskemalla. Mittaustulokset kuvaavat mittarin epätarkkuuden rajoissa magneettikentän tarkasti tarkasteltavassa paikassa. Mitatusta kentästä ei kuitenkaan voida erottaa tiettyyn kenttälähteeseen liittyvää kenttää, ainoastaan kaikkien kenttälähteiden yhteisesti aiheuttama magneettikenttä.

Laskeminen puolestaan onnistuu vain, jos kaikkien tarkastelualueen läheisyydessä olevien rakenteiden materiaaliominaisuudet ja niissä kulkevat virrat tunnetaan. Tällöin numeerisia menetelmiä, esimerkiksi elementtimenetelmää (Finite Element Method) käyttäen voidaan yksinkertaisissa tapauksissa päästä tarkasti mitattuihin arvoihin. Tietokoneiden rajallisen kapasiteetin takia elementtimenetelmän laskentamalli joudutaan usein kuitenkin yksinkertaistamaan, jolloin malli kuvaa todellisuutta vain likimääräisesti. Myöskin analyttistä menetelmää, jossa tehtävää pilkotaan osiksi, käyttäen voidaan päästä hyvin laskentatuloksiin. Analyttisen laskentamallin yksinkertaistukset liittyvät virranjakoon johtimissa ja tarkastelualueen johtaviin rakenteisiin, jotka molemmat joudutaan kuvaamaan käyttäen likimääräistyksiä. Seuraavassa tarkastellaan mittauksia ja laskennan teoriaa analyttisellä menetelmällä ja elementtimenetelmällä.

3.1 Magneettikenttien mittaaminen

Pientaajuisten magneettikenttien mittaamiseen on saatavilla useita mittareita, jotka perustuvat yleensä induktioon, Hall-ilmiöön tai hystereesiin. Eri ilmiöihin perustuvilla mittareilla on kullekin ilmiölle tyypillinen mitta-anturi. /17/

Mittareita on saatavana sekä magneettikentän hetkellis- että pitkäaikaismittaukseen. TTKK:lla on yksiakselinen HI-3604 hetkellismittari ja kolmeakselinen ML-1 -pitkäaikaismittari. Molemmissa mittarityypeissä käytetään induktioon perustuvia antureita magneettikentän määrittämisessä. Mittarien toiminta perustuu muuttuvan magneettivuon johdinsilmukkaan indusoiman sähkömotorisen voiman mittaamiseen. /6, 14, 33/

Kolmeaksellisella anturilla saadaan mitattua magneettivuon tiheyden resultanttiarvoa, joka on kentän x-, y- ja z-komponenttien neliösumman neliöjuuri. Yksiaksellisella mittarilla voidaan mitata joko kentän komponentit ja laskea niistä resultantti tai mitata kentän maksimiarvo. Kolmeakselisen mittarin etuna on eri akselien mittausten samanaikaisuus, jolloin kentän ajalliset vaihtelut eivät vaikuta mittauksiin. Yleensä kolmeaksellisella anturilla mitattu vuontiheyden resultantti on suurempi kuin yksiaksellisella anturilla mitattu maksimiarvo. /16, 17/

3.2 Magneettikenttien laskeminen analyttisellä menetelmällä

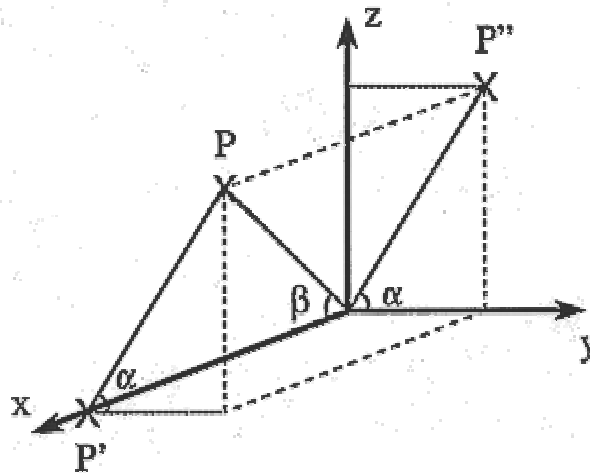
Magneettivuon tiheyden resultantti voidaan laskea likimääräisesti virran tehollisarvon avulla taajuuksien siihen vaikuttamatta. Samoin suurin mahdollinen magneettivuon tiheys saadaan laskettua, jos kentän spektri koostuu vain yhdestä taajuudesta. Jos spektrissä on useampia taajuuksia, suurimman arvon määrittäminen joudutaan tekemään numeerisesti optimoimalla. Vaikeutena optimoinnissa on se, että laskennan tuloksena saatu magneettivuon tiheys voi olla hetkellinen suurin arvo, mutta pienimmän taajuuden jaksonaikana voi löytyä saatua ratkaisua suurempi magneettivuon tiheys. Tämän vuoksi on perusteltua mitata ja laskea magneettivuon tiheyden resultanttiarvoja.

Analyttisessä magneettivuon tiheyden resultantin laskennassa virtajohtimet kuvataan suorina ohuina johtimina, joiden päätepisteet ovat solmupisteitä. Jokaiselle johtimelle asetellaan vaihevirta ja vaihekulma erikseen. Kaarevat johtimet kuvataan lyhyillä suorilla solmuväleillä.

Magneettivuon tiheys tarkastelupisteessä lasketaan koordinaatistomuunnosten kautta. Jokainen kahden solmupisteen väli muunnetaan erikseen alkamaan origosta ja x-akselin suuntaiseksi, jolloin kentän laskenta yksinkertaistuu. Sama koordinaatistomuunnos on huomioitava myös tarkastelupisteelle. Ensimmäisenä solmupisteiden ja tarkastelupisteen paikkavektoreista

vähennetään solmuvälin alkupisteen paikkavektori, jolloin koordinaatisto siirtyy niin, että solmuväli alkaa origosta. Seuraavaksi paikkavektorit kerrotaan muunnosmatriisilla, joka kiertää solmuvälin xy-tasoon ja edelleen x-akselin suuntaiseksi. /28/

Muunnosmatriisin muodostamista varten määritetään kaksi toisistaan riippumatonta kulmaa kuvan 3.1 mukaisesti, minkä jälkeen määritellään koordinaatistomuunnokset. Solmuvälin päätepisteen yz-tasolla olevasta projektiosta määritetään tämän projektion kulma y-akseliin nähden. Se merkitään kulmaksi α . Toinen muunnosmatriisin muodostamiseen tarvittava kulma on solmuvälin päätepisteen ja x-akselin välinen kulma, joka merkitään kulmaksi β .



Kuva 3.1. Koordinaatiston muunnosmatriisissa käytettävät kulmat α ja β . Kuvassa P on solmuvälin päätepiste, P'' on pisteen projektiio yz-tasolla ja P' on pisteen projektiio x-akselilla.

Kulman α avulla kierretään koordinaatistoa alkuperäisen koordinaatiston x-akselin suhteen siten, että solmuväli tulee xy-tasoon. Koordinaatiston kierrossa x-koordinaatit eivät muutu. Tähän kiertoon tarvittava matriisi on yhtälön 1 mukainen. Matriisia käytetään siten, että alkuperäisen koordinaatiston paikkavektori $[x, y, z]^T$ (pystyvektori) kerrotaan vasemmalta muunnosmatriisilla. Vastaavasti muunnetun koordinaatiston paikkavektori saadaan alkuperäiseen koordinaatistoon kertomalla paikkavektori vasemmalta muunnosmatriisin käänteismatriisilla.

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

Kulman β avulla kierretään ensimmäisessä muunnoksessa saatua koordinaatistoa z-akselin suhteen, jolloin solmuväli tulee x-akselin suuntaiseksi. Tässä koordinaatiston kierrossa z-koordinaatit eivät muutu. Muunnokseen tarvittava muunnosmatriisi on yhtälön 2 mukainen.

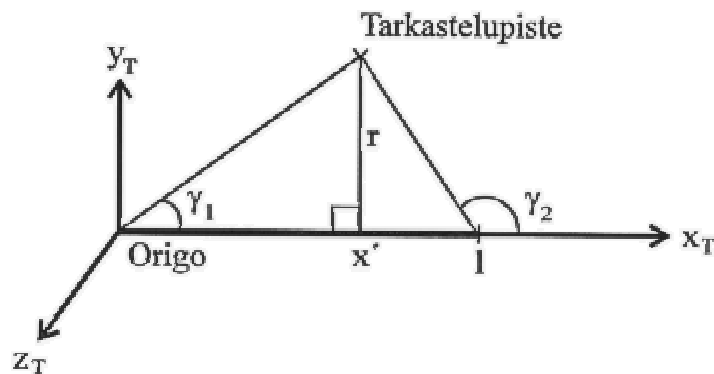
$$T_z = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Muunnokset voidaan myös yhdistää, jolloin molemmat koordinaatistokierrot saadaan yhdellä matriisitulolla. Yhdistettyä muunnosta varten tarvittava muunnosmatriisi saadaan matriisitulon avulla, kertomalla T_x vasemmalta matriisilla T_z . Yhdistettyyn muunnokseen tarvittava muunnosmatriisi on yhtälön 3 mukainen.

$$T = \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\alpha & \sin\beta \cos\alpha & \sin\alpha & \sin\beta \\ -\sin\beta \cos\alpha & \cos\beta \cos\alpha & \sin\alpha & \cos\beta \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Magneettivuon tiheys voidaan laskea uudessa koordinaatistossa yksinkertaisesti, koska sillä on vain y- ja z-akselin suuntainen komponentti. Myös solmuvälin pituus voidaan huomioida laskennassa.

Solmuvälin pituuden huomioimista varten määritetään solmuvälin päätepisteiden ja tarkastelupisteen kautta kulkevien suorien ja solmuvälin väliset kulmat, jotka huomioidaan laskennassa trigonometrian avulla. Kulmat on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. Solmuvälin pituuden ja sijainnin huomioivat kulmat γ_1 ja γ_2 . Kuvassa l on solmuvälin pituus, x' on tarkastelupisteen x-koordinaatti ja r tarkastelupisteen etäisyys solmuvälistä.

Trigonometrian sääntöjä käyttäen voidaan äärettömän pitkän johtimen magneettivuon tiheydestä laskea se osuus, jonka laskettava solmuväli aiheuttaa tarkastelupisteessä $[x', y', z']^T$. Näiden laskusääntöjen avulla määritetään magneettivuon tiheydelle kerroin, joka nimetään tässä b_0 :ksi.

$$b_0 = \cos\gamma_1 - \cos\gamma_2 = \frac{x'}{\sqrt{x'^2+r^2}} + \frac{l-x'}{\sqrt{(l-x')^2+l^2}} \quad (4)$$

missä l on solmuvälin pituus,
 x' on tarkastelupisteen x -koordinaatti ja
 r on tarkastelupisteen etäisyys solmuvälistä.

Tarkastelupisteen magneettivuon tiheyden suuruus B_0 saadaan laskettua yhtälön 5 avulla.

$$B_0 = \frac{b_0}{2} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (5)$$

missä μ_0 on tyhjän permeabiliteetti ja
 I on solmuvälin virta.

Jokaisen tarkastelupisteen magneettivuon tiheyteen vaikuttavat kaikki tarkasteltavat solmuvälit. Koska laskenta tapahtuu jokaisen solmuvälin osalta eri koordinaatistossa, on tulokset muunnettava samaan koordinaatistoon. Sen takia lasketaan jokaisen solmuvälin aiheuttamat magneettivuon tiheyden komponentit. Magneettivuon tiheydelle muunnetussa koordinaatistossa suoritetaan käänteinen koordinaatistomuunnos, jolloin päästään alkuperäiseen koordinaatistoon. Muunnoskoordinaatistossa magneettivuon tiheyden komponentit ovat yhtälöiden 6 - 8 mukaiset.

$$B_x = 0 \quad (6)$$

$$B_y = \frac{z'}{r} B_0 \quad (7)$$

$$B_z = \frac{y'}{r} B_0 \quad (8)$$

Muunnetun koordinaatiston magneettivuon tiheys saadaan alkuperäiseen koordinaatistoon käänteisen koordinaatistomuunnoksen avulla. Muunnos lasketaan yhtälön 9 mukaisella matriisitulolla.

$$\bar{B} = T^{-1}[B_x \ B_y \ B_z]^T \quad (9)$$

Yhtälön 9 avulla saadaan laskettua magneettivuon tiheys alkuperäisessä koordinaatistossa, joten kokonaiskentän laskemiseksi kaikkien solmuvälien kentät täytyy yhtälön 10 mukaisesti summata yhteen.

$$\overline{B} = \sum_{i=1}^n \overline{B}_i \quad (10)$$

missä n on solmuvälien lukumäärä ja

\overline{B}_i on solmuvälin i aiheuttama magneettivuon tiheys.

Laskennassa on kuitenkin huomioitava, että magneettivuon tiheys, \overline{B} , on vektorisuure. Magneettivuon tiheyden resultantti B_{res} lasketaan yhtälön 11 mukaan ottamalla neliöjuuri vuontiheyden komponenttien reaali- ja imaginääriosien neliösummasta.

$$B_{res} = \sqrt{[Re(B_x)]^2 + [Im(B_x)]^2 + [Re(B_y)]^2 + [Im(B_y)]^2 + [Re(B_z)]^2 + [Im(B_z)]^2} \quad (11)$$

Mittauksien ja laskennan tuloksia voidaan verrata, jos laskennassa käytetään virran tehollisarvoa. Käsimitareilla mitataan yleensä magneettivuon tiheyden tehollisarvoa tai niin kutsuttua todellista tehollisarvoa, joka huomioi myös sini-aallosta poikkeavan kentän vaihtelun. Kolmeakselisella magneettikenttämittarilla saadaan määritettyä suoraan magneettivuon tiheyden resultantti. Yksiakselisella mittarilla resultantti saadaan laskettua mitatuista arvoista. Laskettuja hetkellisarvoja ei voida verrata mittauksiin.

3.3 Magneettikenttien laskeminen elementtimenelmällä

Elementtimenetelmä (Finite Element Method, FEM) on muodostunut magneettikenttien ratkaisemisen vakiomenetelmäksi, kun halutaan ratkaista magneettikenttä johtavien tai magneettisten materiaalien lähellä /20, 23/. Kaikki laskenta-alueella olevat rakenteet mallinnetaan osa-alueina, jotka kukin ovat samaa materiaalia. Minkään alueen sisällä ei saa olla aukkoja, joita ei ole määritelty /40/. Osa-alueet jaetaan laskentaa varten pienemmiksi alueiksi, joita kutsutaan elementeiksi. Kaikki laskenta-alueen elementit muodostavat elementtiverkon, jonka avulla mallintaminen tehdään. Magneettikentän laskeminen FEM-menetelmällä perustuu Maxwellin yhtälöiden ratkaisemiseen jokaisessa elementissä ja laskentatulosten yhdistämiseen koko laskenta-alueella. FEM-menetelmää käyttävät ohjelmistot koostuvat yleensä kolmesta osasta: esikäsittelijästä, ratkaisijasta ja jälkikäsittelijästä.

Esikäsittelijäosassa ohjelmalle syötetään koko laskentatehtävän geometria, johon kuuluu myös tarkasteltavan rakenteen lähiympäristö. Sen voi tehdä syöttämällä ohjelmalle rakenteiden kulmapisteet, ja muodostamalla niiden avulla samaa materiaalia olevia alueita, joita voidaan yhdistää tai isommasta alueesta voidaan vähentää pienempi. Koko laskenta-alue täytyy määritellä alueiksi eli tehtäväalueen reunan sisällä ei saa olla määrittelemätöntä kohtaa. Alueille syötetään kyseisille aineille ominaiset permeabiliteetin ja resistiivisyyden arvot.

Ilmalle syötetään suhteellinen permeabiliteetti, joka on 1,0. Magnetoituville alueille, esimerkiksi raudalle annetaan suhteellinen permeabiliteetti vakioarvona, koska harmonisesti muuttuvan lähdevirran tapauksessa laskennassa käytetään lineaarisia materiaaliominaisuuksia. Johtaville alueille syötetään suhteellinen permeabiliteetti, joka on 1,0 tyypillisille johteille, kuten alumiinille tai kuparille. Ferromagneettisilla materiaaleilla käytetään materiaalille ominaista suhteellista permeabiliteettia. Johteen ominaisresistiivisyys, joka on johtavuuden käänteisluku, syötetään myös vakioarvona. Lisäksi määritellään elementteihin jakoa varten elementtien koot. Elementtejä kannattaa sijoittaa eniten sellaisille alueille, joissa magneettivuon tiheyden muutos on suurimmillaan, että laskenta tulisi mahdollisimman tehokkaaksi. Sijoittelussa pyritään siihen, että elementit olisivat mahdollisimman symmetrisiä. Esimerkiksi kolmioelementtejä käytettäessä tasasivuisen kolmion muotoisia.

Eri ohjelmissa syötetään lähdevirrat ja reunaehdot joko esikäsitteily- tai ratkaisijaosassa. Lisäksi ohjelmalle syötetään lähdevirran taajuus, joka on perustaajuudella 50 Hz.

Ratkaisijaosassa ohjelma ratkaisee tehtävän käyttäjän antamien käskyjen mukaisesti. Joissakin magneettikentän laskentaohjelmissa ohjelma ilmoittaa laskentatehtävän ratkaisemisen etenemisestä, jolloin se voidaan tarvittaessa keskeyttää ja määrittelyihin tarvittavien muutosten jälkeen aloittaa ratkaisu uudestaan. Jos ohjelma ei kerro mitään ratkaisun etenemisestä, laskentatulokset ja ohjelman ratkaisema elementtiverkko täytyy tarkastaa jälkikäsitteilyjä avulla.

Ratkaisu siirretään ohjelmiston jälkikäsitteilyosaan ohjelman omien käskyjen avulla tai ratkaisu siirtyy sinne automaattisesti ohjelman pitämien tiedostorekisterin avulla. Jälkikäsitteilyosaa avulla tulokset voidaan katsoa tietokoneen kuvaruudulta tai tulostaa sekä graafisessa että taulukkomuodossa. Jälkikäsitteilyjäällä on mahdollista tarkastella magneettivuon tiheyden lisäksi magneettikentän voimakkuutta. Samaan tarkasteluun saadaan kuitenkin ainoastaan yhden kenttäsuureen joko reaali- tai imaginaariosan tulokset, sekä joissakin ohjelmissa myös magneettivuon tiheyden resultantin tulokset.

3.4 Magneettikenttien määrittäminen vaikeissa käytännön esimerkeissä

Valmiit laskentamenetelmät sopivat hyvin magneettikenttien määrittämiseen, kun laskettavan esimerkin rakenne on käytettävälle menetelmälle sopiva. Analyttisellä menetelmällä oletetaan johtimet ohuiksi tarkastelualueen nähden ja, että tarkastelualueella ei ole johtavia tai magneettisia materiaaleja. Kaksiulotteisella elementtimenetelmällä oletetaan ainoastaan laskentatason vaikuttavan laskentaan. Kolmeulotteisella elementtimenetelmällä oletetaan, että laskentaesimerkki voidaan yksinkertaistaa sellaiseksi, että tehtävän ratkaiseminen onnistuu. Myös monimutkaiset laskentageometrit voivat vaatia erikoistyökaluja, kuten piirto-ohjelman tai sovitusohjelman piirto-ohjelmalla tehdyn laskentageometrian elementtimenetelmään siirtämistä varten, joka muokkaa piirto-ohjelmalla muodostetun geometrian elementtimenetelmälle sopivaan muotoon. Käytännön laskentaesimerkit ovat kuitenkin usein sellaisia, että mitkään näistä oletuksista eivät toteudu täysin. Siksi laskennassa joudutaan usein tekemään likimääräistyksiä. Tässä kappaleessa käsitellään elementtimenetelmän tulosten käyttämistä analyttiseen laskentaan.

3.4.1 Vaimennuskertoimen laskeminen suojakoteloinnille

Kaksiulotteisissa magneettikenttien laskennassa täytyy kentän aiheuttajan olla niin pitkä, että sen päät tai muut rakenteet eivät vaikuta kenttään. Voimajohtojen, suorien kiskostojen tai kaapeleiden tarkastelussa riittää usein, että lasketaan magneettikenttä kaksiulotteisesti. Jos magneettikenttiä vaimennetaan hyvin johtavasta tai magneettisesta materiaalista valmistetulla suojakoteloinnilla,

voidaan suojalle laskea magneettikentän vaimennuskerroin SE (Shielding Effectiveness, yksikkö dB) yhtälön 12 mukaisesti.

$$SE = 20 \log \frac{B_0}{B_S} \quad (12)$$

missä B_0 on magneettivuon tiheys ilman suojaa ja
 B_S on magneettivuon tiheys suojan kanssa.

Jos vaimennuskerroin on tarkastelupaikan suhteen vakio ja kaikki kenttälähteet ovat suojan sisällä, sitä voidaan käyttää myös kolmeulotteiseen analyttiseen laskentaan. Voimajohtojen, suorien kiskostojen tai kaapeleiden tapauksessa voidaan magneettikenttien vaimennuskerroin laskea kohtuullisen tarkasti kaksiulotteisellakin laskennalla.

Kolmeulotteista laskentaa tarvitaan, kun tarkastelualueella on monen suuntaisia virtateitä tai virtatie on niin lyhyt, että sen päät vaikuttavat laskentatarkkuuteen. Vaimennuskerroin lasketaan myös kolmeulotteisen laskennan avulla yhtälön 12 mukaan.

Vaimennuskertoimen laskeminen ohuiden suojakoteloiden tapauksessa on kolmeulotteisella elementtimenetelmällä vaikeaa. Syynä siihen on nykyisten kaupallisten elementtimenetelmää käyttävien ohjelmien suuri tietokonekapasiteettivaatimus tarkoissa laskuissa. Vaikeutena on ulkomitoiltaan iso ja paksuudeltaan pieni suojakotelo, koska tällaisen rakenteen mallintaminen vaatii erittäin paljon elementtejä.

Analyttistä menetelmää käytettäessä voidaan suojausvaikutuksen arvioimisessa käyttää myös likimääräisiä vaimennuskertoimen laskentakaavoja [7, 8]. Kaavojen käyttämisen oletuksena on saman suuruinen magneettivuon tiheys koko suojassa. Oletus ei kuitenkaan usein toteudu vaimentamistehtävissä, jos esimerkiksi käytetään kolmevaiheista kotelointia. Sensijaan alkuoletus toteutuu koteloinnissa, jossa yksi vaihe johdin on koteloitu ja muut johtimet ovat niin kaukana, etteivät vaikuta magneettikenttään.

3.4.2 Vaimennuskertoimen käyttäminen laskennassa

Analyttisessä menetelmässä voidaankin käyttää kaksiulotteisen elementtimenetelmän avulla laskettuja vaimennuskertoimen arvoja, kun oletetaan suojausvaikutuksen olevan vakio myös kolmannen ulottuvuuden suuntaan. Lisäksi oletetaan, että suojan ulkopuolella olevien lähteiden kentät eivät vaimene merkittävästi suojan vaikutuksesta tai ne eivät vaikuta vaimennuskertoimeen.

Vaimennuskertoimen avulla analyttisellä menetelmällä laskettu magneettivuon tiheys, jossa ei ole huomioitu suojakotelon vaikutusta, kerrotaan suojaustekijällä SE yhtälön 13 mukaan.

$$B = \frac{B_{anal}}{10^{\frac{SE}{20}}} = B_{anal} \frac{B_S}{B_0} \quad (13)$$

missä B on suojan huomioiva magneettivuon tiheys ja

B_{anal} on analyttisellä menetelmällä laskettu magneettivuon tiheys.

Jos kaikki virralliset johtimet eli kenttälähteet eivät ole suojakotelon sisäpuolella, kerroin huomioidaan vain kotelon sisällä olevien johdinosien kentissä. Kertoimen huomioiminen onnistuu parhaiten virran kautta, koska magneettivuon tiheys on suoraan verrannollinen johtimen virtaan. Tässä tapauksessa solmuvälin virtana käytetään yhtälön 14 mukaan laskettua virtaa.

$$I'_{solmu} = \frac{I_{solmu}}{\frac{SE}{10^{20}}} = I_{solmu} \frac{B_s}{B_0} \quad (14)$$

missä I_{solmu} on suojan huomioiva virta ja
 I_{solmu} on solmuvälin virta.

4 MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMISMENETELMIÄ

Vaimentamiseksi kutsutaan magneettikenttien pienentämistä käyttämällä erilaisia vaimennusmateriaaleja, joita ovat ferromagneettiset sekä johtavat materiaalit. Vähentäminen tarkoittaa kenttien pienentämistä teknisten muutostöiden avulla. Vähentäminen voidaan suorittaa lyhentämällä vaiheväliä tai muuttamalla johtimien sijoittelua symmetrisemmäksi, jolloin eri johtimien aiheuttamat kentät kumoavat tehokkaammin toisensa. Vähentämistä voidaan toteuttaa myös lyhentämällä johtojen pituutta.

Tässä kappaleessa esitetään pienentämismenetelmiin liittyvää teoriaa. Kappaleissa 5 - 7 tarkastellaan tässä kappaleessa esitettyjen pienentämismenetelmien vaikutuksia esimerkkien avulla.

4.1 Vaimentaminen ferromagneettisella levyllä

Ferromagneettisella vaimennusmateriaalilla suhteellinen permeabiliteetti (μ_r) on paljon suurempi kuin yksi, jolloin sen magneettivuon johtokyky on hyvä. Suojamateriaali toimii magneettivuon kulkureittinä, jolloin vuo saadaan kulkemaan vaimennuslevyn kautta. Jos suojaukseen käytetään kotelorakennetta, vuo saadaan myös sulkeutumaan siinä. Magneettisen suojamateriaalin avulla magneettikenttä suunnataan pois suojattavasta kohteesta ja sen takia magneettivuon tiheys suojattavan kohteen puolella pienenee, mutta kenttä kasvaa suojassa ja mahdollisesti myös suojan läheisyydessä. Syynä kentän kasvamiseen on, että energia on häviämätöntä. Käytännössä kuitenkin riittää, että magneettikenttä vaimenee suojattavan kohteen suunnassa, eikä vuo kululla suojassa ole merkitystä suojattavan kohteen kannalta. Tämän lisäksi magneettisessa materiaalissa syntyy hystereesihäviöitä, joiden ansiosta osa magneettikentän energiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Siksi magneettinen materiaali voi olla joissakin tilanteissa hyvä suojamateriaali.

Tehotasapainoyhtälön eli Poynting-teoreeman avulla voidaan tarkastella häviöiden vaikutusta magneettikenttään. Suoja ei vaimenna magneettikenttää koko tarkastelualueessa, suoja mukaan lukien, jos energian muotoa ei saada muuttumaan häviöiksi tai sähkökentäksi. Energia varastoituu suuripermeabiliteettiseen materiaaliin, jolloin energia siirtyy tarkastelualueella paikasta toiseen. Poynting-teoreema on esitetty yhtälössä 15.

$$-\int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \, dv = \frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) \, dv + \oint_S \mathbf{E} \times \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} \, da \quad (15)$$

missä V on tehtäväalueen tilavuus,
 S on tehtäväalueen pinta,
 \mathbf{n} on pinnan S normaalivektori,
 \cdot on pistetulo ja
 \times on ristitulo.

Poynting-teoreeman vasemman puoleinen termi on virroista aiheutuvat resistiiviset häviöt. Oikean puolen ensimmäinen termi sisältää sähkö- ja magneettikenttiin varastoituneen energian muutoksen. Oikean puolen toinen termi sisältää sähkömagneettisen säteilyn energian, joka käyttötaajuisien kenttien tapauksessa on yleensä pieni, koska sähkö- ja magneettikenttä esiintyvät käyttötaajuisilla kentillä toisistaan riippumattomina suureina.

Ferromagneettisesta materiaalista valmistettu suojakotelo toimii vaihtovirran aiheuttamien kenttien lisäksi staattisille ja erittäin matalataajuisille kentille. Tärkeimmät ferromagneettiset alkuaineet ovat rauta, nikkeli ja koboltti. Usein käytetään näistä seostamalla saatuja materiaaleja, esimerkiksi valurautaa, myymetallia ja kidesuunnattua tai -suuntaamatonta sähkölevyä [/36/](#).

4.2 Vaimentaminen hyvin sähköä johtavalla levyllä

AC-virralla syntyvä vaihtomagneettivuo indusoi hyvin sähköä johtavaan materiaaliin induktiovirran, jota kutsutaan pyörrevirraksi. Pyörrevirta aiheuttaa ympärilleen magneettivuon ja magneettikentän. Pyörrevirran suunta on Lenzin lain mukaisesti sellainen, että syntynyt magneettikenttä pyrkii kumoamaan aineeseen tunkeutuvaa indusoivaa magneettikenttää.

Aiemmin esitetystä yhtälöstä 15 nähdään, että hyvin johtavat materiaalit vaimentavat magneettikenttää indusoituvien pyörrevirtojen avulla. Pyörrevirroissa tapahtuu resistiivisiä häviöitä, jolloin myös resultoiva magneettikenttä vaimenee. Lisäksi magneettikentän energiaa voi siirtyä sähkökentän energiaksi, jolloin magneettikenttä pienenee. Sopivia materiaaleja ovat esimerkiksi alumiini ja kupari.

Indusoituneet virrat jakautuvat johdeaineessa ulkoisen magneettikentän määräämällä tavalla, jolloin virranjakoon vaikuttaa kentän tunkeutuminen materiaaliin. Tunkeutumista kuvaa käsite tunkeutumissyvyys. Tällä tarkoitetaan sitä etäisyyttä pinnasta, jolla kenttä on heikentynyt 37% alkuperäisestä [/36/](#). Tunkeutumissyvyyden kaava on esitetty yhtälössä 16.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \mu_r \sigma f}} \quad (16)$$

missä δ on sähkönjohtavuus ja
 f on magneettikentän taajuus.

Koska magneettikenttä ei pääse tunkeutumaan materiaalin sisään, indusoituu sähkökenttä pelkästään materiaalin pintakerrokseen. Tällä on suoraan vaikutusta suojamateriaalin paksuuden valintaan ja virrantiheyteen suojan pinnassa, joka on siten suojan pinnalla suurempi kuin sen sisällä.

4.3 Vähentäminen geometriaa muuttamalla

Sähkövirran synnyttämiä magneettikenttiä voidaan vaimentaa hajasijoittamalla johtoja. Eri vaiheiden johtimet kannattaa kuitenkin sijoittaa mahdollisimman lähelle toisiaan. Vaihevirratt kannattaa myöskin pitää mahdollisimman symmetrisinä. Aiemmin esitetyn yhtälön 15 mukaisesti geometrian avulla tapahtuvassa vähentämisessä vaihejohtimien magneettikentät kumoavat toisensa paremmin tai kenttiin sitoutunut energia muuttuu magneettikentästä sähkökenttään. Siksi magneettikenttä saadaan pienemmään.

Johtimissa voidaan normaalin vaakasijoittelun sijasta käyttää kolmiosisijoittelua tai jakaa johto useampaan osaan ja käyttää symmetrisiä sijoitteluja, jolloin päästään paljon alkuperäistä pienempiin kenttiin. Kun verrataan tasasivuisen kolmion kulmapisteisiin aseteltujen johtimien aiheuttamaa magneettivuon tiheyttä vaakatasossa olevaan johtoon, päästään noin 30% pienempään vuontiheyteen [/2/](#). Kenttä pienenee myös vaiheväliä lyhentämällä. Johtojen sähköinen mitoitus edellyttää kuitenkin, että johtimien väliin jää jännitetasosta riippuva ilmaväli.

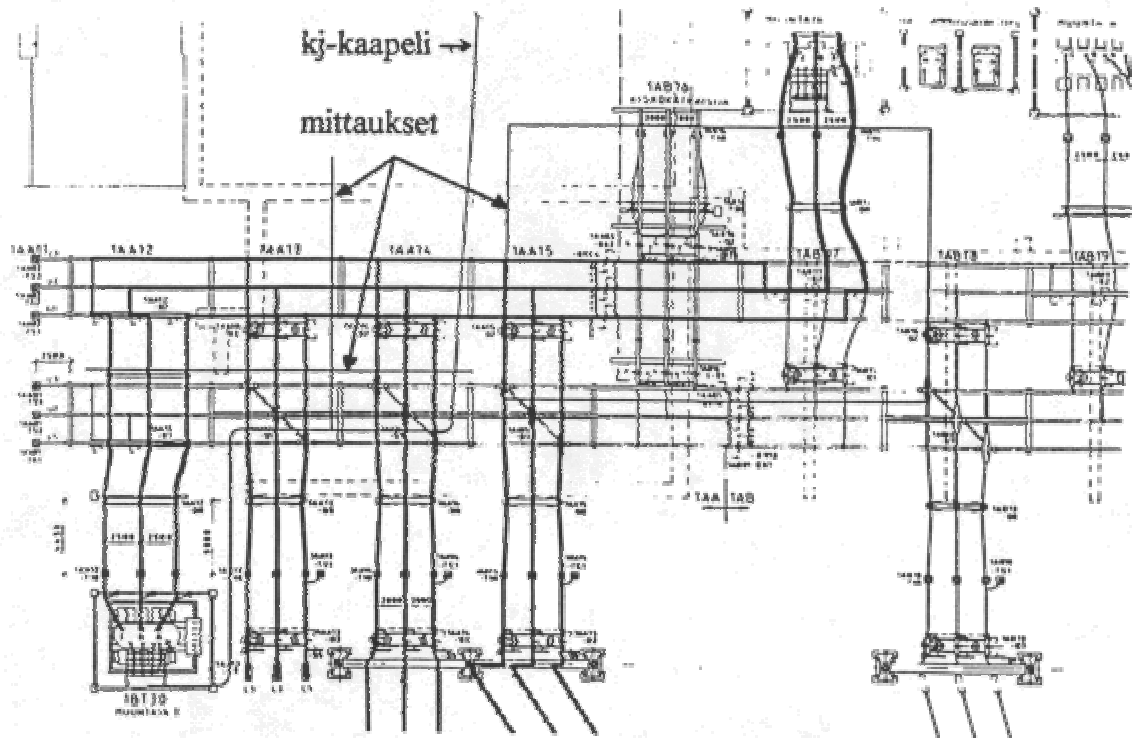
Kaksijohtimisen johdon tapauksessa niin kutsuttu koaksiaalikaapelin rakenne on mahdollisimman symmetrinen. Koaksiaalikaapelissa toinen johdin on kaapelin keskellä ja sitä ympäröi eristekerros. Toinen johdin on eristeen päällä eli se muodostaa vaipan sisemmän johtimen ympärille. Symmetrisen rakenteen ansiosta koaksiaalikaapelin aiheuttama magneettikenttä on erittäin pieni verrattuna muiden rakenteiden kenttiin. [/39/](#)

5 SÄHKÖASEMAN MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMINEN

Sähköaseman magneettikenttien esimerkkiä varten käytiin tutustumassa erääseen, rakenteeltaan tyypilliseen 110 kV sähköasemaan. Se sopi magneettikentätarkasteluihin hyvin, koska sähköaseman rakenne on yksinkertainen. Magneettivuon tiheys mitattiin kartoitusmittauksella ja kahdella 'linja'-mittauksella. Tarkasteluun valitulla sähköasemalla oli kaksikiskojärjestelmä, jonka kuormituksia pystytään jakamaan kiskostojen välillä. Kytkentätilanne olikin poikkeuksellisesti sellainen, jossa kaikki virta kulki toisessa kokoojakiskostossa ja toinen oli työmaadoitettu, koska sähköasemalla suoritettiin laajennustöitä.

5.1 Sähköaseman rakenne

Kuvassa 5.1 on esitetty sähköaseman 110 kV:n kytkinkentän pohjapiirros. Kuvaan on piirretty myös muuntajalta 3 lähtevä keskijännitekaapeli. Lisäksi kuvaan on merkitty kartoitettu alue ja linjamittaukset.



Kuva 5.1. Sähköaseman kytkinkentän pohjapiirros. Virralliset johtimet on vahvennettu.

Kuvassa näkyvät kaksi oikean puolimmaista kenttää olivat vasta rakenteilla. Mitatun sähköaseman pohjoisreunalla sijaitsee kaksi sähköasemarakennusta, joihin on sijoitettu 20 kV kojeistot ja automaatiolaitteet. Muuntajat ovat ulkona neliseinäisten betonisten bunkkereiden sisällä. Ulkotiloissa toisen muuntajan vieressä sijaitsee myös kaksi 20 kV:n sammutuskuristinta, joita käytetään verkon tilan sitä vaatiessa.

Sähköaseman kokoojakiskot ovat alumiiniputkea (halkaisijat 100/88 mm) ja kenttäjohtimet alumiiniköyttä (halkaisija 29 mm) tai alumiiniputkea (halkaisijat 40/30 mm). Kokoojakiskostot voidaan yhdistää toisiinsa kiskokatkaisijalla, joka voidaan huolto varten erottaa erottimilla. Kiskokatkaisija on sähköasemalla kiskokatkaisijakentässä. Kiskokatkaisijaa voidaan käyttää varakatkaisijana ja lähtöjen suojausten täydentämiseen.

Kytkinkentällä on kiskokatkaisijakentän lisäksi viisi muuta kenttää, joista kaksi on 110/20 kV:n muuntajakenttiä, yhdestä kentästä tulee syöttö sähköasemalle ja kaksi kenttää on johtolähtöjä varten. Sähköasemalle tulee lisäksi laajennuksen valmistuttua yksi kenttä johtolähtöä varten ja yksi 110/20 kV:n muuntajakenttä.

Kaikilla kentillä voidaan ottaa syöttö erottimen kautta kummalta tahansa kokoojakiskostolta. Erottimilla saadaan myös näkyvä avausväli. Jokaisella kentällä on oma katkaisija suojausta varten. Kaksi kokoojakiskostoa mahdollistaa erilaisten kuormien ryhmittelyn omille kiskostoilleen ja verkon osien oikosulkutehon pienentämisen. Jokaisella kentällä on suojausvirtamuuntaja virran seurantaan varten. Molemmilla muuntajakentillä on lisäksi mittausvirtamuuntaja laskutustietojen keräämistä varten.

Sähköasemalla kulkee useita ohjaus- ja signaalikaapeleita laitteiden ja kojeistotilojen välillä sekä mittauskaapelit virtamuuntajien ja kojeistotilojen välillä. Lisäksi yksi johtolähtö kulkee sähköasemalla etelästä pohjoiseen 20 kV:n maakaapelina. Kaikki kaapelit ovat upotettuina omissa kaapeliputkissa kaapelikanaviin, jotka ovat 0,3 - 0,7 metrin syvyydessä. Kaapeliputket on eristetty mekaanisilta rasituksilta hiekalla ja hiekkakerroksen päällä olevalla täytesoralla.

5.2 Sähköasemalla suoritettut mittaukset

Sähköasemalla mitattiin magneettivuon tiheys kartoitusmittauksella ja kahdella linjamittauksella. Mittausajalta mitattiin myös lähdöillä siirrettyä kuormitusvirtaa. Kartoituksessa magneettivuon tiheys mitataan tietyin välein määrättyä alueelta. Linjamittauksessa mitataan tavallaan leikkaus magneettikentästä, jolloin mittauspisteet ovat samalla suoralla.

5.2.1 Kartoitusmittaus sähköasemalla

Kartoitusmittauksessa oli enemmän mittauspisteitä kuin linjamittauksessa, joten se tehtiin ensin. Sähköasemalla magneettivuon tiheys kartoitettiin muuntajan 4 kentältä, koska se on reunimmaisena kenttänä, ja viereinen kiskokatkaisijakenttä oli mittausten aikaan jännitteettömänä. Erillisen sijainnin lisäksi sen valintaan vaikutti se, että muuntajalähdöstä oli mahdollista mitata virta kaikista vaiheista. Mittausten aikana kuormitus pysyi suhteellisen tasaisena, ja oli noin 25 MW. Sen seurauksena myös magneettivuon tiheys pysyi tasaisena.

Kartoitus tehtiin 20 × 30 metriä suuruisella alueella. Mittausalueen sijainti valittiin niin, että yksi suorista oli tarkasti muuntajakentän keskimmäisen vaihejohtimen kohdalla ja suorilla oli mittaus kokoojakiskojen kohdalla.

Mittaussuorien paikat mitattiin ja merkittiin ennen mittauksia. Suoralle kiristettiin mittanauha, jonka avulla määritettiin mittauspaikat. Mittaukset tehtiin kahden metrin välein, koska vaihevälit olivat likimain sen suuruisia. Mittausvälin valintaan vaikutti myös mittausten kokonaisaika järjestelyineen, joka kahden metrin välein mitattaessa oli noin 3,5 tuntia. Se olisi yhden metrin mittausvälillä ollut likimain kaksinkertainen.

Mittausta varten merkittiin maahan 16 mittaussuoraa. Mittanauha pingotettiin merkkien välille siten, että nauha lähti mittausalueen luoteesta olleesta nurkasta ja kiristettiin lounaassa olleeseen nurkkaan. Mittaukset tehtiin puolen minuutin välein, jonka aikana mitattiin magneettivuon tiheys ensin 1,0 metrin ja sitten 0,5 metrin korkeudella. Mittauskorkeudet merkittiin muovikeppiin. Mittaukset etenivät pohjoisesta etelän suuntaan.

Mittaukset teki TTKK:lta kaksi henkilöä ja yksi sähköyhtiön henkilökuntaan kuuluva. Magneettivuon tiheys mitattiin Radians Innovan ML-1 -tyyppisellä magneettikenttämittarilla. Mittauspöytäkirjassa oli valmiina kellonajat nollasta lähtien. Mittausten alkaessa käynnistettiin kello. Jokaisen mittaushetken molempien mittauskorkeuksien tulokset merkittiin mittauspöytäkirjaan oikean kellonajan kohdalle. Pöytäkirjaan jätettiin tyhjä rivi, jos mittausta ei

ehditty tekemään joka minuutilla. Tyhjän rivin syynä oli esimerkiksi siirtyminen seuraavalle mitattavalle suoralle.

Mittaus eteni suora kerrallaan lännestä itään. Jokaiselta suoralta mitattiin magneettivuon tiheys 11 paikasta kahden metrin välein. Kartoitussmittauksessa oli siis yhteensä 176 mittauspistettä, joiden mittaaminen kesti noin 1,5 tuntia.

5.2.2 Linjamittaus sähköasemalla

Linjamittaus tehtiin käytössä olleen kokoojakiskoston kohdalta etelä-pohjoinen-suunnassa ja etelän puoleisten neljän johtolähdön kohdalta itä-länsi-suunnassa. Linjamittaukset valittiin siten, että mittauksia pystyttiin vertaamaan suunniteltuihin elementtimenetelmällä laskettaviin kentätuloksiin.

Itä-länsi-suunnassa tehdyn mittauksen paikka valittiin niin, että mittaussuora jatkui suoraan kartoituksen mittauspisteillä. Etelä-pohjoinen-suunnassa tehty mittaus oli kohtisuorassa itä-länsi-suunnassa tehtyä mittausta vastaan, ja niillä oli yksi yhteinen mittauspiste.

Linjamittaus tapahtui muuten samalla tavalla kuin kartoitusmittaus, mutta kerralla mitattiin vain yksi suora. Itä-länsi-suunnassa oli 15 mittauspistettä ja etelä-pohjoinen-suunnassa 11. Linjamittaukset kestivät yhteensä noin 20 minuuttia.

5.2.3 Virran mittaus sähköasemalla

Virtamittaukset teki TTKK:lta yksi henkilö ja yksi sähköyhtiön henkilökuntaan kuuluva. Virta mitattiin samaan aikaan kuin magneettikenttä. Kartoituksen aikana mitattiin muuntajakentästä 110 kV ja 20 kV johtimien vaihevirrät. 110 kV johtimien vaihevirrät mitattiin mittausvirtamuuntajan toisiosmittausliittimistä, joihin kytkettiin yleismittari. Virtamuuntajien muuntosuhde oli 300/5, jolla kerrottiin mitatut arvot todellisiksi virroiksi. 20 kV johtimien vaihevirrät määritettiin lukemalla kaukokäyttöjärjestelmän avulla muuntajan 4 alajännitepuolen vaihevirrät.

Kartoituksen aikana virrat olivat melko symmetrisiä ja stabiileja. Suurin hetkellinen ero vaihevirtojen välillä oli 110 kV puolella 8,4 A ja 20 kV puolella 9,0 A. Vaihevirtojen keskihajonta mittausten ajalta oli 110 kV puolella 35,3 A ja 20 kV puolella 74,7 A. Virran stabiilisuuden lisäksi mittaussvälin valintaan vaikutti myös se, että kaukokäyttöjärjestelmä päivitti virtatietoja usein yli puoli minuuttia, joten virrat määritettiin yhden minuutin välein.

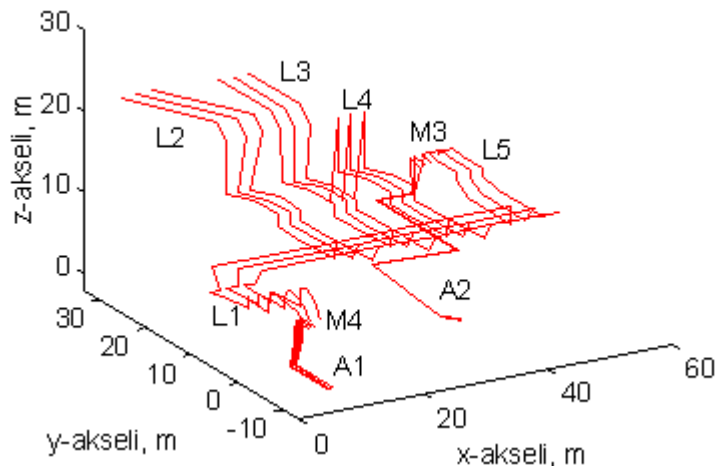
Linjamittausten aikana määritettiin kaukokäyttöjärjestelmän avulla yhden vaiheen virta kaikista lähdöistä sekä tehon siirtosuunta virran etumerkin määrittämistä varten. Virtalukemat merkittiin yhden minuutin välein.

5.3 Sähköaseman magneettivuon tiheyden laskenta

Sähköasemalla tehtyjen virtamittausten tulosten avulla laskettiin sähköaseman magneettikenttä analyyttisellä menetelmällä ja lisäksi suorien osalta elementtimenetelmällä. Laskennan tuloksia arvioitiin vertaamalla tuloksia mitattuihin.

5.3.1 Alueiden laskenta

Analyttistä laskentamenetelmää varten määritettiin sähköaseman johtimien koordinaatit, kun origo oli mittausalueen koillisessa kulmassa. Sähköaseman laskentamalli koostui 12 kolmevaiheisesta johtimesta ja 149 solmupisteestä. Analyttinen laskentamalli on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Suorista johdinpätkistä koostuva analyttisen laskentamenetelmän malli. Kuvassa L1 - L5 ovat 110 kV lähdet, M3 ja M4 ovat muuntajat, A1 ja A2 ovat 20 kV lähdet. Virrat on esitetty taulukossa 5.1.

Muuntajan 4 vaihevirroista laskettiin keskiarvot sekä 20 kV että 110 kV jänniteportaassa. Vaihevirtojen avulla laskettiin vaihekulmat olettaen, että vaihevirtojen summa johdolla on nolla. Laskentamallissa käytettiin koko 110 kV jänniteportaalle samoja vaihekulmia, koska tarkkoja vaihekulmia tai tehojakoa ei ollut tiedossa. Vaihekulmat saadaan säteittäisellä verkolla määritettyä tällä tavoin, mutta jos verkossa pääsee syntymään silmukoita, näin määritetyt virrat saattavat poiketa todellisista.

Muilla kentillä vaihevirit saatiin yksivaiheisten virtatietojen keskiarvojen avulla kiinnittämällä yhdeksi vaihevirit laskettu keskiarvo ja muuntajan virroille määritetyt vaihekulmat, jolloin saatiin laskettua muiden vaiheiden virrat. Kokoojakiskoston virta saatiin summaamalla Kirchoffin 2. lain mukaisesti solmupisteessä virtojen summa nollassi. Laskennassa käytetyt vaihevirit ja -kulmat on esitetty taulukossa 5.1.

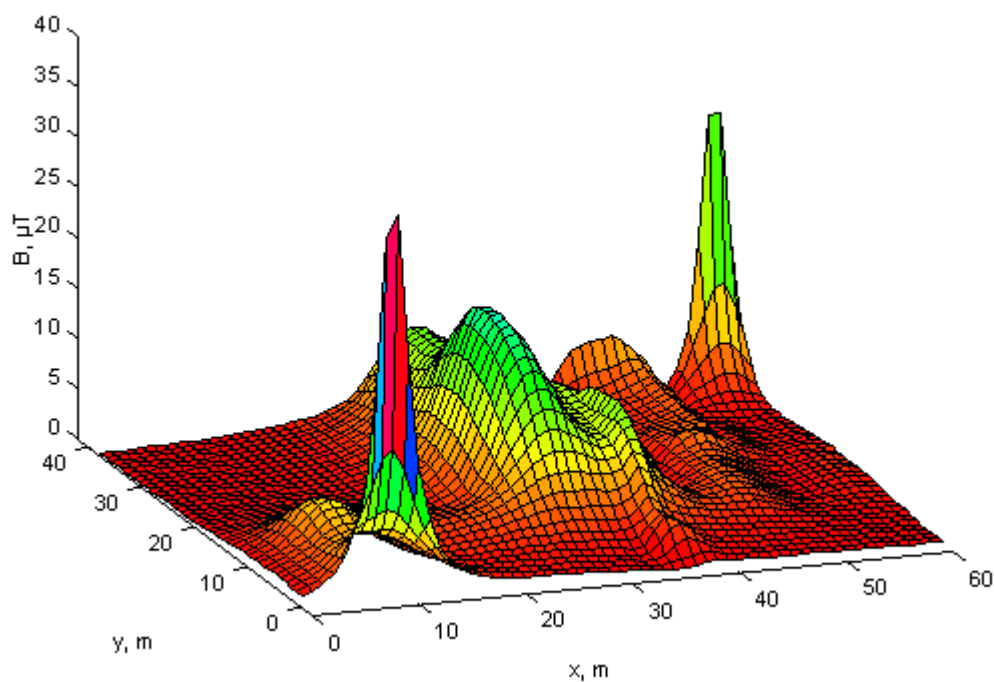
Taulukko 5.1. Analyttisessä laskentamallissa käytetyt vaihevirit.

lähtö	I_R / A	I_S / A	I_T / A
A1	705,7 \angle 0,0	701,2 \angle -120,2	701,6 \angle 120,2
A2	190,9 \angle 0,4	188,1 \angle -120,9	185,4 \angle 120,5
L1	133,2 \angle 0,4	131,1 \angle -120,9	129,5 \angle 120,5
L2	329,1 \angle 180,4	323,9 \angle 59,1	320,0 \angle 300,5
L3	137,8 \angle 0,4	135,6 \angle -120,9	134,0 \angle 120,5
L4	69,8 \angle 0,4	68,7 \angle -120,9	67,9 \angle 120,5
L5	34,7 \angle 0,4	34,2 \angle -120,9	33,7 \angle 120,5

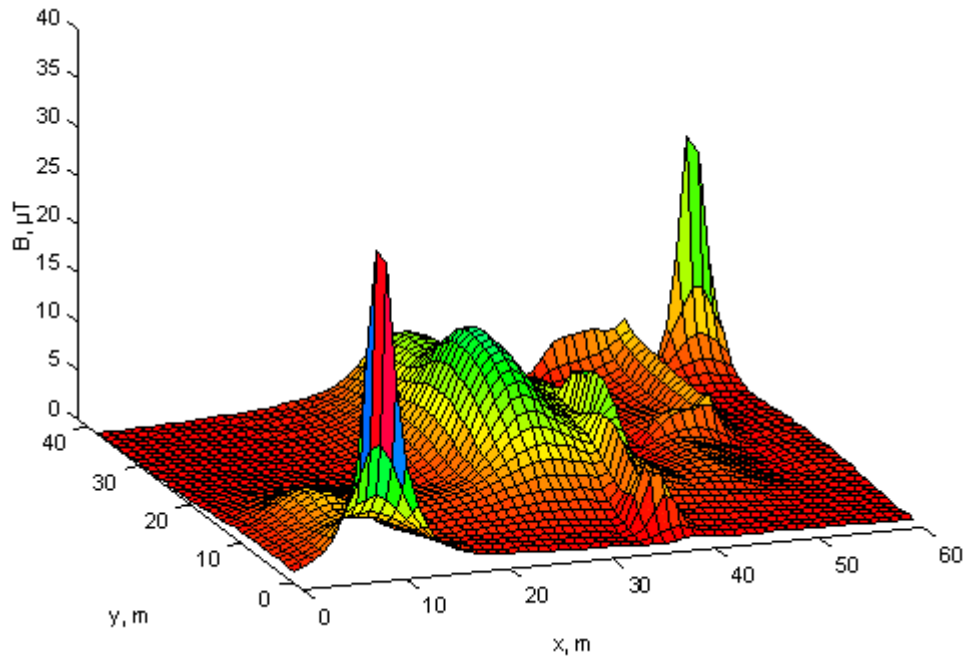
Vaikka mitattujen vaihevirtojen L1 ja A1 keskiarvot ovat lähes symmetrisiä, hetkellisesti esiintyi kymmenien ampeerien eroja vaihevirtojen välillä. Eri lähdöissä tehdyt mittaukset eivät olleet synkronisia ja mittauksissa käytettiin suojausvirtamuuntajia, joiden tarkkuus ei ole kovin hyvä. Tästä syystä lähdöistä L1, L3, L4 ja L5 laskettu vaihevirtojen summat ovat erisuuria kuin lähdön L2 vaihevirta, joten samojen vaihekulmien oletus koko sähköasemalla ei ole täysin oikein.

Kytinkentän tulokset

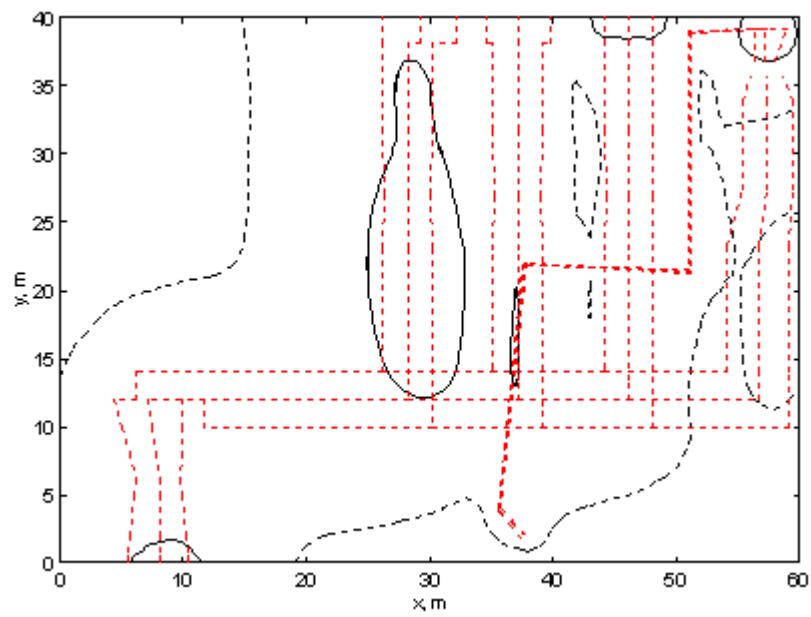
Aluksi laskettiin magneettivuon tiheys koko kytinkentällä, jotta saataisiin magneettivuon tiheyksistä yleiskuva. Laskennalla saatiin selville myös suurimpien kenttien aiheuttajat. Lähtötietoina käytettiin kuvan 5.2 laskentamallia ja taulukon 5.1 vaihevirtoja. Laskenta tehtiin sekä 1,0 metrin että 0,5 metrin korkeudelta. Tulokset on esitetty kuvissa 5.3 - 5.6.



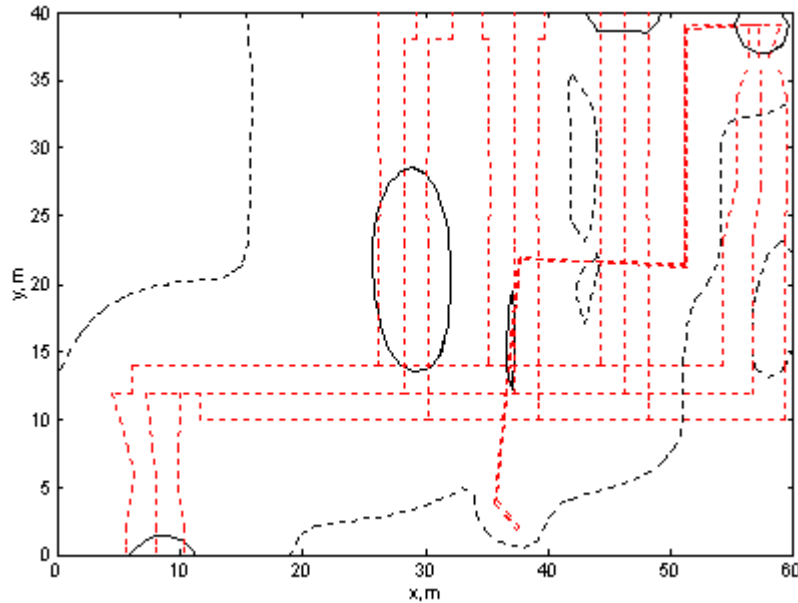
Kuva 5.3. Analyttisen laskentamallin tulokset karttapintakuvana koko kytkinentällä 1,0 metrin korkeudella.



Kuva 5.4. Analyttisen laskentamallin tulokset karttapintakuvana koko kytkinentällä 0,5 metrin korkeudella.



Kuva 5.5. Analyttisen laskentamallin tulokset tasa-arvokäyrinä koko kytkinkentällä 1,0 metrin korkeudella (katkoviiva 1,0 μT , yhtenäinen viiva 10 μT). Virtajohtimet on esitetty suoralla katkoviivalla.



Kuva 5.6. Analyttisen laskentamallin tulokset tasa-arvokäyrinä koko kytkinkentällä 0,5 metrin korkeudella (katkoviiva 1,0 μT , yhtenäinen viiva 10 μT). Virtajohtimet on esitetty suoralla katkoviivalla.

Suurimmat magneettivuon tiheydet esiintyvät kuvien perusteella muuntajien alajännitepuolen kaapeleilla siellä, missä kaapelit menevät muuntajien kansilta maahan. Näissä kohdissa tarkasteluetaisyys kaapeleihin on pienin ja toisaalta virta on alajännitepuolella suurempi kuin yläjännitepuolella, mikä vaikuttaa myös magneettivuon tiheyteen.

Kuvien 5.3 ja 5.4 mukaan jokaisen lähdön osalta voidaan todeta, että magneettivuon tiheys on suurin siellä, missä johtimet ovat matalalla tai vaiheväli on suurin. Johtimet ovat kullakin lähdöllä matalimmalla jännitteettömän kiskon kohdalla. Suurin vaiheväli on samalla kohdalla. Pienimmät kentät ovat vastaavasti siellä, missä johtimet ovat korkealla tai vaiheväli on pieni. Lähtöjen johtimet ovat korkeimmalla katkaisijan ja virtamuuntajan välissä ja vaiheväli on pienin katkaisijan kohdalla.

Kuvia 5.3 ja 5.4 vertaamalla havaitaan, että käyrien muoto on merkittävästi muuttunut vain maakaapelin A2 kohdalla. Magneettivuon tiheys on kuvassa 5.4 kaapelien kohdalla suurempi, koska kaapelin tarkasteluetaisyys on 0,5 metrin mittauskorkeudella pienempi.

Kuvien 5.5 ja 5.6 perusteella suurimmat arvot ovat muuntajien alajännitepuolen kaapeleiden lähellä. Tarkastelukorkeus ei juurikaan vaikuta suurimpiin arvoihin. Esimerkiksi muuntajan 3 kohdalla magneettivuon tiheys on noin 400 μT .

Taulukosta 5.1 havaitaan 110 kV virtoja vertaamalla, että lähdön L2 virta on suurin. Kuvista 5.5 ja 5.6 havaitaan, että myös magneettivuon tiheyden arvot ovat suurimpia lähdön L2 kohdalla. Vastaavasti lähdön L5 virta ja kenttä on pienin.

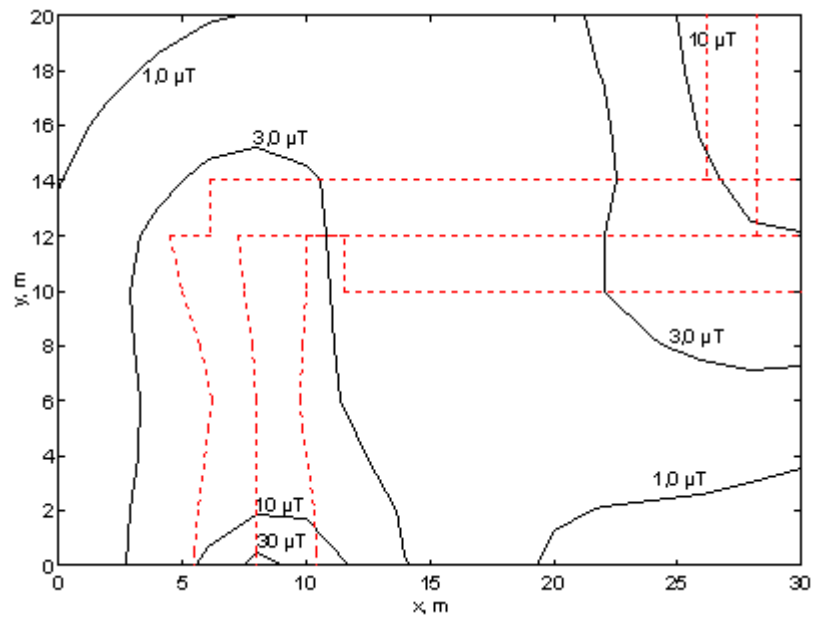
Magneettivuon tiheys on suurimmillaan taulukon 5.2 mukainen, mikä voidaan todeta myös kuvista 5.5 ja 5.6. Lähtö A1 ei ole laskenta-alueella. Suurimmat arvot ovat lähdön A2 osalta muuntajan M3 alajännitepuolen kohdalla ja muilla lähdöillä erottimien kohdalla. Taulukossa on esitetty molempien mittauskorkeuksien tulokset.

Taulukko 5.2. Sähköaseman suurimmat magneettivuon tiheyden arvot lähtöjen kohdalta (saatu laskemalla).

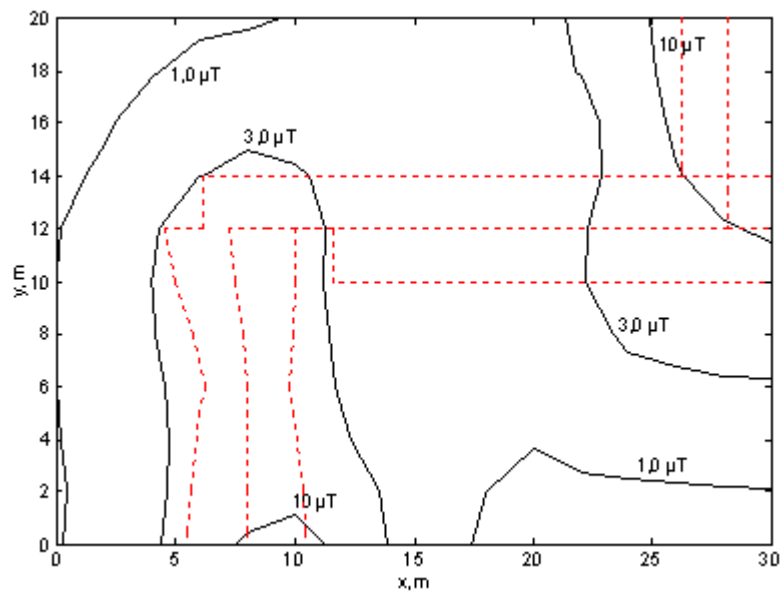
lähtö	mittauskorkeus	B / μT	B / μT
		1,0 m	0,5 m
A2		384	290
L1		5,7	4,7
L2		16	13
L3		9,0	7,4
L4		2,4	2,0
L5		1,0	0,7

Kartoitetun alueen tulokset

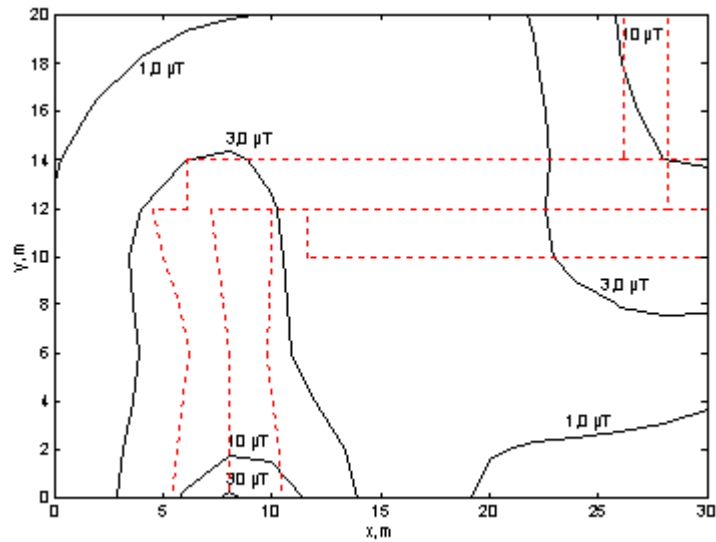
Kartoitettu alue laskettiin analyyttistä menetelmää käyttäen. Laskentatulokset on esitetty kuvissa 5.7 ja 5.9, sekä vastaavat mittaustulokset kuvissa 5.8 ja 5.10.



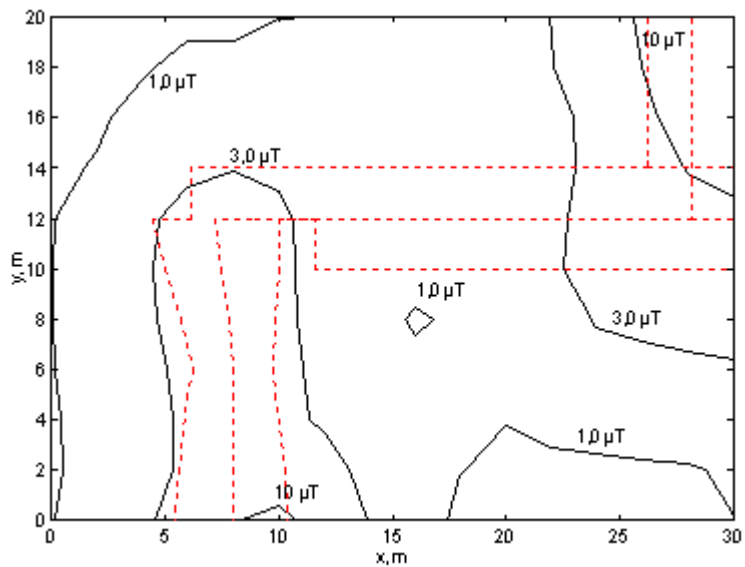
Kuva 5.7. Analyttisen laskentamallin tulokset tasa-arvokäyrinä tarkastelualueella 1,0 metrin korkeudella. Kuvassa virtajohtimet on esitetty katkoviivalla.



Kuva 5.8. Mittausten tulokset tasa-arvokäyrinä tarkastelualueella 1,0 metrin korkeudella. Kuvassa virtajohtimet on esitetty katkoviivalla.



Kuva 5.9. Analyttisen laskentamallin tulokset tasa-arvokäyrinä tarkastelualueella 0,5 metrin korkeudella. Kuvassa virtajohtimet on esitetty katkoviivalla.



Kuva 5.10. Mittausten tulokset tasa-arvokäyrinä tarkastelualueella 0,5 metrin korkeudella. Kuvassa virtajohtimet on esitetty katkoviivalla.

Kuvia vertaamalla voidaan todeta, että laskenta vastaa molemmilla tarkastelukorkeuksilla hyvin mittauksia. Suurin ero mitattuihin arvoihin 1,0 metrin korkeudella on 68%. 0,5 metrin korkeudella suurin ero on 71%. Molemmilla korkeuksilla suurin ero on muuntajan alajännitepuolen alaspientien kohdalla. Siihen vaikuttaa mittauspisteiden paikan tarkan mittaamisen vaikeus. Alajännitepuolen kaapelien ja mittauspisteiden välillä oli betoniseinä, joten mittauspisteiden paikkoja ei voitu määrittää kaapeleiden perusteella. Koska mittauksissa juuri kaapelien etäisyyden herkkyys on

suurin, vaikuttaa sen määrittämisen epätarkkuus eniten mittauksien epätarkkuuteen. Tuloksiin vaikuttaa myös mittausten aikana muuttunut virta, joka oli esimerkiksi lähdöllä L1 mittausten alkaessa 2,7% suurempi kuin virran keskiarvo ja mittausten loppuessa 4,5% pienempi. Muuntajan lähellä tehtyjen mittausten aikana virta oli 20 kV jännitetasolla noin 1,3% pienempi kuin virran keskiarvo mittausten ajalta.

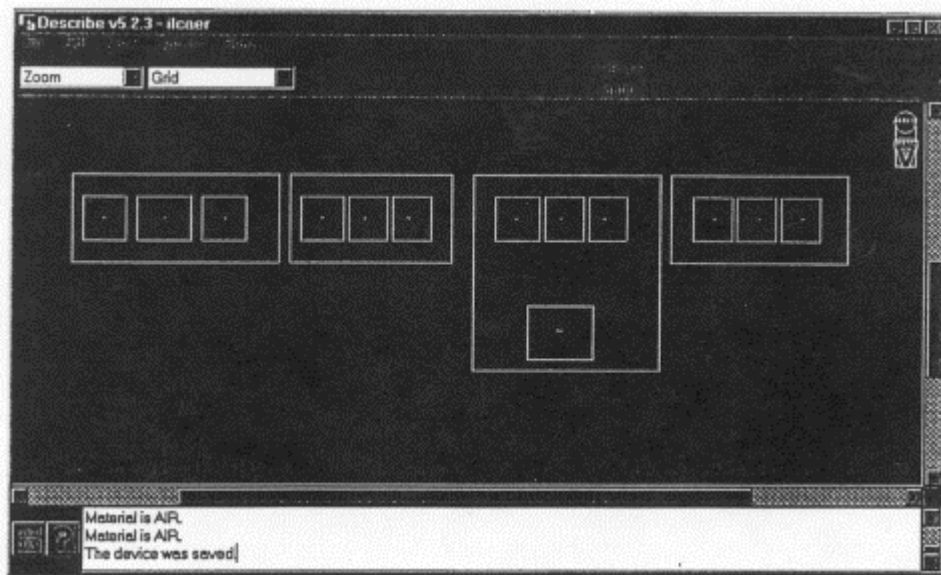
Kuvia 5.6 ja 5.8 vertaamalla havaitaan, että tarkastelukorkeus vaikuttaa sähköaseman magneettivuon tiheyteen. Jos sähköaseman johtimet ja laitteet nostettaisiin ylemmäksi, magneettivuon tiheys pienenesi.

5.3.2 Leikkausten laskenta

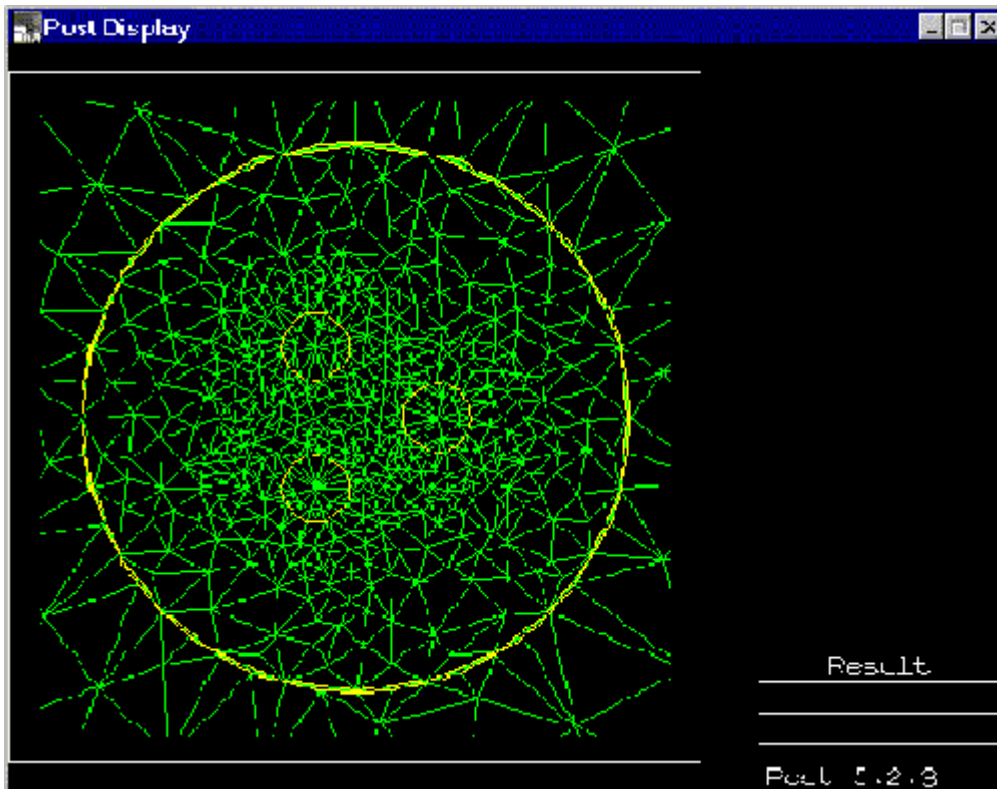
Leikkausten laskentaan käytettiin analyttistä laskentamenetelmää ja elementtimenetelmää. Analyttisenä laskentamallina käytettiin samaa mallia kuin käytettiin alueiden laskemisessa. Elementtimenetelmän laskentamalli tehtiin sähköaseman rakennepiirustuksien avulla, mutta käytettiin kaksidimensioista laskentamallia. Laskentamenetelmien tuloksia verrattiin keskenään ja mittauksiin.

Elementtimenetelmässä käytetty laskentamalli

Laskentaan käytettiin MagNet 5.2.3 -ohjelmaa, jonka elementtiverkko muodostetaan adaptiomekanismin avulla. Adaptiomekanismi perustuu verkon uudelleenmuodostamiseen sen perusteella, miten verkon muutos parantaa magneettikentän laskentaa. Ohjelma hyväksyy muodostetun verkon ratkaisun, jos laskennan tulos paranee määriteltävää toleranssia vähemmän. Elementtimenetelmän laskentaverkon muodostamista varten tehty malli itä-länsi-suunnassa tehdyssä laskennassa on esitetty kuvassa 5.11. Mallissa on huomioitu neljä 110 kV:n lähtöä, L2 - L5 ja muuntajalta 3 tuleva maakaapeli A2. Pohjoinen-etelä-suunnassa tehdyn laskennan elementtiverkko on esitetty kuvassa 5.12. Mallissa on huomioitu käytössä ollut kokoojakiskosto.



Kuva 5.11. MagNet-ohjelman näyttö laskennan mallista itä-länsi-leikkauksessa.

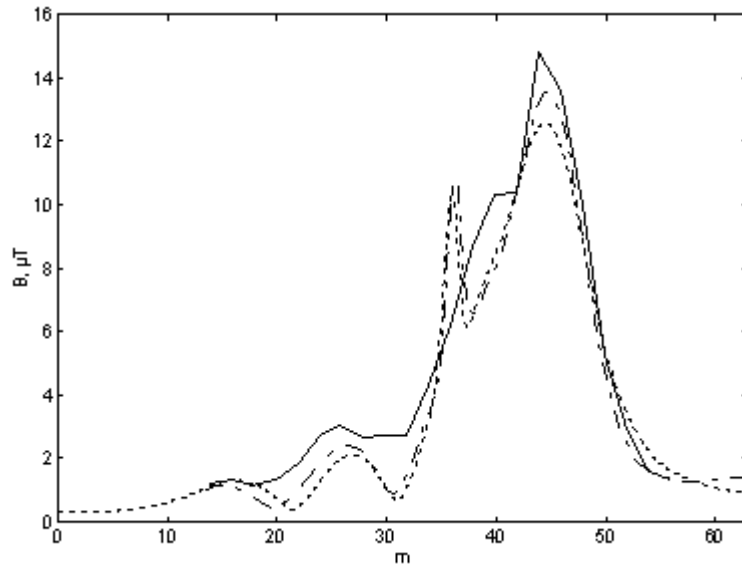


Kuva 5.12. MagNet-ohjelman näyttö elementtijaosta pohjoinen-etelä-leikkauksen laskentamallissa.

Adaptiomekanismi tihensi verkon huomattavan tiheäksi johtojen kohdilla ja jätti erittäin harvaksi reunoilta. Koska magneettivuon tiheyden arvot kiinnostavat nimenomaan maan pinnalla, laskentatarkkuus haluttiin hyväksi myös siellä. Tämän vuoksi geometriaan tehtiin apualueita, jotka ohjasivat adaptiomekanismin toimintaa siten, että elementit jakautuivat tasaisesti. Apualueita oli kuvan 5.11 elementtiverkon tekemisessä yhteensä 10 ja kuvan 5.12 tekemisessä yhteensä 3.

Itä-länsi-laskentasuoran tulokset

Laskenta tehtiin analyttisellä menetelmällä ja elementtimenetelmällä. Kuvassa 5.13 on esitetty 0,5 metrin korkeudella laskennan tulosten lisäksi vastaavat mittaustulokset. Kuvan 5.13 origo on 16 metriä lähdön L5 reunalta.

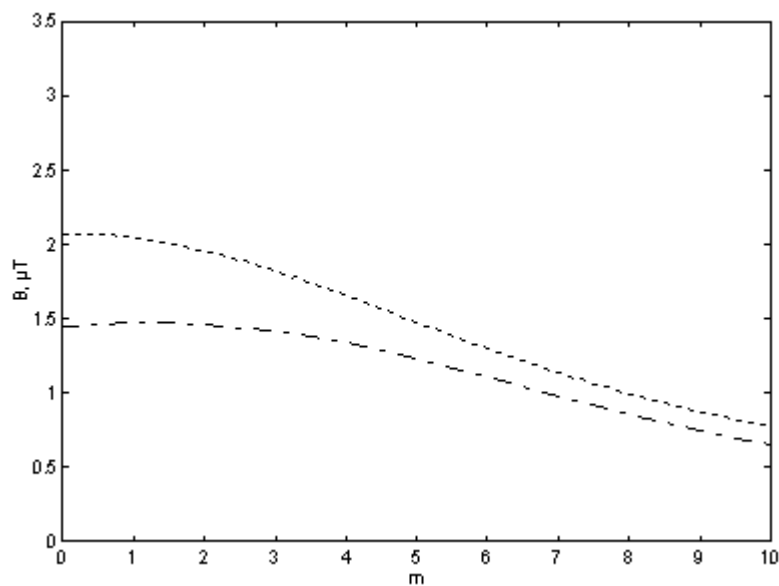


Kuva 5.13. Itä-länsi-suunnassa lasketut ja mitatut magneettivuon tiheyden arvot sähköasemalla tehdyn linjamittauksen kohdalta. Kuvassa yhtenäinen viiva on mittaustulokset, katkoviiva on elementtimenetelmän ja pistekatkoviiva on analyttisen menetelmän tulokset.

Laskennan ja mittauksen suurin ero syntyy lähinnä kaapelin A2 kohdalla, jonka vaikutus magneettivuon tiheyteen on mittausten mukaan laskettua pienempi. Suurin laskennoissa tullut ero mitattuihin arvoihin oli lähes $5 \mu\text{T}$ kaapelin kohdalla. Muualla ero on $1 \mu\text{T}$ luokkaa.

Pohjoinen-etelä-laskentasuoran tulokset

Laskenta tehtiin analyttisellä menetelmällä ja elementtimenetelmällä. Kuvassa 5.14 on esitetty $0,5$ metrin korkeudella laskennan tulokset. Kuvan 5.14 origo on keskimmäisen kokoojakiskon kohdalla.



Kuva 5.14. Pohjoinen-etelä-suunnassa lasketut magneettivuon tiheyden arvot sähköasemalla tehdyn linjamittauksen kohdalta. Kuvassa katkoviiva on elementtimenetelmän ja pistekatkoviiva on analyttisen menetelmän tulokset.

Ero syntyy muun muassa siitä, että analyttisessä laskentamallissa huomioidaan kaikkien lähtöjen vaikutus magneettivuon tiheyteen. Elementtimenetelmän mallissa huomioidaan ainoastaan kokoojakiskon vaikutus kenttään. Suurin elementtimenetelmän laskennassa tullut ero analyttisen mallin laskentaan oli noin $0,6 \mu\text{T}$. Mittauksia ei voinut verrata laskentaan, koska kokoojakiskoston virtaa ei tunnettu riittävän tarkasti.

5.3.3 Laskennan vertailu eri menetelmillä

Analyttinen menetelmä soveltuu hyvin magneettivuon tiheyden laskemiseen erilaisilla alueilla. Menetelmän käyttäminen on helppoa ja sillä muodostettava laskentamalli on selkeä ja yksinkertainen. Suurimmat virheet laskentaan aiheutuvat laskennan lähtötiedoista, kuten rakenteiden mitoista ja laskennassa käytetyistä virroista.

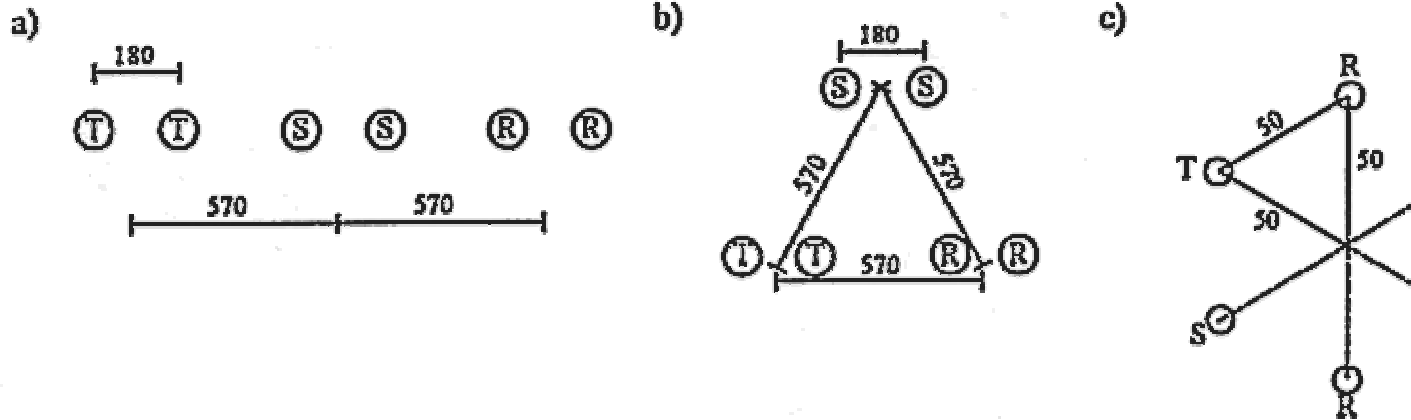
Eniten kartoitetun alueen laskentatuloksiin vaikutti se, että geometriaa tai virtaa ei tunnettu riittävän tarkasti. Analyttisen menetelmän laskentatulosten vertailu mittaustuloksiin oli yksinkertaista, koska laskettavat pisteet sai määriteltyä samoiksi kuin mittauspisteet. Linjamittauksien osalta ongelmana oli virta, jota ei tunnettu riittävän tarkasti. Virtojen määrityksen epätarkkuuden vuoksi vaihevirtojen summa ei ollut nolla. Virtojen epätarkkuuden seurauksena etelä-pohjoinen-suunnassa tehtyjen mittausten vertaaminen laskentaan ei onnistunut.

Leikkausten magneettikenttien määrittämisessä käytettiin analyttisen laskentamenetelmän lisäksi elementtimenetelmää. Sitä ei voinut käyttää kartoitusmittausten vertailussa, koska menetelmällä voitiin laskea ainoastaan kaksiulotteisia magneettikenttiä, mutta elementtimenetelmä sopii linjamittausten tulosten vertaamiseen. Mitatut ja lasketut tulokset vastasivat melko hyvin toisiaan.

5.4 Magneettikenttien pienentäminen sähköasemalla

Sähköaseman magneettikenttien systemaattiselle pienentämiselle on vaikea löytää perusteluja, koska siellä esiintyvät magneettivuon tiheydet ovat suhteellisen pieniä. Suurimmat mitatut arvot esimerkkitapauksessa olivat alle $40 \mu\text{T}$. Pienentämisen syynä tulee kysymykseen lähinnä sähköasemalla tehtävien mittausten häiriöt, jolloin signaalikaapelien sijoittamisessa kannattaa käyttää laskettuja magneettivuon tiheyksiä apuna. Signaalijohtimet kannattaa sijoittaa sinne, missä magneettivuon tiheys on pienin.

Suurimmat magneettivuon tiheyden arvot olivat muuntajien alajännitepuolen kaapeleiden alasvientien kohdalla. Magneettikenttien pienentämisessä niiden suunnittelulla onkin suuri merkitys. Esimerkkitaapauksen alasvienti oli toteutettu kuudella vierekkäisellä johtimella. Vähentämiskeinoina tarkasteltiin kolmion kulmapisteisiin sijoitettua johtoa ja sekoitettua vaihejärjestystä, jossa vaihejohtimet ovat symmetrisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Eri alasvientimahdollisuudet on esitetty kuvassa 5.15.



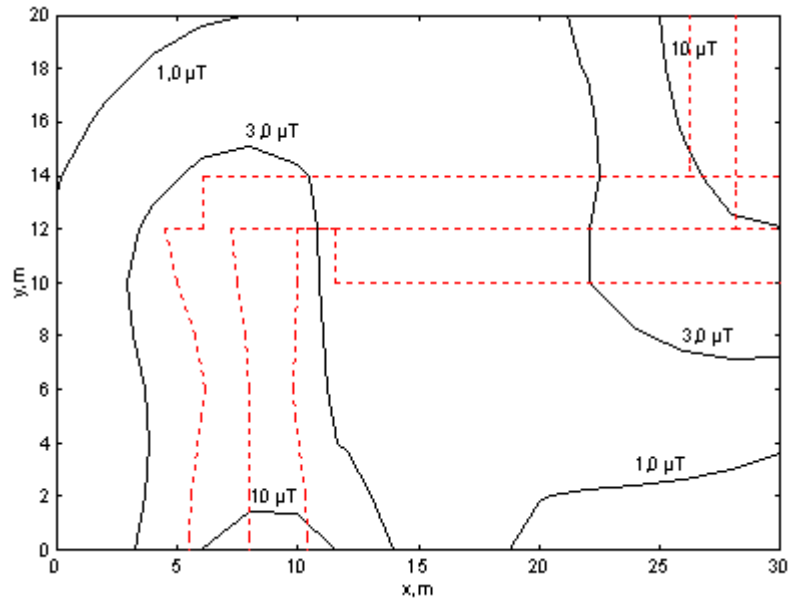
Kuva 5.15. Muuntajan alajännitepuolen alasvienti ja kenttien pienentämiskeinot: a) johto tasossa b) johto kolmion kulmapisteissä c) sekoitettu vaihejärjestys, jossa vaiheväli mahdollisimman pieni.

Toinen keino magneettikenttien pienentämisessä on sähköaseman johtojen ja laitteiden nostaminen korkeammalle. Aikaisemmin esitettyjä kuvia 5.7 ja 5.9 vertaamalla havaitaan, että tarkastelukorkeus vaikuttaa huomattavasti sähköaseman magneettivuon tiheyteen. Jos sähköaseman johtimet ja laitteet nostettaisiin 0,5 metriä ylemmäksi, magneettivuon tiheys pienenesi keskimäärin koko asemaa tarkasteltaessa 6,9%. Tulosten keskihajonta on 5,3%. Laskennan avulla määritettyyn tulosten keskihajontaan ei vaikuta virran muuttuminen, ainoastaan sähköaseman geometria. Kaapelit aiheuttavat kuitenkin vertailuun epätarkkuutta, koska kuvia vertaamalla niidenkin asennussyvyys tavallaan muuttuu.

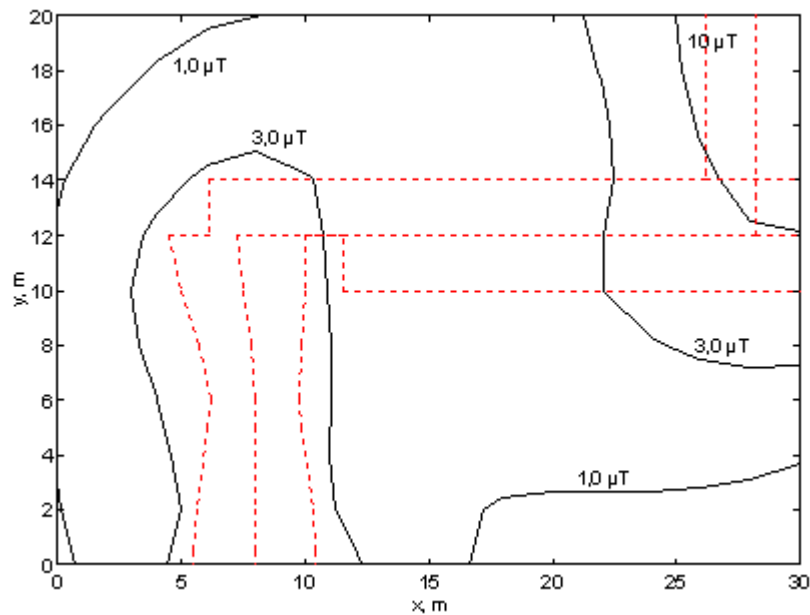
Aikaisemmin esitettyjä mittaustulosten kuvien 5.8 ja 5.10 perusteella saatava johtimien korkeuden vaikutus on keskimäärin 9,5% ja sen keskihajonta on 5,3%, joten mittaukset johtavat väärin päätelmiin korkeuden kasvattamisen vaikutuksista. Syy siihen on mittausten epätarkkuus, joka vaikuttaa suoraan siihen, että keskihajonta poikkeaa laskennan keskihajonnasta. Muutoksen vaikutuksen arvioinnissa laskennalla päästään tarkempiin tuloksiin.

Sähköaseman magneettikenttien pienentämistulokset

Magneettivuon tiheyden tuloksia verrattiin pienentämiskeinojen tuloksiin tarkastelualueella. Laskentamallin pohjana käytettiin samaa mallia kuin todellisen tilanteen laskennassa, kuva 5.2. Mallia muokattiin ainoastaan lähdön A1 osalta siten, että osa siitä muutettiin kuvan 5.15 mukaiseksi. Laskennassa käytettiin samoja virtoja kuin todellisen rakenteen laskennassa (taulukossa 5.1). Tulokset on esitetty kuvissa 5.16 ja 5.17.



Kuva 5.16. Magneettivuon tiheys tasa-arvokäyrinä, kun johto kolmion kulmapisteissä. Tarkastelukorkeus 1,0 metri. Kuvassa virtajohtimet on esitetty katkoviivalla.



Kuva 5.17. Magneettivuon tiheys tasa-arvokäyrinä, kun johdon vaihejärjestys sekoitettu. Tarkastelukorkeus 1,0 metri. Kuvassa virtajohtimet on esitetty katkoviivalla.

Aikaisemmin esitetyn kuvan 5.7 mukaan virran alasviennin lähellä oli alunperin suurin magneettivuon tiheys. Kuvan 5.17 mukaan se on mahdollista pienentää 75% alkuperäisestä, jos käytetään vaiheiden sekoittamista ja mahdollisimman pientä vaiheväliä. Kuvan 5.16 mukaan, jos käytetään kolmion kulmapisteisiin sijoitettua johtoa, kenttä pienenee 36% alkuperäisestä

5.5 Yhteenveto sähköaseman magneettikenttien pienentämisestä

Tarkastellussa tapauksessa ei ollut todellista tarvetta magneettikenttien pienentämiseen. Sähköaseman magneettikenttä olisi kuitenkin mahdollista pienentää nostamalla sähköaseman johtojen ja laitteiden ripustuskorkeutta. Korkeuden nostaminen 0,5 metrillä vaikuttaa noin 10% laskentaesimerkin kytkinkentällä. Muutoksen toteuttaminen valmiilla sähköasemalla on kallista, vaikea ja aiheuttaisi pitkän käyttökatkoksen, jolloin jouduttaisiin käyttämään varayhteyksiä. Suunnitteluvaiheessa voitaisiin suunnitella korkeampia sähköasemia, jolloin lisäkustannukset jäisivät muutostöitä alhaisemmaksi. Korkeampien sähköasemien tekeminen saattaisi olla kuitenkin maisemanäkökuulmasta huono vaihtoehto.

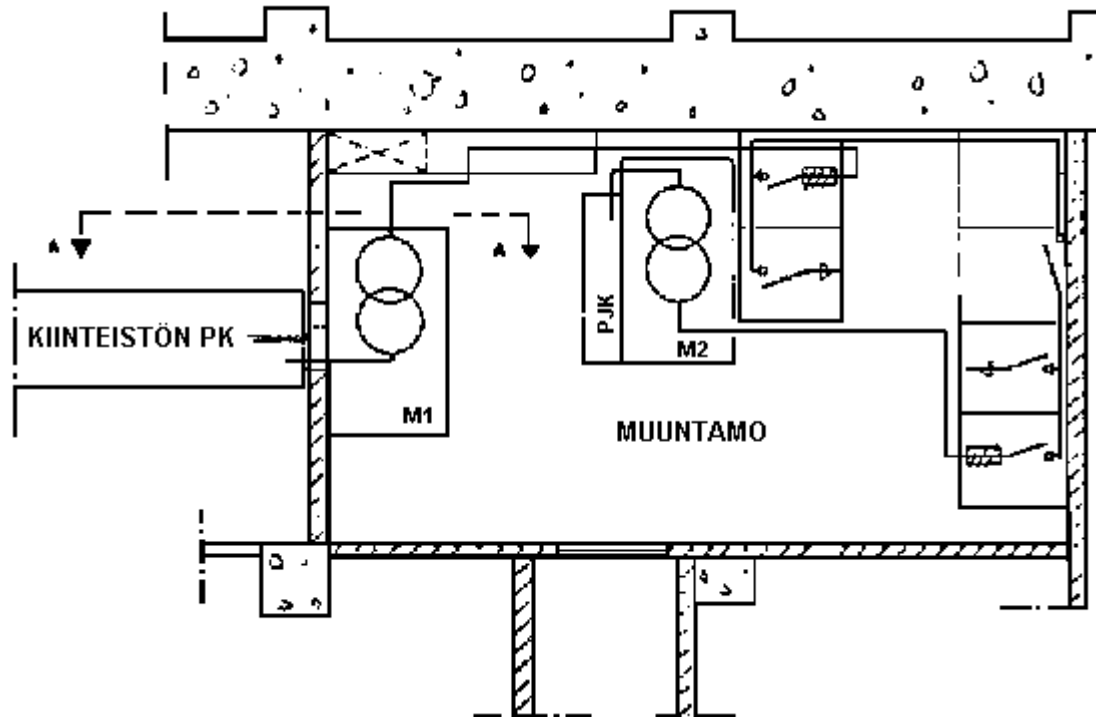
Suurimmat magneettikentät oli esimerkkitapauksessa muuntajan alajännitepuolen alasvientien lähellä. Kenttien pienentämisessä voidaan keskittyä pahimpiin kenttälähteisiin, kuten muuntajan kaapeleihin. Tällöin pienentäminen vaikuttaa paikallisesti eli pelkästään kaapelien lähellä. Esimerkkinä laskettiin pienennysvaikutus kolmion muotoon laitetulle kaapelille ja vaihejohtimien sekoittamiselle, jossa kaapelien vaiheväli mahdollisimman pieni. Pienentämiskeinojen vähentämistulokset olivat 36% ja 75%. Kaapelin vaihejärjestyksen muuttamisen toteuttaminen olisi esimerkkitapauksessa helppoa, koska vaiheet on jaettu valmiiksi kahteen kaapeliin.

6 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMINEN

Kiinteistömuuntamon magneettikenttien pienentämisesimerkkiä varten käytiin tutustumassa erääseen Tampereen kaupungin sähkölaitoksen rakenteeltaan tyypilliseen 20/0,4 kV muuntamoon, jossa oli magneettikenttien pienentämiseksi parannettu muuntamon rakennetta. Muuntamon yläpuolella sijaitsee toimistotiloja, joissa esiintyi tietokoneiden näytöissä värinää. Muuntamon alajännitepuolen kiskosilta siirrettiin alkuperäistä alemmaksi ja muutettiin kaapeloinniksi. Myös kaapelin vaihejärjestys sekoitettiin. Sähköyhtiö oli suorittanut muuntamosta sekä magneettikentän, että virran mittauksia ennen ja jälkeen muutostöitä.

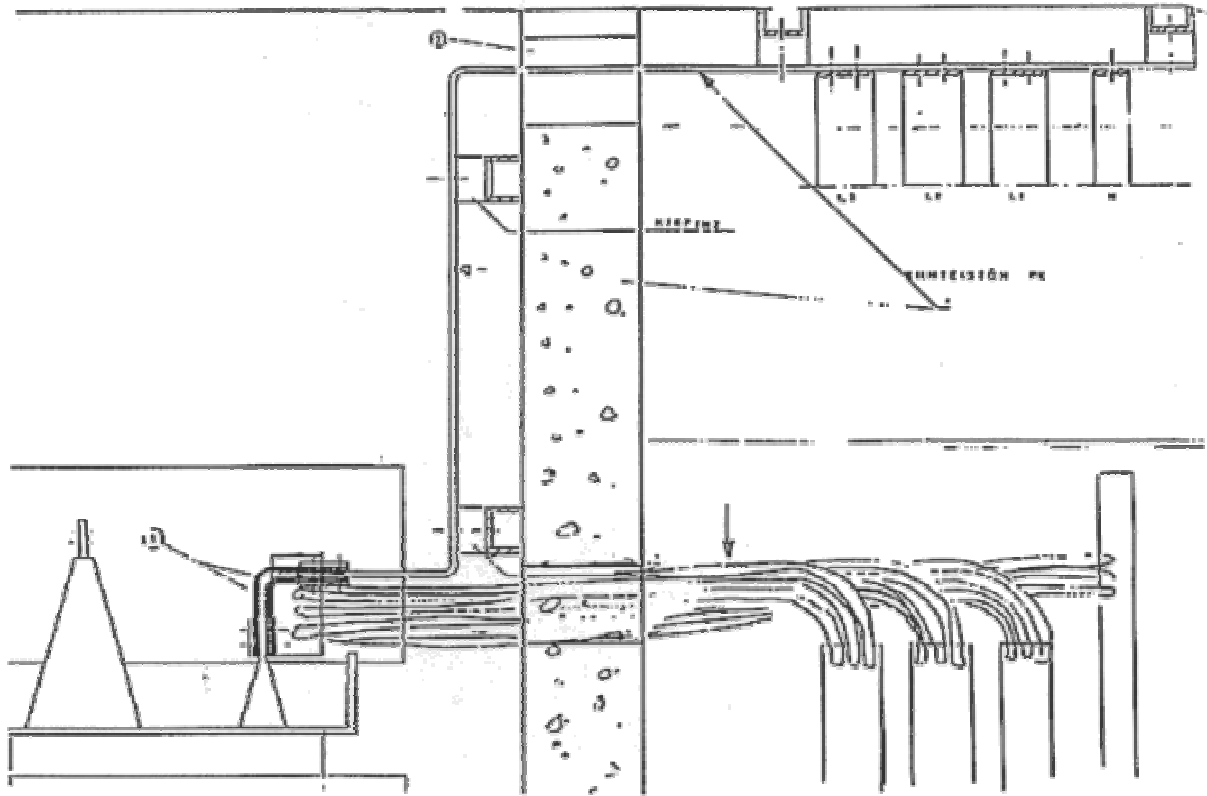
6.1 Muuntamon rakenne

Muuntamo sijaitsee toimistorakennuksen kellaritiloissa. Pääkeskus on omassa huoneessa muuntamohuoneen vieressä. Kuvassa 6.1 on esitetty muuntamon rakennepiirustus.



Kuva 6.1. Kiinteistömuuntamon rakennekuva. Kuvassa M1 on 700 kVA:n muuntaja, M2 on 800 kVA:n muuntaja ja PK on pääkeskus.

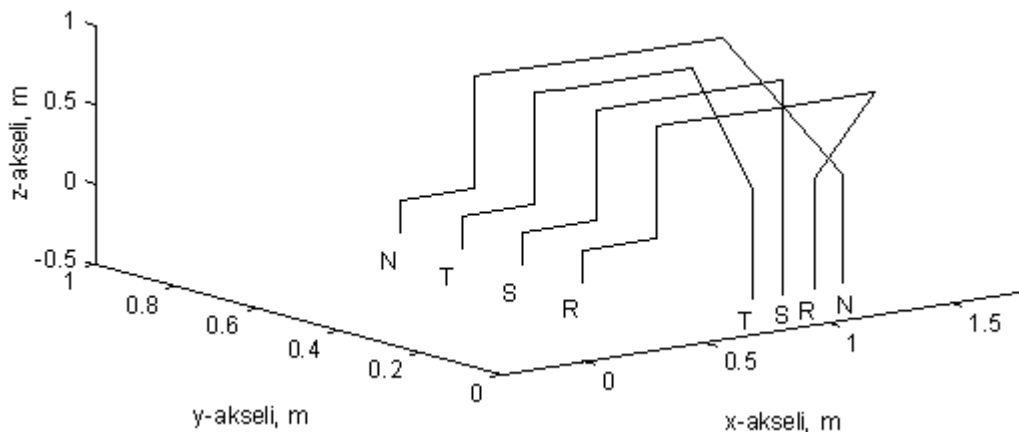
Muuntamohuoneessa on kaksi muuntajaa, joiden tehot ovat 700 kVA ja 800 kVA. Niistä isompi ei ole jatkuvassa käytössä. Syöttö tapahtuu 20 kV verkosta. Jännite muutetaan 20/0,4 kV muuntajalla jakelujännitteeksi. Alajännitepuolella virta siirretään kiskosiltaa pitkin pääkeskukseen. Kiinteistön pääkeskuksesta virta jaetaan kulutuksiin eri puolille rakennusta. Alkuperäisessä rakenteessa huoneiden väliseen seinään on tehty kiskosiltaa varten katonrajaan aukko, josta kiskosto meni läpi. Parannetussa rakenteessa on reikä 0,8 metriä aukkoa alempana. Kuvassa 6.2 on esitetty muuntajan M1 kiskosto ja luonnos parannetusta muuntamorakenteesta.



Kuva 6.2. Kiinteistömuuntamon alkuperäinen kiskosto. Kuvassa on myös luonnosteltuna parannetun rakenteen kaapelointi.

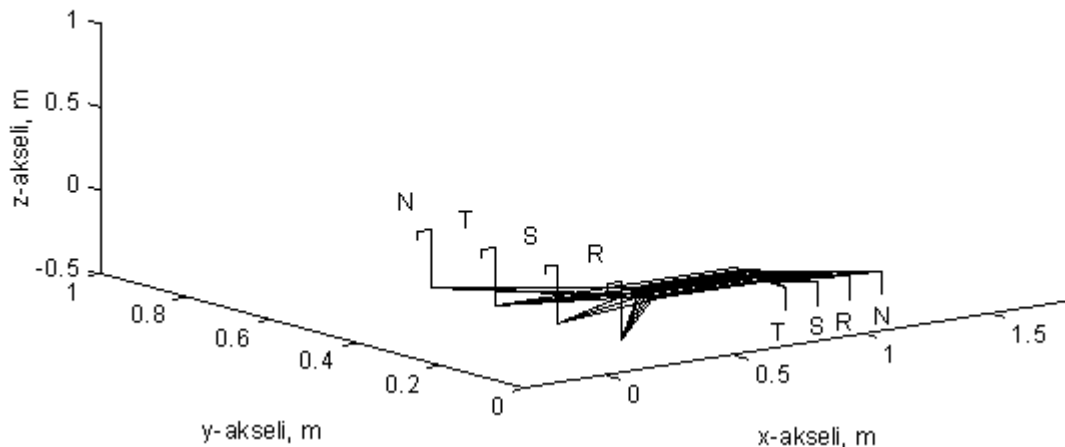
Alkuperäiset jäykät lattakiskot olivat kuparia ja niiden mitat olivat 120×10 mm. Siten niiden kuormitettavuus oli noin 1300 A /34/. Virtakiskojen vaiheväli oli 15 cm. Parannetussa rakenteessa johtimet ovat 120 mm² kuparikaapelia (MK 120). Johdinkuparin paksuus on 12 mm ja kaapelin paksuus 18 mm. Vaihejohtimissa on viisi kaapelia ja nollassa johtimessa kolme. Seinän kohdalla johto on tiukassa nipussa, mutta muualla johtimien etäisyydet ovat suurempia kuin kaapelin halkaisija.

Kuvassa 6.3 on esitetty analyttisen laskentaohjelman avulla digitoitu muuntamon johtimien geometria alkuperäisessä muuntamorakenteessa. Origoksi on valittu muuntajan kannelta R-vaihe.



Kuva 6.3. Alkuperäisen muuntamorakenteen analyttisen laskennan malli. Kuvassa origo on muuntajan kannella R-vaiheen kohdalla.

Kuvassa 6.4 on esitetty parannetun rakenteen geometria.



Kuva 6.4. Parannetun muuntamorakenteen analyttisen laskennan malli.

Muuntajan ja pääkeskuksen välisten johtojen lisäksi muuntamotilan katossa oli kulutuksiin meneviä pienempitehoisia virtakaapeleita, joiden tarkoista tehoista tai virroista ei ollut tietoa. Kulutuskohteisiin meneviä kaapeleita ei huomioitu laskennassa.

6.2 Muuntamon mittaukset

Muuntamon yläpuolella olevassa toimistossa tehtiin magneettikentän pitkäaikaismittaus ennen muutostöitä ja toinen mittaus muutostöiden jälkeen. Magneettivuon tiheys mitattiin muuntamon yläpuolisessa toimistossa olevan pöydän päältä 75 cm korkeudella lattiasta. Molemmat mittaukset tehtiin samassa paikassa.

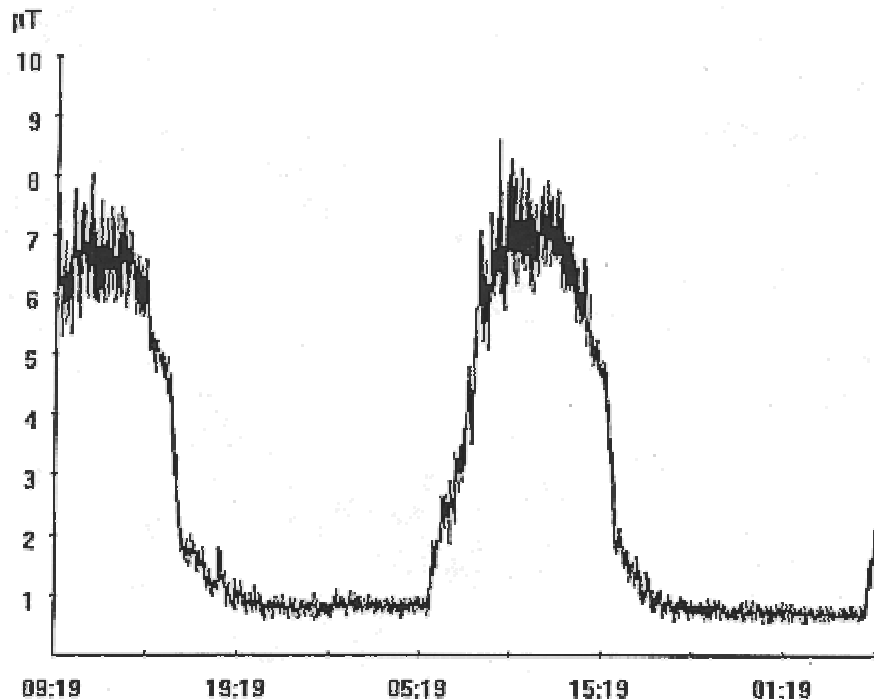
Vaihevirratt ja nollavirta mitattiin samanaikaisesti magneettivuon tiheyden mittauksen kanssa. Virran mittaus tapahtui Windows-pohjaiseen tiedonkeruujärjestelmään kytkettyjen pihtimittapäiden avulla. Signaalitason muokkaus tiedonkeruujärjestelmään sopivalle tasolle tapahtui mittapäiden avulla, joten esimerkiksi vaihevirroissa ja nollavirrassa käytettiin erilaista mittapäätä. Lisäksi määritettiin virtojen spektri ennen muutostöitä suoritetun virtamittauksen yhteydessä.

6.2.1 Mittaukset alkuperäisellä rakenteella

Alkuperäisen rakenteen mittauksissa tehtiin magneettikenttä- ja virtamittaus sekä lisäksi spektrimääritys virroille. Mittaukset alkoivat kello 10.00 ja kestivät noin 2 vuorokautta, kello 6.30 asti. Tietokoneiden näyttöjen ongelma esiintyi työaikana, joten mittausjaksolta valittiin vertailuun kokonainen työpäivä eli toisena mittauspäivänä kello 8.00 - 16.00.

Magneettivuon tiheyden tulokset

Magneettivuon tiheys mitattiin kolmeakselisella ML-1 -tyyppisellä mittarilla 40 sekunnin mittausvälillä. Mittari keräsi arvot mittausajalta muistiinsa, josta ne siirrettiin mittauksen jälkeen tietokoneelle. Mittaustulokset käsiteltiin Excel 5.0 taulukkolaskentaohjelmalla, jolla laskettiin keskiarvo ja keskihajonta. Magneettivuon tiheyden tulokset on esitetty kuvassa 6.5.

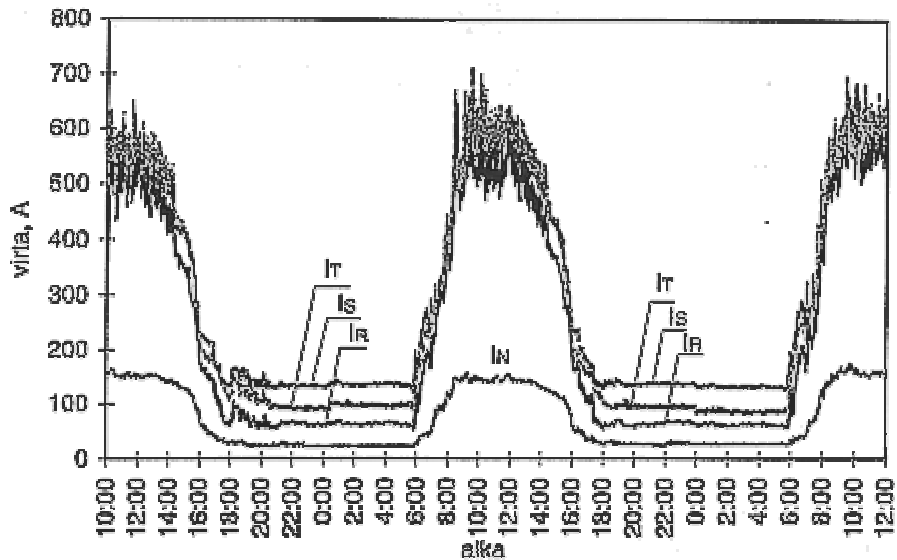


Kuva 6.5. ML-1 -ohjelman näyttö magneettivuon tiheyden arvoista alkuperäisessä muuntamorakenteessa koko mittauksen ajalta.

Mitatun magneettivuon tiheyden keskiarvo on $6,2 \mu\text{T}$ ja keskihajonta $1,2 \mu\text{T}$. Koska keskiarvo oli paljon suurempi kuin $1,0 \mu\text{T}$, voidaan päätellä, että toimistossa ollut tietokoneiden näyttöjen häiriintyminen johtui nimenomaan magneettikentistä [/3/](#). Keskihajonnasta ja kuvasta 6.5 huomataan, että magneettivuon tiheys vaihteli työpäivän aikana huomattavasti. Kuvan 6.5 perusteella näyttää siltä, että kentät eri vuorokausina niiltä osin kuin ne esiintyvät kahteen kertaan, ovat likimain samanlaisia.

Virran tulokset

Virta mitattiin joka vaiheelta ja nollajohtimesta 60 sekunnin aikaisina keskiarvoina. Arvot käsiteltiin Excel 5.0 taulukkolaskentaohjelmalla. Mittausten tulokset on esitetty kuvassa 6.6.



Kuva 6.6. Vaihe- ja nollavirta mittausajalla alkuperäisen muuntamorakenteen mittauksissa.

Virtojen keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 6.1. Siinä on esitetty vertailuun valitun työpäivän ja koko mittausajan arvot.

Taulukko 6.1. Virtojen keskiarvot (k.a.) ja keskihajonnat (k.h.) työpäivänä ja koko mittausajalla alkuperäisen muuntamorakenteen mittauksissa; vaihevirrät I_R , I_S , I_T ja nollavirta I_N .

johdin	virta työpäivänä, A		virta mittausajalla, A	
	k.a.	k.h.	k.a.	k.h.
R	471	92	231	202
S	520	88	290	188
T	528	92	272	210
N	135	16	71	55

Virtojen keskiarvot ovat koko mittausajalla pienempiä kuin vertailuun valitun työpäivän aikana, koska siihen tulee mukaan toimistojen kiinnioloaika. Keskihajonta on huomattavasti suurempi, koska toimistojen sähkön kulutus on yöllä yleensä keskiarvoa pienempää.

Taulukossa 6.2 on esitetty virtojen spektrit 7. harmoniseen yliaaltoon saakka sekä yliaallot huomioiva virran tehollisarvo I_{RMS} . Spektri mitattiin yhden kerran ensimmäisenä mittauspäivänä. Vaihekulmat on esitetty taulukossa perusaallon osalta.

Taulukko 6.2. Alkuperäisen muuntamorakenteen mittauksissa vaihevirtojen tehollisarvo, perusaalto ja sen vaihekulma sekä yliaaltopitoisuudet prosentteina perusaallosta 7. harmoniseen yliaaltoon asti.

johdin	I_{RMS}, A	I_{50}, A	φ_{50}	$I_{100}, \%$	$I_{150}, \%$	$I_{200}, \%$	$I_{250}, \%$	$I_{300}, \%$	$I_{350}, \%$
R	485	464	97°	0,2	12,7	0,1	12,9	0,1	5,0
S	501	490	212°	0,1	12,7	0,3	12,6	0,1	3,0
T	532	530	342°	0,2	8,7	0,1	7,5	0,2	4,3
N	135	26	263°	3,0	530	1,9	108	1,4	31

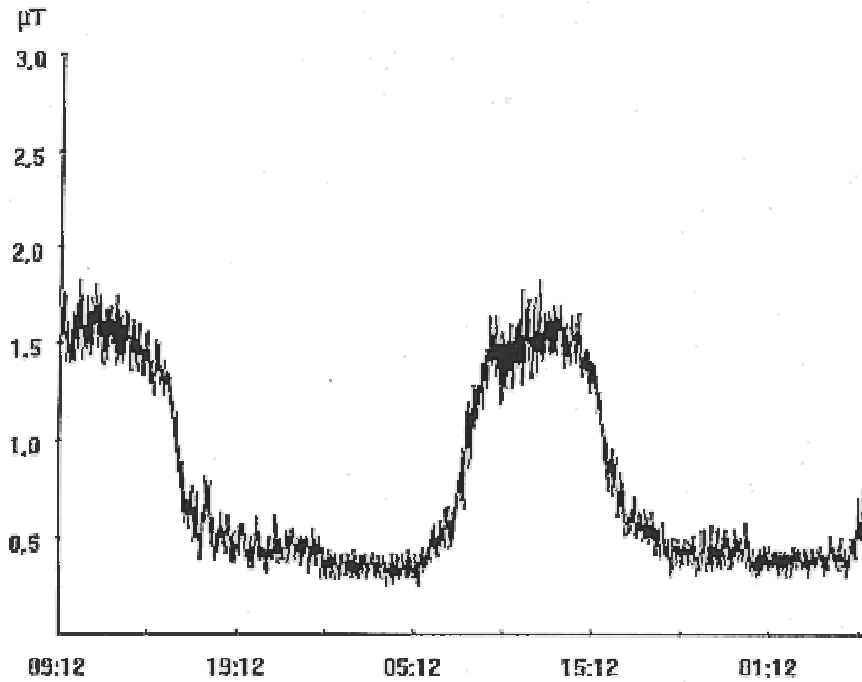
Perustaajuisen virran ja harmoniset taajuudet huomioivan virran välillä on huomattava ero, joten verkossa esiintyy yliaaltotaajuuksia merkittävästi. Virrat ovat kuitenkin lähes symmetrisiä, koska vaihevirratt ovat likimain saman suuruisia ja vaihe-erot noin 120°.

6.2.2 Mittaukset parannetulla rakenteella

Parannetun rakenteen mittauksissa tehtiin magneettikenttä- ja virtamittaus. Mittaukset aloitettiin kello 10.00 ja ne kestivät noin kaksi vuorokautta kello 6.30 asti. Mittausjaksolta valittiin vertailuun kokonainen työpäivä eli toisena mittauspäivänä kello 8.00 - 16.00.

Magneettivuon tiheyden tulokset

Magneettivuon tiheys mitattiin samalla lailla kuin alkuperäisellä rakenteella. Mittauksissa käytettiin samaa mittauspistettä, mittaria ja mittausväliä. Magneettivuon tiheyden tulokset on esitetty kuvassa 6.7.

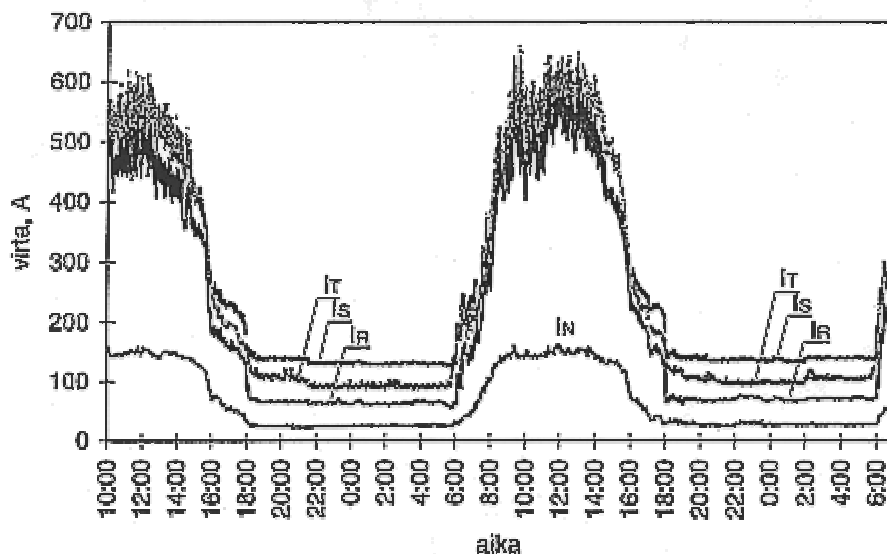


Kuva 6.7. ML-1 -ohjelman näyttö magneettivuon tiheyden arvoista parannetulla muuntamorakenteella koko mittauksen ajalta.

Vertailuajalta laskettu magneettivuon tiheyden keskiarvo on $1,4 \mu\text{T}$ ja keskihajonta $0,2 \mu\text{T}$. Keskiarvon perusteella voidaan päätellä, että käytetty vähentämiskeino alensi huomattavasti magneettivuon tiheyttä. Toimistossa ollut tietokoneiden näyttöjen häiriintyminen ei kuitenkaan kokonaan poistunut, koska magneettivuon tiheys oli muutostöiden jälkeenkin yli $1,0 \mu\text{T}$.

Virran tulokset

Virta mitattiin vaiheista ja nollajohtimesta 60 sekunnin aikaisina keskiarvoina. Mittausten tulokset on esitetty kuvassa 6.8.



Kuva 6.8. Vaihe- ja nollavirta mittausajalla parannetun muuntamorakenteen mittauksissa.

Virtojen keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 6.3. Siinä on esitetty vertailuun valitun työpäivän ja koko mittausajan arvot.

Taulukko 6.3. Virtojen keskiarvot (k.a.) ja keskihajonnat (k.h.) työpäivänä ja koko mittausajalla parannetun muuntamorakenteen mittauksissa; vaihevirratt I_R , I_S , I_T ja nollavirta I_N .

johdin	virta työpäivänä, A		virta mittausajalla, A	
	k.a.	k.h.	k.a.	k.h.
R	471	76	203	178
S	496	77	261	166
T	533	74	248	193
N	139	13	66	52

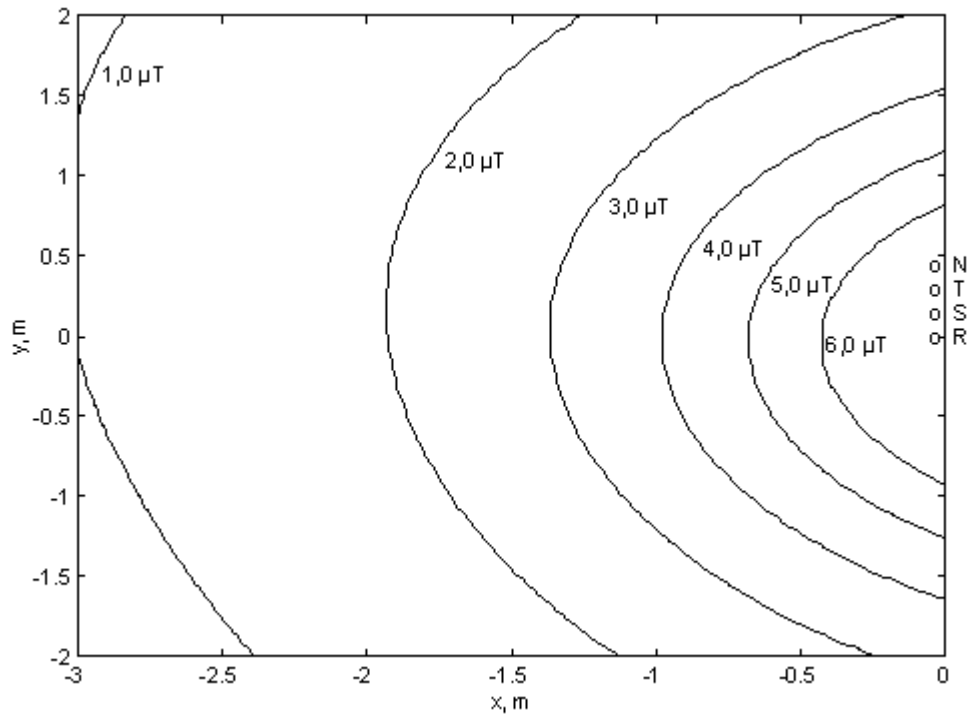
Virtojen keskiarvot ovat parannetun muuntamorakenteen mittausten aikana olleet pienempiä kuin alkuperäisen rakenteen mittauksissa. Keskihajonnoissa ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia taulukon 6.1 arvoihin verrattuna.

6.3 Muuntamon magneettikenttien laskentaa

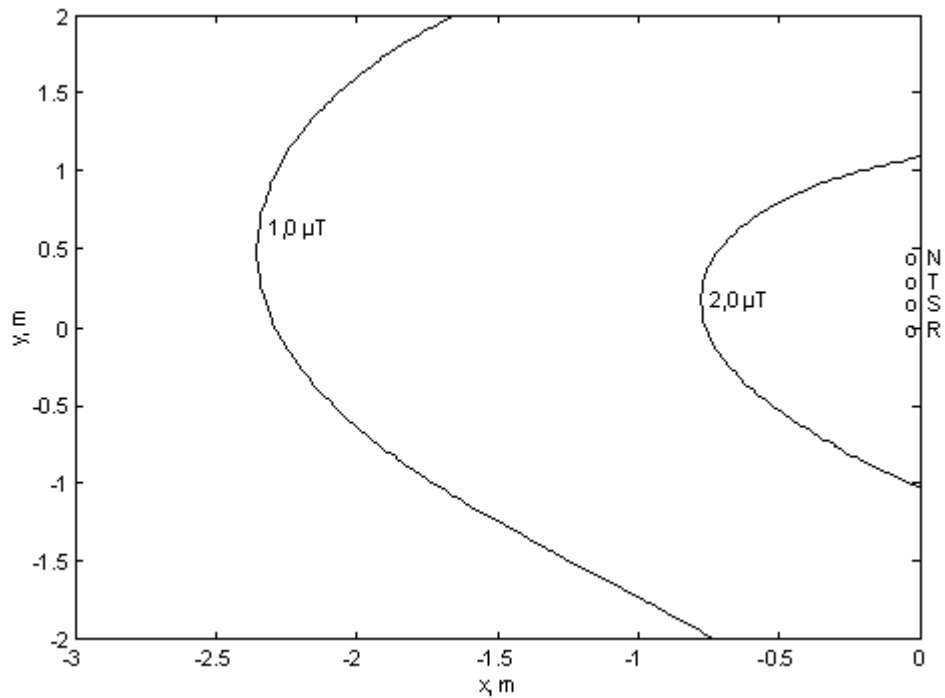
Laskentaan käytettiin virtoina magneettivuon tiheyden mittaustulosten osalta työpäivän keskiarvoja taulukosta 6.1 sekä taulukosta 6.3, koska ne kuvaavat keskimääräistä kentän syntyä. Alkuperäisen tapauksen ja mittausten vertailussa käytettiin vaihekulmina perusaaltoisen virran vaihekulmaa taulukosta 6.2. Parannetun rakenteen laskennan ja mittausten vertailussa jouduttiin käyttämään vaihekulmien määrittämisessä oletusta, että vaihevirratt summautuvat johdossa. Kenttien pienentämiskeinojen vertailussa käytettiin alkuperäisen tapauksen virtoja.

6.3.1 Mittauksien ja laskennan vertailu

Laskenta tehtiin muuntamon yläpuolella olevan huoneen työskentelyalueella, jonka suuruus oli 3×4 metriä. Laskentakorkeutena käytettiin samaa kuin mittauksissa (0,75 metriä lattiasta), eli 2,15 metriä muuntajan kannesta ylöspäin. Magneettivuon tiheyden laskentatulokset alkuperäisessä muuntamorakenteessa on esitetty kuvassa 6.9. Parannetun rakenteen laskentatulokset on esitetty kuvassa 6.10. Laskennassa on käytetty samaa koordinaatistoa kuin kuvassa 6.3, eli origo on muuntajan kannen R-vaiheessa. Tuloksia esitteleviin kuviin (6.9, 6.10, 6.12, 6.13, 6.16 ja 6.17) on merkitty o -merkeillä kiskojen alkupisteet muuntajalla. Kuvissa kiskot lähtevät oikealle päin.



Kuva 6.9. Magneettivuon tiheyden lasketut tasa-arvokäyrät alkuperäisessä muuntamorakenteessa.



Kuva 6.10. Magneettivuon tiheyden lasketut tasa-arvokäyrät parannetussa muuntamorakenteessa.

Kuvia 6.9 ja 6.10 vertaamalla voidaan todeta, että rakenteen muuttaminen vaikutti magneettikenttiin koko huoneessa. Suurin vaikutus oli aivan muuntajan yläpuolella, jossa magneettikenttä pieneni jopa 68%.

Mittausten ja laskennan vertailu tehtiin mittauspisteessä. Magneettivuon tiheyden aikariippuvuuden vertaamista varten laskettiin skaalauskerroin, koska magneettivuon tiheyden laskeminen ei ole käytännössä mahdollista jokaisen virtamittauksen tuloksille. Kerrointa laskettaessa oletetaan, että lasketussa ja mitatussa mallissa siirretään yhtä suuri teho, jos magneettivuon tiheys on sama. Koska magneettivuon tiheys on suoraan verrannollinen virtaan, hyödynnettiin sitä vertailussa.

Näennäistehon ja magneettivuon tiheyden suhde lasketaan yhtälön 17 avulla. Yhtälössä oletetaan vaihejännitteet yhtä suuriksi. Lisäksi oletetaan virran ja jännitteen välinen vaihe-ero joka vaiheessa samaksi. Sen perusteella lasketun magneettivuon tiheyden suhde siirrettyyn näennäistehoon on yhtä suuri kuin magneettivuon tiheyden ja näennäistehon suhde tietyllä hetkellä t.

$$\frac{U(I_R + I_S + I_T)/\sqrt{3}}{B_{\text{laskettu}}} = \frac{U(I_{R,t} + I_{S,t} + I_{T,t})/\sqrt{3}}{B_{\text{vertailu}}} \quad (17)$$

missä U on pääjännite,

$I_{R,t}$, $I_{S,t}$ ja $I_{T,t}$ ovat vaihevirtojen minuuttikeskiarvoja,

B_{laskettu} on vaihevirtojen keskiarvojen avulla laskettu magneettivuon tiheys ja

B_{vertailu} on virtojen minuuttikeskiarvojen avulla määritettävä magneettivuon tiheys.

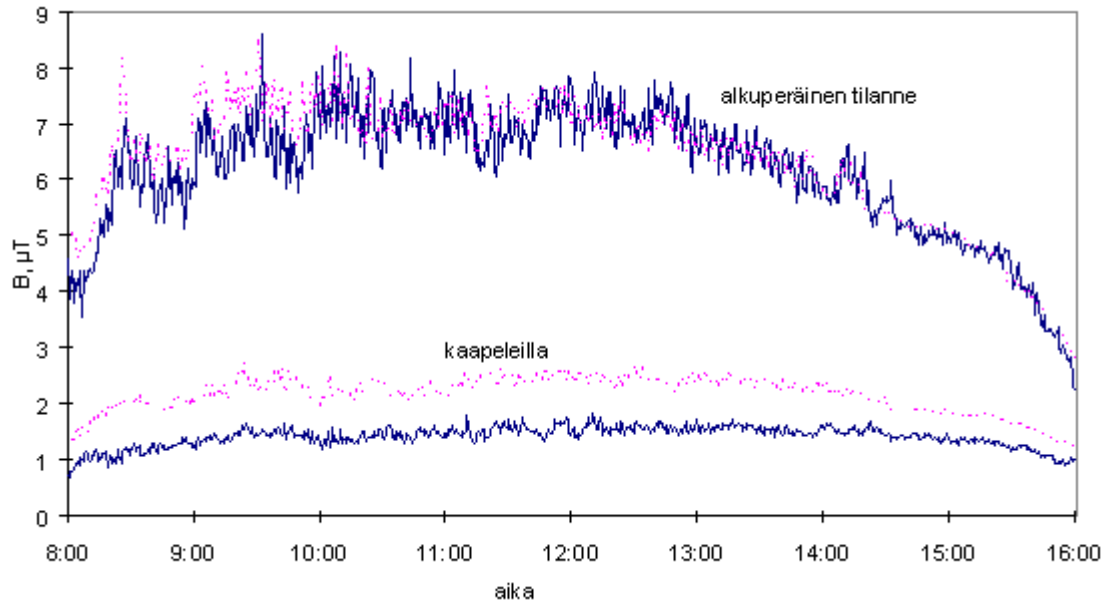
Yhtälö 17 jaetaan $\sqrt{3}U$:lla, jolloin yhtälöstä saadaan ratkaistua vertailuun käytettävä magneettivuon tiheys. Määritettävän magneettivuon tiheyden kaava on esitetty yhtälössä 18.

$$B_{\text{vertailu}} = \frac{B_{\text{laskettu}} (I_{R,t} + I_{S,t} + I_{T,t})/3}{(I_R + I_S + I_T)/3} = B_{\text{laskettu}} \frac{I_{\text{mean},t}}{I_{\text{mean}}} \quad (18)$$

missä $I_{\text{mean},t}$ on mitattu virran minuuttikeskiarvo ajalle t ja

I_{mean} on kaikkien virtojen keskiarvo työpäivänä.

Vertailussa käytettävä magneettivuon tiheys saadaan kertomalla laskettu magneettivuon tiheys skaalauskerroimella eli virtojen keskiarvojen suhteella. Mitatut ja lasketut magneettivuon tiheydet alkuperäisellä ja parannetulla muuntamorakenteella on esitetty kuvassa 6.11. Mitatut arvot on esitetty yhtenäisellä viivalla ja lasketut katkoviivalla.



Kuva 6.11. Mitatut (yhtenäinen viiva) ja lasketut (katkoviiva) magneettivuon tiheydet alkuperäisessä ja parannetussa muuntamorakenteessa.

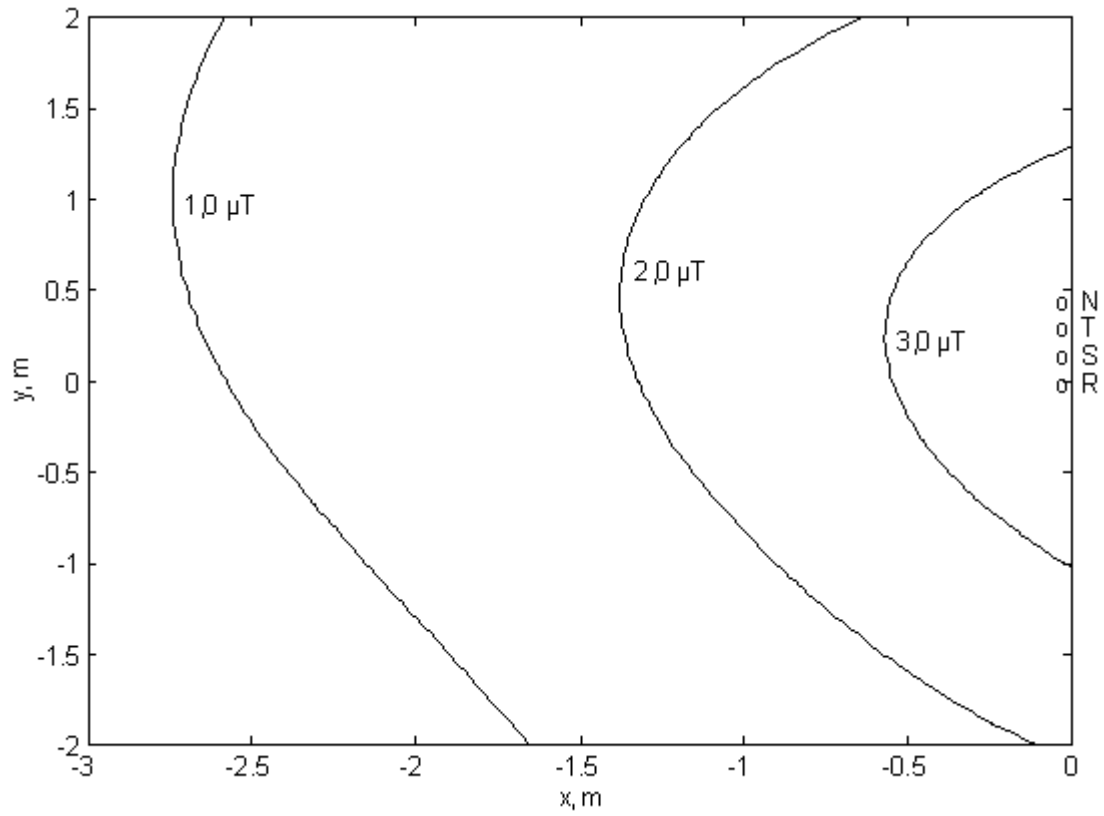
Alkuperäisen muuntamorakenteen käyrät ovat lähes päällekkäin, mutta parannetun muuntamorakenteen tulokset eivät ole yhtä tarkasti samoja. Epätarkkuuteen vaikuttaa muuntamon katossa olleet johtolähdöt, joiden vaikutus on suhteessa suurempi parannetun muuntamorakenteen tapauksessa, koska magneettivuon tiheys on pienempi. Lisäksi eri aikana tehtyjen mittausten kuormitukset voivat olla erilaiset.

6.3.2 Magneettikenttien laskentaan perustuva pienentämiskeinojen vertailu

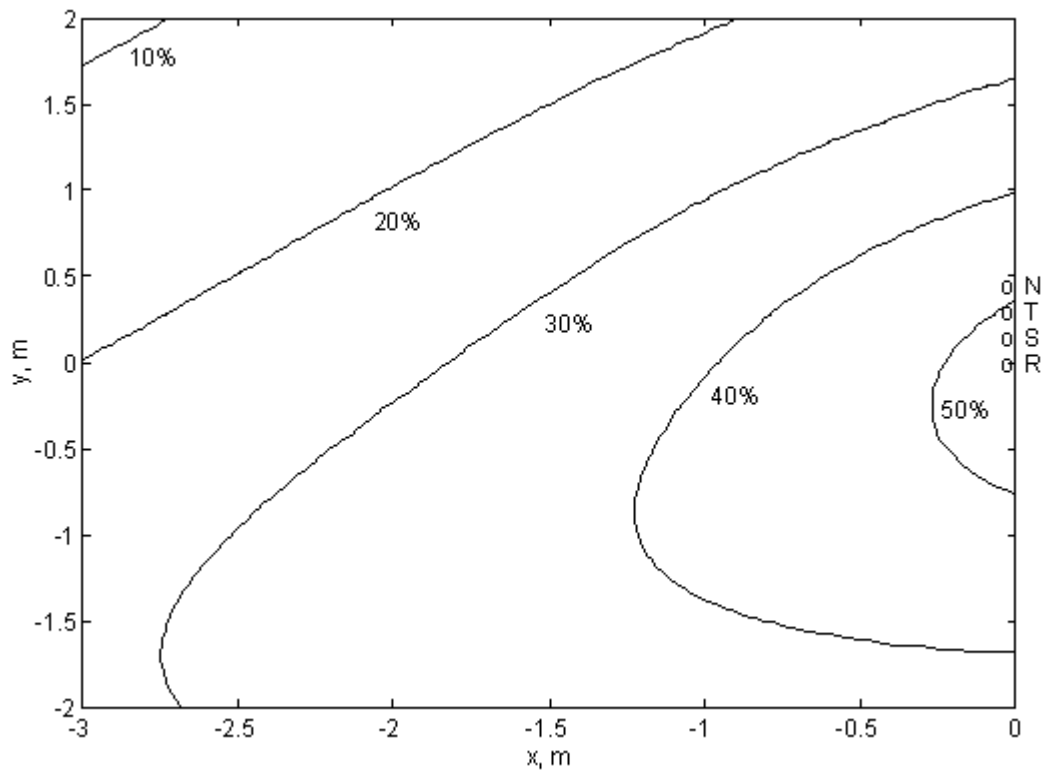
Mitattujen muuntamorakenteiden lisäksi verrattiin laskennallisesti parannettua muuntamorakennetta, 2 mm alumiinikotelointia ja 5-johdinjärjestelmän käyttöä rakennuksessa. Vertailuissa käytettiin alkuperäisen muuntamorakenteen virtoja.

Parannetun rakenteen tulokset

Parannetun muuntamorakenteen tulokset olivat erilaiset todellisilla ja alkuperäisen muuntamorakenteen virroilla. Magneettivuon tiheydet on esitetty kuvassa 6.12 tasa-arvokäyrien avulla. Kuvassa 6.13 on esitetty tasa-arvokäyrinä prosentteina laskettu magneettivuon tiheyden pienennys alkuperäiseen magneettivuon tiheyteen verrattuna.



Kuva 6.12. Magneettivuon tiheyden lasketut tasa-arvokäyrät parannetussa muuntamorakenteessa alkuperäisen rakenteen virroilla.



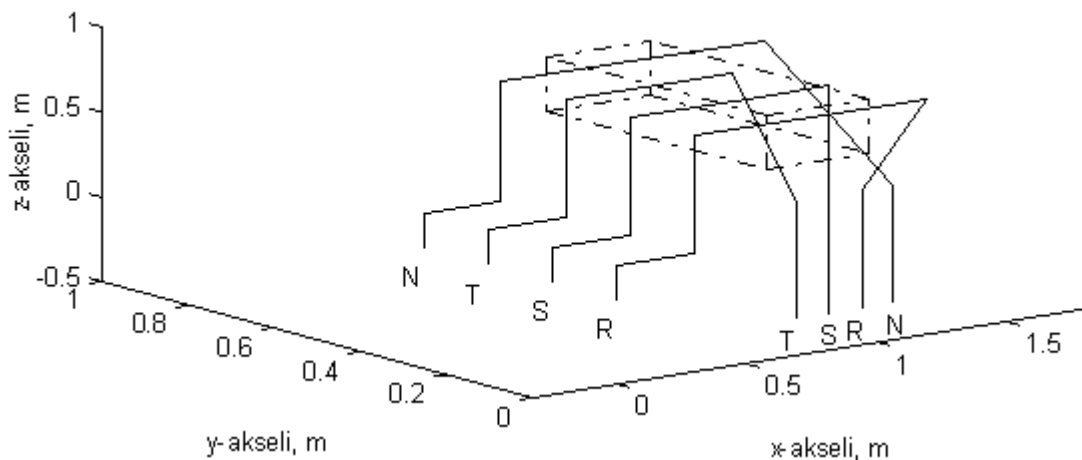
Kuva 6.13. Magneettivuon tiheyden lasketut pienennyksen tasa-arvokäyrät parannetussa muuntamorakenteessa alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna.

Kuvan 6.10 tulokset laskettiin samalla muuntamorakenteella kuin 6.12, mutta eri virroilla. Koska virta oli kuvan 6.12 laskennassa symmetrisempi ja 1,3% pienempi, myös magneettivuon tiheys on pienempi. Kuvia verrattaessa eron havaitsee siitä, että suurimpia kenttiä kuvaavat käyrät rajaavat kuvasta pienemmän alan. Käyrien muodoissa ei ole havaittavaa eroa, joten kentän pienenemisessä ei ole paikallisia huippuja, vaan se pienenee koko tarkastelualueella.

Kuvasta 6.13 nähdään, että parannettaessa muuntamon rakennetta kenttä on muuntajan päällä, missä alunperin oli suurin magneettivuon tiheys, 55% pienempi. Rakenteen muuttamisen vaikutus heikkenee nopeasti etäisyyden muuntajasta kasvaessa. Vaikutus on pienimmillään toimiston etäisimmässä nurkassa, jossa se on 9%. Rakenteen muuttamisella on siis toimistohuoneen kenttää tasoittava vaikutus.

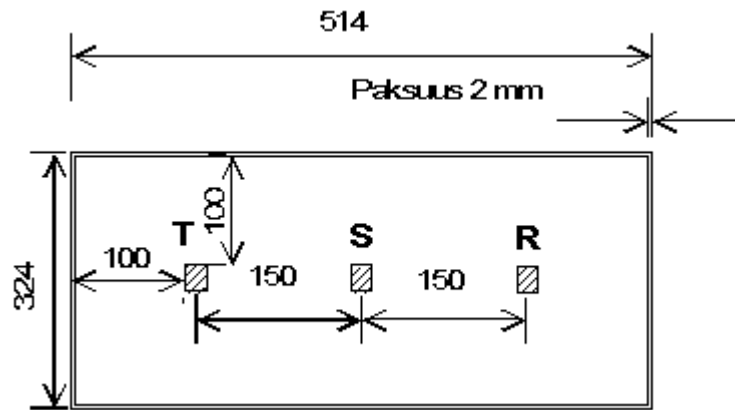
Alumiinikotelo kiskosillassa

Muuntamokiskoston aiheuttamaa magneettikenttää oletettiin vaimennettavan ympäröimällä kiskoston seinän sisällä oleva osa 2 mm paksulla alumiinikotelolla. Kuvassa 6.14 on esitetty analyttisen laskentaohjelman avulla diskretoitu geometria.



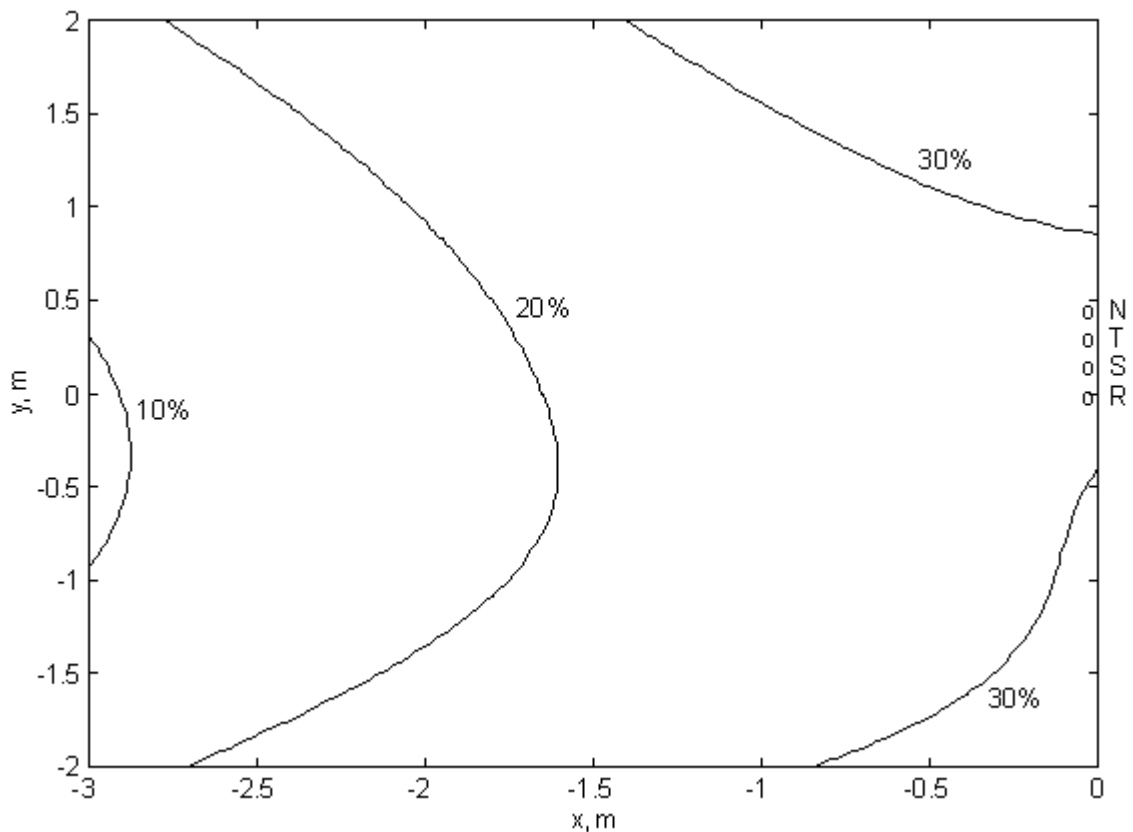
Kuva 6.14. Alumiinilla suojatun muuntamorakenteen analyttisen laskennan malli (suoja piirretty pistekatkoviivalla, origo R-vaiheessa muuntajan kannella).

Kuvan koordinaateista voidaan havaita, että suojattu kiskoston osa on lähellä toimistohuonetta. Kotelon avulla saatiin hyvä vaimennusvaikutus, koska lähellä toimistoa olevat muuntamokiskoston osat vaikuttavat merkittävästi toimiston magneettikenttään. Kotelon rakenne on esitetty kuvassa 6.15.



Kuva 6.15. Kiskoston koteloointiin käytetyn 2 mm paksun alumiinisuojan mitat.

Kotelon suojausvaikutusta arvioitiin Cooleyn magneettikenttien vaimentamistutkimuksen mukaisella yhtälöllä, jonka mukaan vaimennus oli 8,7 dB [8, 18]. Vaimennuskerroin huomioitiin yhtälön 14 mukaisesti koteloinnin sisällä olevissa kiskojen osissa. Magneettikenttä pieneni koteloinnin seurauksena alkuperäisen muuntamon tapauksesta kuvan 6.16 mukaisesti.



Kuva 6.16. Magneettivuon tiheyden pienennyksen tasa-arvokäyrät 2 mm paksun alumiinikoteloinnin tapauksessa alkuperäiseen muuntamorakenteeseen verrattuna.

Kuvasta 6.16 voidaan havaita, että kotelointi vaikutti eniten kiskostolinjan sivuilla, joissa vaimennus oli yli 30%. Vaimennusvaikutus pienenee kiskostolinjalla lähes lineaarisesti, kun kiskoston etäisyys kasvaa.

5-johdinjärjestelmä rakennuksessa

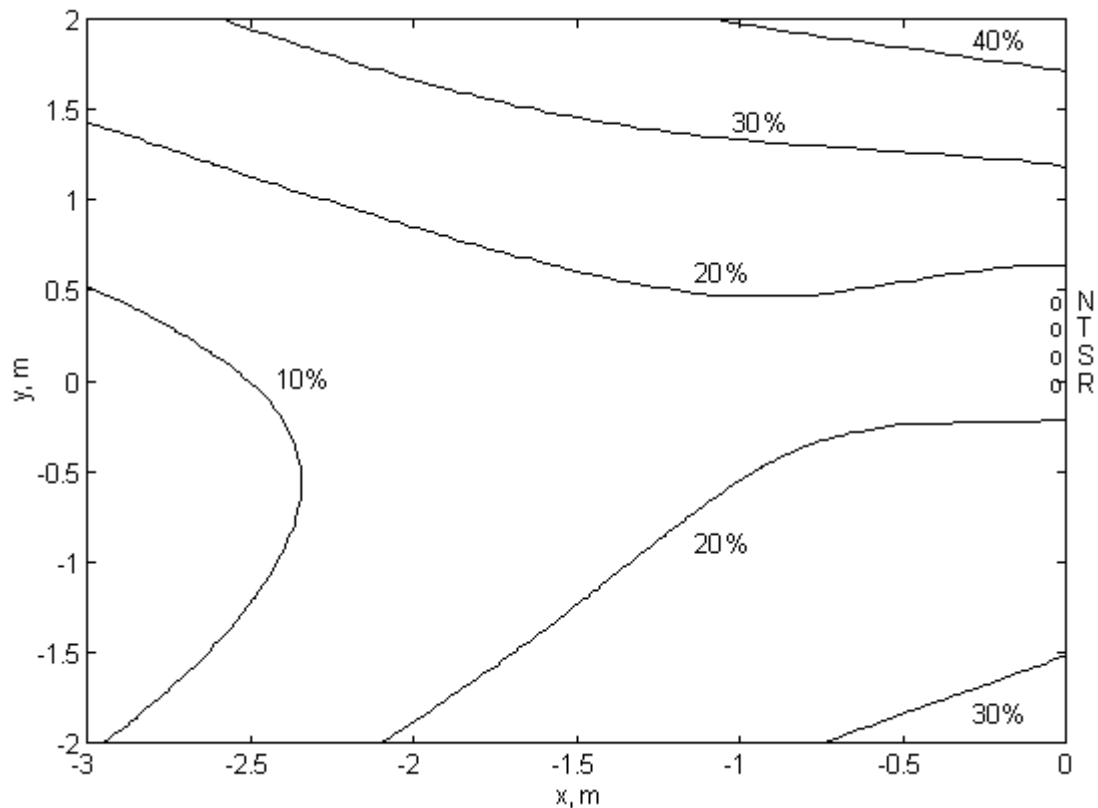
Rakennuksessa ei ollut 5-johdin järjestelmää, joten osa kuormitusvirrasta ei sulkeudu nollajohtimen kautta, vaan menee rakennuksen johtavien rakenteiden ja muuntajan maadoituksen kautta muuntajalle. Rakenteissa kulkevia virtoja kutsutaan harhavirroiksi /10/. Rakennuksen johtavia rakenteita voivat olla esimerkiksi betoniraidoitukset, tukirakenteet, vesijohtoputkistot ja vesikourut /29/. 5-johdinjärjestelmässä ei synny harhavirtoja, vaan kaikki virrat sulkeutuvat muuntajakiskoston nollajohtimen kautta.

Esimerkkitapauksen laskennassa käytettiin alkuperäisen tapauksen vaihevirtaa ja vaihekulmia. Nollavirta ja sen kulma saatiin siten, että niitä käytettiin muuttujina ja määriteltiin virtojen summa nollaksi. Laskennassa käytetyt virrat ja niiden kulmat on esitetty taulukossa 6.4.

Taulukko 6.4. Vaihevirrat ja -kulmat käytettäessä 5-johdinjärjestelmää rakennuksessa; vaihevirrat I_R , I_S , I_T ja nollavirta I_N .

johdin	virta	
	I, A	φ
R	471	97°
S	520	212°
T	528	342°
N	29	83°

Magneettivuon tiheys laskettiin käyttämällä taulukon 6.4 mukaista virtaa. Magneettikenttä pieneni virran muuttumisen seurauksena alkuperäisen muuntamon tapauksesta kuvan 6.17 mukaisesti.



Kuva 6.17. Magneettivuon tiheyden pienennyksen tasa-arvokäyrät alkuperäiseen muuntamorakenteeseen verrattuna, kun rakennuksessa käytetään 5-johdinjärjestelmää.

Kuvasta 6.17 voidaan havaita, että johdinjärjestelmän muutos vaikutti eniten muuntajaa lähimpänä olevalla seinustalla kiskostolinjan molemmilla puolilla, joissa vaimennus oli 40-45%. Magneettikentän pieneminen on kiskostolinjan sivuille lähes lineaarista etäisyyden kasvaessa kiskoston. Pienimmillään johdinjärjestelmän muuttamisen vaikutus on alle 5% toimiston seinustalla, jonka etäisyys muuntamosta on suurin.

6.4 Yhteenveto kiinteistömuuntamon magneettikenttien pienentämisestä

Kiinteistömuuntamon magneettikenttien esimerkkitapauksessa parannettiin muuntamon rakennetta magneettikenttien pienentämiseksi. Muuntamon alajännitepuolen kiskosilta siirrettiin alkuperäistä alemmaksi ja muutettiin kaapeloinniksi. Myös kaapelin vaihejärjestys sekoitettiin. Parannetussa rakenteessa kaapelit ovat 0,8 metriä alkuperäistä kiskostoa alempana.

Muuntamon yläpuolella olevassa toimistossa tehtiin magneettikentän pitkäaikaismittaus ennen muutostöitä ja toinen mittaus muutostöiden jälkeen. Vaihevirrat ja nollavirta mitattiin samanaikaisesti magneettivuon tiheyden mittauksen kanssa. Lisäksi määritettiin virtojen spektri ennen muutostöitä suoritetun virtamittauksen yhteydessä.

Rakenteen muuttaminen vaikutti magneettikenttiin koko huoneessa, ja aivan muuntajan yläpuolella magneettikenttä pieneni jopa 53%. Pienentämisen vaikutus laskettiin myös alumiinikoteloinnille ja

tapaukselle, jossa rakennuksessa on 5-johdinjärjestelmä. 2 mm paksusta alumiinista tehdyn 40 cm pitkän suojakotelon tapauksessa vaimennuksen vaikutus oli toimistotilassa suurimmillaan 40%. Rakennuksessa toteutettavan 5-johdinjärjestelmän vaikutus oli toimistotilassa suurimmillaan 45%.

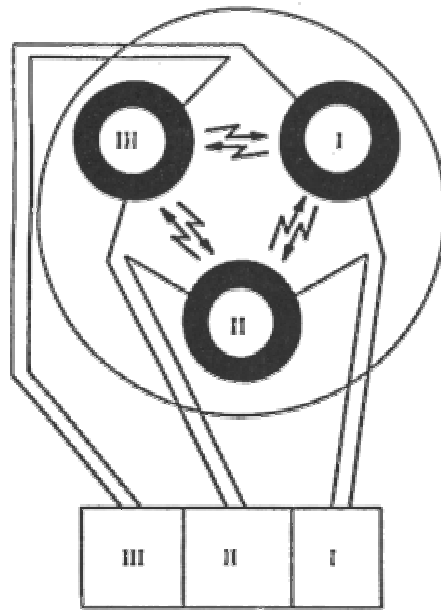
Toteutetussa pienentämiskäytännössä, jossa kiskosilta laskettiin alemmaksi ja vaihdettiin kaapeliksi oli suurin vaikutus magneettikenttään. Magneettivuon tiheys pieneni mittausten mukaan jopa laskettua enemmän, mutta toimistohuoneessa havaittiin vielä muutostöiden jälkeenkin häiriöitä. Magneettivuon tiheys oli muutostöiden jälkeen noin 1,5 μT mittauspisteessä.

7 VALOKAARIUUNIN MAGNEETTIKENTTIEN PIENENTÄMINEN

Valokaariuuni on sähköllä toimiva metallin sulatukseen käytettävä uuni. Uunin toiminta perustuu valokaareen, joka palaa joko elektrodien tai elektrodien ja sulatettavan materiaalin välillä. Uuni voi toimia joko vaihto- tai tasavirralla. Lämpöä syntyy valokaareissa ja myös sulatettavassa materiaalissa, mikäli valokaari palaa materiaalin ja elektrodien välillä. Valokaaren keskiosan lämpötila voi olla jopa 15000° C. Valokaaresta lämpö siirtyy lämmitettävään materiaaliin säteilemällä ja kulkeutumalla. Valokaariuunien tehot ovat yleensä hyvin suuria, esimerkiksi 75 MVA. Mitattu uuni on niin kutsuttua uppokaarityyppiä, jossa elektrodien päät ovat aina sulatettavassa materiaalissa vähintään yhden metrin syvyydessä.

7.1 Valokaariuunin rakenne

Uunin muuntajat on kytketty korkeajänniteverkkoon, jotta saataisiin mahdollisimman jäykkä liityntä verkkoon. Uunin syötössä käytetään kolmea yksivaiheista muuntajaa. Eri vaiheiden muuntajilta saadaan edelleen syöttö uunien valokaarielektrodeille, joita uunissa on kolme. Kukin vaihe kytketään kahteen elektrodiin ja vaiheen virtapiiri sulkeutuu valokaaren kautta. Kytkentä muodostaa kolmivaiheverkkoon tavallaan kolmiokytkennän. Muuntajat sijaitsevat erillisessä sähkötilassa, joka on sijoitettu lähelle uuneja. Uunin runko on terästä. Sisäpuolelta uuni on muurattu korkeita lämpötiloja kestäväällä lämpöeristeellä. Uunin rakenteen pohjapiirustus on esitetty kuvassa 7.1.



Kuva 7.1. Valokaariuunin pohjakaavio. Kuvaan on piirretty syöttömuuntajat, syöttökaapelit, elektrodit ja uunin kuori

Virta siirretään johdinköysien avulla muuntajilta pystysuorassa oleville elektrodeille, jotka sijaitsevat symmetrisesti kolmiossa uunin keskipisteeseen nähden. Elektrodien asetussyvyyttä uunissa seurataan jatkuvasti, koska ne kuluvat kärjistä valokaaresta johtuen.

Magneettikenttiin vaikuttavat uunin virrat. Syntyvien magneettikenttien voimakkuuteen vaikuttaa myös virtojen synnyttämien magneettikenttien toisiaan kumoava vaikutus, indusoituneiden pyörrevirtojen magneettikentät ja magneettikenttien keskittyminen ferromagneettisiin materiaaleihin. Muuntajien suurjännitesyötöissä kulkee pieni virta, joten ne eivät aiheuta suuria magneettikenttiä. Muuntajien pienjännitepuolella virrat ovat kuitenkin hyvin suuria. Muuntajilla magneettikentät pysyvät hyvin keskittyneenä muuntajan rautasydämeen. Muuntajaa suuremman kentän aiheuttavat muuntajan lähdöt, joissa kulkee hyvin suuri virta.

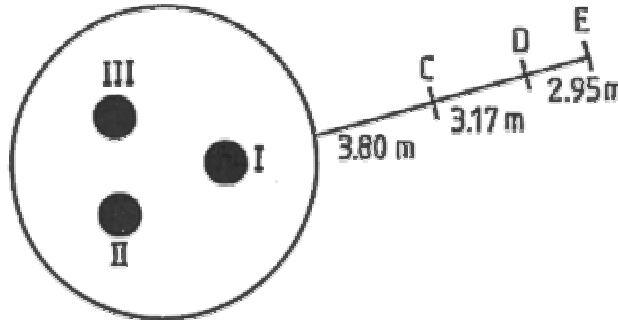
Elektrodien tuottamaa magneettikenttää pienentää niiden symmetrinen sijoitus, jolloin kolmivaiheisessa järjestelmässä eri vaiheiden virtojen tuottamat magneettikentät kumoavat toisiaan. Koska elektrodien väli on suuri, eivät magneettikentät lähellä elektrodeja pienene kovin hyvin. Kauempana uuneista magneettikentät kumoavat toisiaan paremmin. Uunien lähellä magneettikenttää pienentää myös uunin pohjaosien ja rakennuksen teräsrakenteet. Myös sulatettavassa materiaalissa kulkevat virrat synnyttävät magneettikentän. Virrat kulkevat sulatettavassa materiaalissa epämääräisesti ja levinneinä laajalle alueelle. Symmetria pienentää myös materiaalissa syntyviä magneettikenttiä.

7.2 Valokaariuunin mittaukset

Muuntajien pienjännitepuolella käytetään pienjännitettä, alle 1000 V. Uunissa käytetään pientä jännitettä, jotta virta saadaan nostettua korkeaksi. Virta pitää saada suureksi, koska se määrää uunista saatavan tehon. Jännitteen pitää ylittää valokaaren syttymisraja, joka on noin 50 V/m. Suurilla uuneilla pienjännitepuolen jännite voi olla jopa 700 V. Suurista tehoista ja pienestä jännitteestä johtuen uunin virrat ovat suuria.

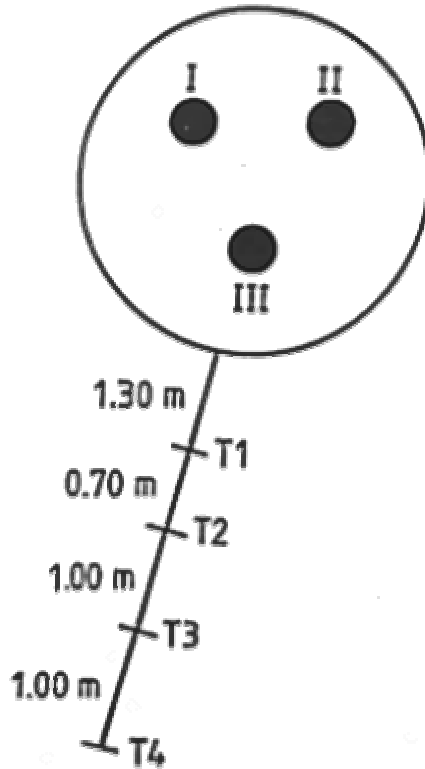
Mittaukset suoritettiin kahdessa koesarjassa. Ensimmäisen mittaussarjan aikana virta määritettiin 10 minuutin aikaisina keskiarvoina. Toisen koesarjan aikana virta määritettiin yhden minuutin aikaisina keskiarvoina.

Johtimien ja elektrodien suurista virroista johtuen myös magneettivuon tiheys on uunin lähellä suuri. Koesarjassa 1 magneettivuon tiheys mitattiin elektrodin I suunnassa etäisyyksiltä C: 10,8 m, D: 14,0 m ja E: 16,9 m uunin keskipisteestä. Magneettivuon tiheyden mittauspisteet C, D ja E on esitetty kuvassa 7.2.



Kuva 7.2. Mittausasetelma koesarjassa 1, mittarit pisteissä C, D ja E.

Koesarjassa 2 mittaukset tehtiin elektrodin III suunnassa holvitason lattialta etäisyyksiltä T1: 8,3 m, T2: 9,0 m, T3: 10,0 m ja T4: 11,0 m uunin keskipisteestä. Magneettivuon tiheyden mittauspisteet T1, T2, T3 ja T4 on esitetty kuvassa 7.3.



Kuva 7.3. Mittausasetelma koesarjassa 2, mittarit pisteissä T1, T2, T3 ja T4.

Mittauksissa käytettiin kolmea ML-1 -tyyppistä magneettikenttämittaria. Mittausalue oli yhdellä mittarilla $0,01 - 100 \mu\text{T}$ ja kahdella $0,1 - 1000 \mu\text{T}$. Koesarjassa 1 pienemmän mittausalueen mittari sijoitettiin suurimmalle etäisyydelle, koska magneettivuon tiheys on alle $100 \mu\text{T}$. Koesarjassa 2 käytettiin kahta isomman mittausalueen mittaria yhtäaikaaisesti, koska pienempi mittausalue ei riittänyt. Koesarja suoritettiin kahdessa osassa.

Elektrodivirtojen keskiarvot molemmissa koesarjoissa on esitetty taulukossa 7.1. Siinä on myös elektrodivirtojen vaihekulmat. Vaihekulmien määrittämistä varten oletetaan jonkin virran kulma nolllaksi ja lasketaan muut siten, että virtojen summa on nolla. Taulukossa on esitetty myös virran suurin ja pienin arvo.

Taulukko 7.1. Vaihevirit ja -kulmat valokaariuunilla koesarjan 1 ja koesarjan 2 magneettikenttämittausten aikana; vaihevirit I_I , I_{II} ja I_{III} (k.a. on keskiarvo, φ on vaihekulma, max. on vaiheviritin suurin arvo, min. on vaiheviritin pienin arvo).

elektrodi **virta I, kA**
 koesarja 1

koesarja 2

	k.a.	φ	max.	min.	k.a.	φ	max.	min.
I	100,8	0,0°	132,2	77,3	99,5	0,0°	119,2	88,7
II	104,7	117,4°	131,8	76,0	113,9	123,8°	126,6	102,8
III	106,9	240,5°	132,1	79,4	101,3	246,4°	110,5	95,0

Magneettivuon tiheyden keskiarvot (keskiarvo \pm keskihajonta) olivat koesarjassa 1 pisteessä C: $346 \pm 30 \mu\text{T}$, D: $142 \pm 13 \mu\text{T}$ ja E: $68 \pm 7 \mu\text{T}$. Koesarjassa 2 magneettivuon tiheyden keskiarvot olivat pisteessä T1: $782 \pm 26 \mu\text{T}$, T2: $602 \pm 16 \mu\text{T}$, T3: $479 \pm 9 \mu\text{T}$ ja T4: $366 \pm 7 \mu\text{T}$.

7.3 Valokaariuunin magneettikenttien laskenta

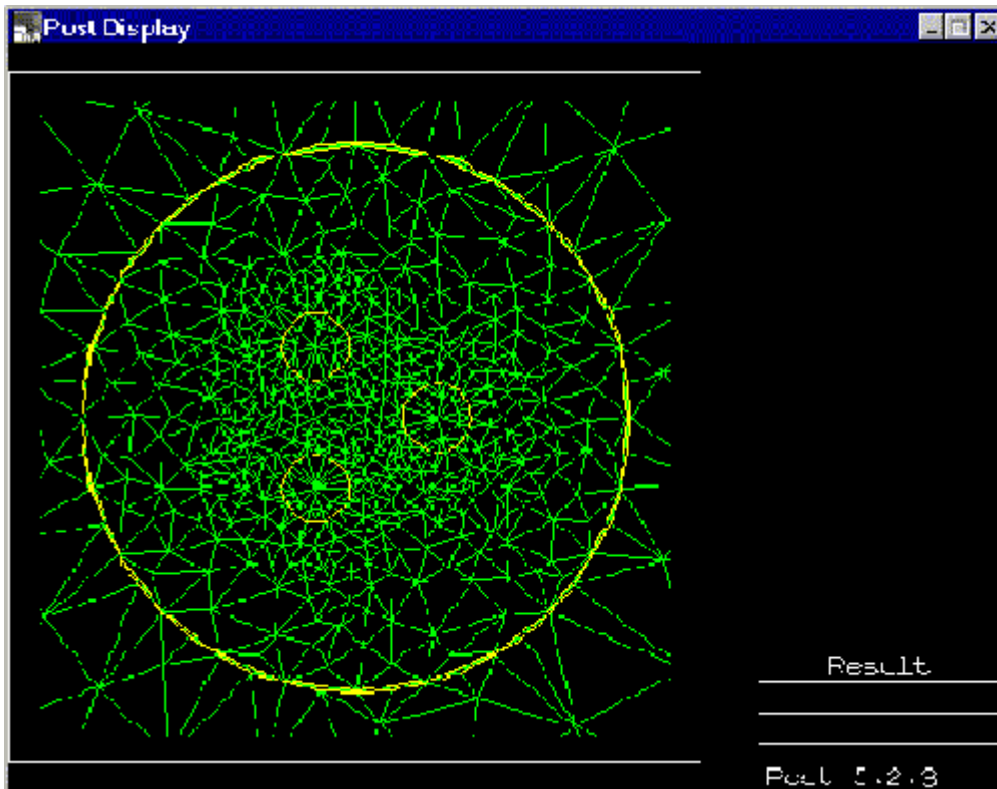
Magneettikenttien laskennassa käytettiin elementtimenetelmää uunin kuorimateriaalin vaikutuksen laskemiseen. Elementtimenetelmän tulokset huomioitiin analyttisessä laskennassa, jota käytettiin magneettivuon tiheyden laskentaan. Kuorimateriaalin vaimennusvaikutus huomioitiin niissä johdinten osissa, jotka ovat kuorimateriaalin sisällä. Laskennan arviointiin käytettiin magneettivuon tiheyden mittaustuloksien lisäksi Thomsen ja Bjølsethin tutkimuksessa [/35/](#) julkaistun likimääräistä yhtälöä 19. Yhtälö on estimoitu magneettikenttämittausten tilastollisen analysoinnin avulla.

$$B = \frac{5I}{r^3} [\mu\text{T}] \quad (19)$$

missä B on magneettivuon tiheys etäisyydellä r,
I on elektrodivirta ja
r on tarkasteluetäisyys uunin keskipisteestä.

7.3.1 Valokaariuunin magneettikenttien numeerinen laskenta

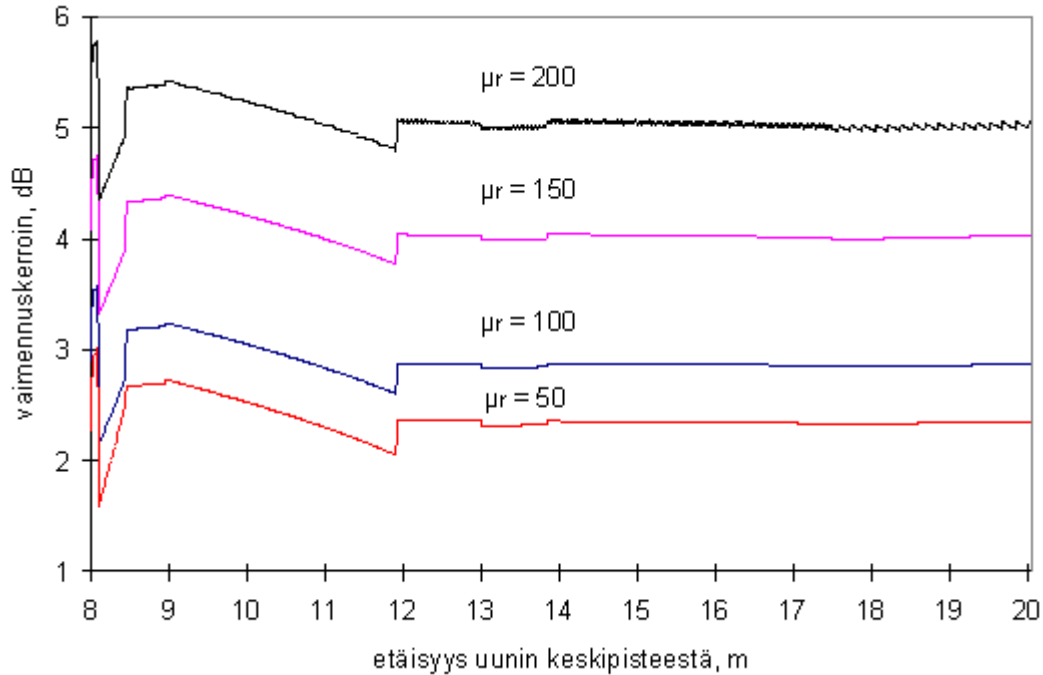
Valokaariuunin kuorimateriaalin vaikutus laskettiin MagNet 5.2.3 -ohjelmistoa käyttäen. Laskenta tehtiin kaksiulotteisesti, joten siinä huomioitiin ainoastaan elektrodien lähdevirta, virran jakautuminen niissä sekä kuorimateriaaliin indusoituvat pyörrevirrat. Kaksiulotteisessa mallissa ei huomioitu valokaarivirtoja, syöttöjohtimia tai elektrodien ja johtimien päiden vaikutusta. Elementtimenetelmän avulla diskretoitu valokaariuunin elementtiverkko on esitetty kuvassa 7.4.



Kuva 7.4. Elementtimenetelmällä tehty valokaariuunin laskentamalli MagNet-ohjelmalla.

Elementtejä on eniten elektrodien lähellä, missä magneettivuon tiheys muuttuu tarkastelupisteen suhteen nopeimmin. Vastaavasti uunin ulkopuolella niitä on vähemmän kuin uunin sisällä, koska magneettivuon tiheys muuttuu hitaammin.

Mallin avulla laskettiin yhtälön 12 mukaiset magneettikenttien vaimennuskertoimet kuorimateriaalille. Vaimennuskerroin on esitetty kuvassa 7.5 tarkasteluetaäisyyden funktiona. Vaimennuskertoimen parametrinä on kuorimateriaalin suhteellinen permeabiliteetti. Vaimennuskerroin laskettiin etäisyyksillä 8-20 m, eli alkaen yhden metrin etäisyydeltä valokaariuunin kuoresta. Tulokset käsiteltiin Excel 5.0 -taulukkolaskentaohjelmalla.



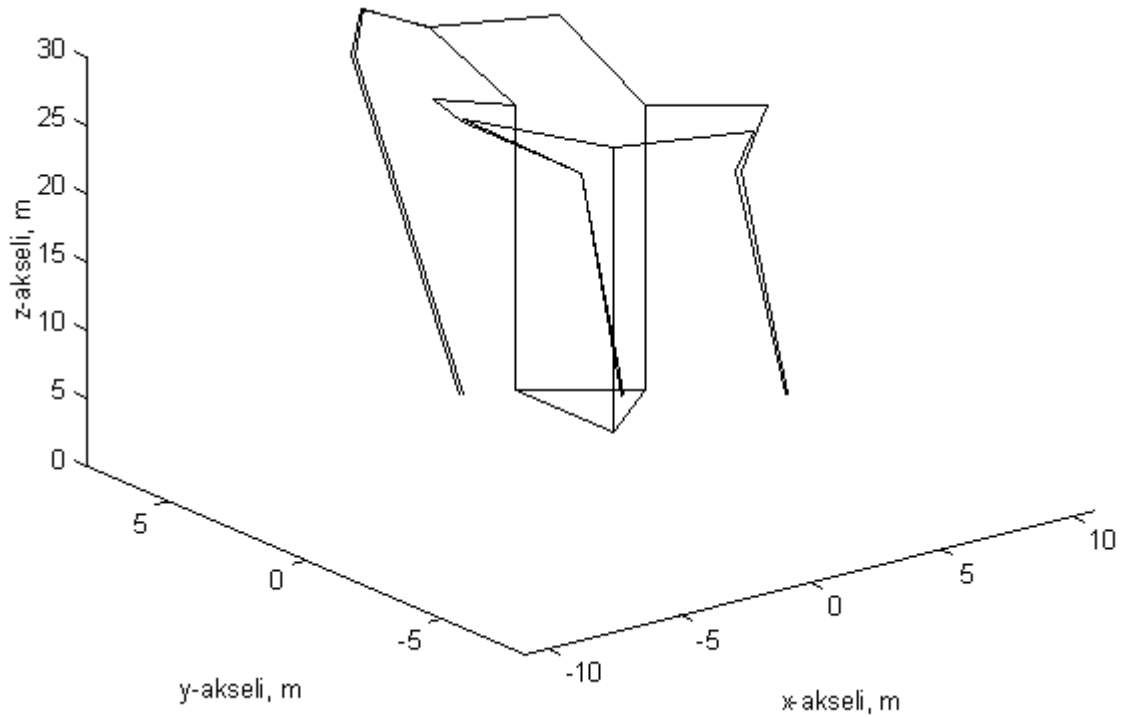
Kuva 7.5. Valokaariuunin vaimennuskerroin tarkasteluetaisyyden funktiona; parametrinä kuorimateriaalin suhteellinen permeabiliteetti.

Kuorimateriaalin johtavuutena ja permeabiliteettina käytetään jatkossa $\mu_r = 200$ ja $\sigma = 1,5 \cdot 10^3$ S/m. Kuorimateriaalin kuorimateriaalin vaimennuskerroin on näitä materiaaliominaisuuksia käyttäen 5,0 dB ja vaimennusvaikutus on 77%.

Kuvista 7.5 voidaan päätellä, että vaimennuskerroin on etäisyyden funktiona likimain vakio. Eri materiaaliominaisuudet vaikuttavat magneettivuon tiheyteen niin, että vaimennuskerroin on suurempi paremmin johtavalla tai suuremman permeabiliteetin omaavalla materiaalilla.

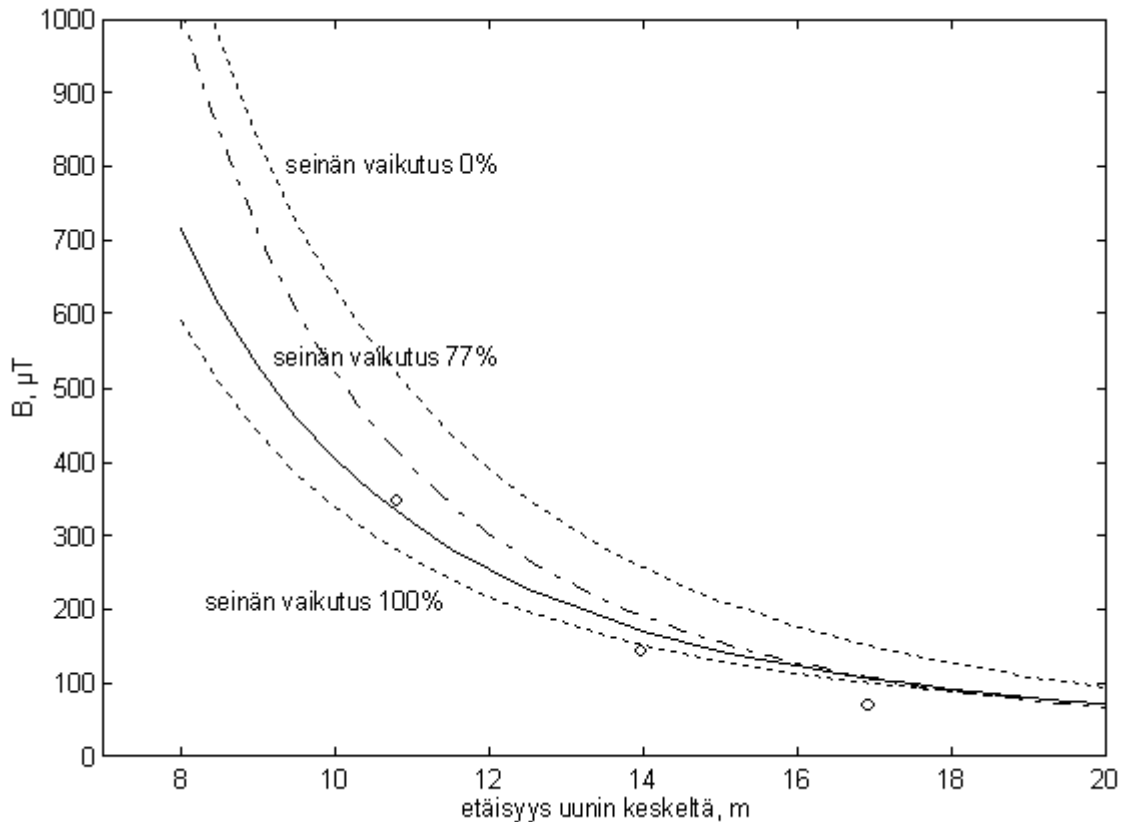
7.3.2 Valokaariuunin magneettikenttien analyyttinen laskenta

Valokaariuunin magneettivuon tiheys laskettiin analyyttistä laskentamallia käyttäen. Laskenta tehtiin kolmeulotteisesti, joten siinä huomioitiin valokaarivirrat, syöttöjohtimet sekä elektrodien ja johtimien päiden vaikutus. Analyyttisen laskentamenetelmän avulla saatu valokaariuunin laskentageometria on esitetty kuvassa 7.6.



Kuva 7.6. Analyttisellä laskentamenetelmällä tehty valokaariuunin laskentamalli.

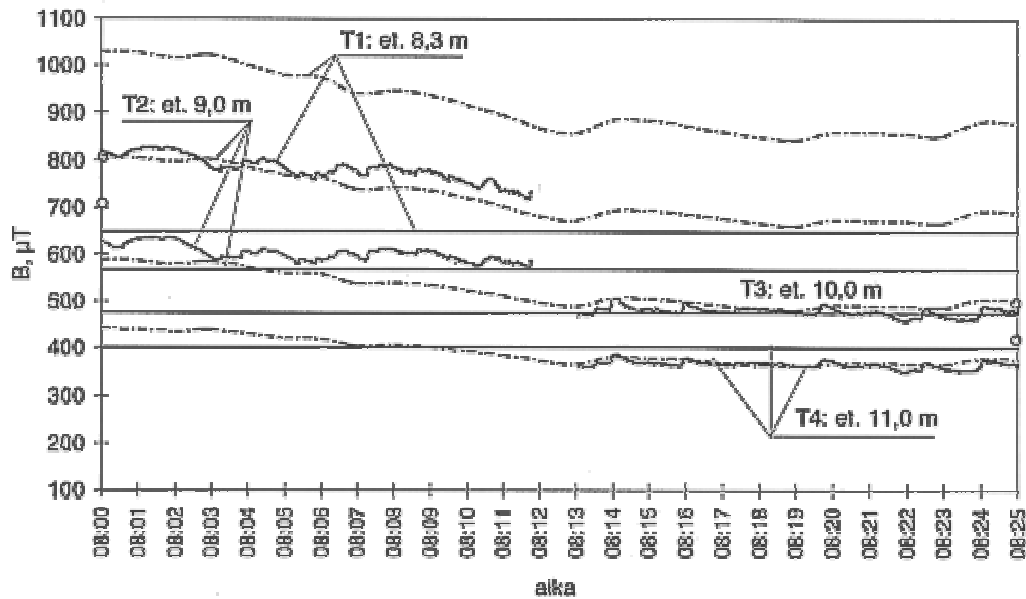
Laskennassa hyödynnettiin MagNet-ohjelmalla lasketut vaimennuskertoimet niissä johdinosissa, jotka ovat kuorimateriaalin sisällä. Koesarjaa 1 vastaavat magneettivuon tiheydet on esitetty kuvassa 7.7 tarkasteluetaisyyden funktiona. Kuvassa on esitetty lisäksi laskenta tapauksille, joissa kuorimateriaalin vaikutus olisi 0% ja 100% ja yhtälön 19 mukaan likimääräisesti laskettu magneettivuon tiheys.



Kuva 7.7. Valokaariuunin magneettivuon tiheys koesarjassa 1. Kuorimateriaalin vaikutus on 0%, 77% tai 100%. Pistekatkoviiva on likimääräinen laskenta ja o -merkki tarkoittaa mittaustuloksia.

Kuvan 7.7 perusteella voidaan päätellä, että magneettikenttien tarkastelussa syöttökaapeliin sijoittelu on kuorimateriaalia merkittävämpi tekijä. Kuvan perusteella voidaan myös todeta, että koska kuorimateriaalin täydellisen vaimennuksen (seinän vaikutus 100%) tapauksessa magneettivuon tiheys ei ole merkittävästi pienentynyt, uunin vuoraaminen suojamateriaalilla ei ole kannattavaa. Likimääräisen laskennan tulokset olivat melkein yhtä lähellä mitattuja arvoja kuin tarkemmin lasketut. Kuvan perusteella likimääräinen laskenta soveltuu hyvin magneettivuon tiheyden tason arviointiin.

Koesarjaa 2 vastaavat magneettivuon tiheydet on esitetty kuvassa 7.8. Virtana on käytetty koesarjan keskiarvoja. Kuvassa on esitetty lisäksi tulokset, joissa virtana on käytetty alku- ja lopputilan virtoja sekä likimääräisen laskennan tulokset.



Kuva 7.8. Valokaariuunin magneettivuon tiheys holvitason lattian korkeudella, kun kuorimateriaalin vaikutus on 77%. Kuvassa yhtenäinen käyrä on mitattu ja yhtenäinen suora viiva on laskettu. Alku- ja loppuhetken virtojen mukaan laskettu on esitetty o -merkillä ja likimääräinen laskenta pistekatkoviivalla.

Keskiarvon suuruiset elektrodivirrat mitattiin koejakson puolivälissä. Siksi myös laskennan tulokset olivat lähimpänä mittaustuloksia koejakson puolivälissä. Koska vaihevirtojen mitatut keskiarvot esiintyivät jokaisella vaiheella eri aikaan, ei minkään tarkasteluhetken virta vastaa laskennassa käytettyjä vaiheiden keskiarvoja. Tästä aiheutuu, että laskentaan tulee epätarkkuutta. Alku- ja loppuhetken virralla päästiin lähemmäksi mittauksia, mutta mallin tuloksiin jäi noin 10% epätarkkuus.

Laskentatulosten epätarkkuuden syynä ovat mm. kuorimateriaalin vaimennusvaikutuksen yksinkertaistettu huomioiminen, valokaariuunin lähellä olevat metallirakenteet, valokaaren virran spektrissä mahdollisesti esiintyvät suuret taajuudet, mittausetäisyyden epätarkkuus ja mallinnuksen epätarkkuus. Laskentamallilla voidaan kuitenkin arvioida magneettivuon tiheyden arvot kohtuullisen tarkasti, joten mallia käytettiin myös uunin magneettikenttien vaimennustarkastelussa.

Verrattaessa likimääräistä laskentakaavaa käyttämällä saatuja tuloksia mittaustuloskiin, voidaan todeta, että 10,0 ja 11,0 metrin tarkasteluetaisyyksillä likimääräiset laskentatulokset ovat lähellä mittauksia. 8,3 ja 9,0 metrin tarkasteluetaisyyksillä tuloksien epätarkkuus on 20 - 25%.

7.4 Yhteenveto valokaariuunin magneettikenttien laskennasta

Valokaariuunin magneettivuon tiheyden mittaukset tehtiin kahdessa mittaussarjassa, koesarjat 1 ja 2. Mittausten ajalta saatiin elektrodivirrat. Elektrodivirtojen avulla laskettiin magneettivuon tiheydet molemmissa koemittaussarjoissa. Valokaariuunin kuorimateriaali ja virran jakautuminen elektrodeissa huomioitiin numeerisen laskennan avulla. Tulosten perusteella pääteltiin, että

valokaariuunin aiheuttamien magneettikenttien pienentämisessä on tärkeämpää tarkastella syöttöjohtojen mahdollisimman hyvää sijoittamista kuin pyrkiä vaimentamaan magneettikenttää.

Likimääräinen laskenta on erittäin nopea ja yksinkertainen, joten se onnistuu vaikka ilman tietokonetta. Kaavan antamat tulokset antoivat melko hyvän likiarvon magneettivuon tiheydelle. Lähellä uunia tulokset ovat epätarkempia kuin kauempana uunista. Kaava ei huomioi kuitenkaan esimerkiksi uunin syöttöjohtojen sijaintia, eikä sen avulla voida tarkastella magneettikentän pienentämistä.

8 LASKENTAESIMERKEISTÄ TEHTYJÄ JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Esimerkkitapausten, jotka kaikki olivat jo olemassa olevia kohteita, perusteella voidaan todeta, että magneettikenttien pienentäminen on helpointa suunnitteluvaiheessa. Tällöin voidaan valita tapakseen parhaiten soveltuvat keinot. Saneerausena toteutettava kenttien pienentäminen on aina työläämpää. Tällöin kenttien pienentämistarkasteluun on myös vaikeampi saada mukaan kaikkia tulokseen vaikuttavia tekijöitä, kuten tarkkoja mittoja. Suunnittelussa joudutaan toki käyttämään myös oletuksia, kuten kuormitusvirta voidaan joutua arvioimaan ennusteiden perusteella.

Magneettikenttien pienentämiseen voidaan käyttää vaimentamista tai vähentämistä, joiden vaikutuksia testattiin tässä raportissa erilaisissa esimerkkitapauksissa laskennan ja mittausten avulla. Tarkasteltujen esimerkkien avulla ei voida tehdä kattavaa ohjeistoa magneettikenttien pienentämisestä, mutta esimerkeistä voidaan löytää yhtymäkohtia rakenteeltaan erilaisiin laitoksiin tai laitteisiin. Niiden avulla saatiin tietoa siitä, millaisia pienentämiskeinoja kannattaa käyttää. Pienentämiskeinojen soveltaminen kannattaa kuitenkin tehdä vasta, kun keinon vaikutus on testattu laskennan avulla tai muuten päätelty kokemuksen kautta, koska muutostyöt ovat usein kalliita toteuttaa.

Magneettikenttien pienentämistä varten on syytä ensin suorittaa nykytilan selvittävä mittaus, jotta voidaan todeta pienentämiskäytön vaikutus. Nykytilan selvittämisen avulla voidaan myös arvioida mahdollisen laskennan tarkkuutta. Mittauksissa kannattaa käyttää testattuja mittausten menetelmiä, jolloin mittaukset ovat vertailukelpoisia [/17/](#). Kattavimmat mittaukset saa yhdistämällä eri menetelmiä, esimerkiksi hetkellismittauksia ja pitkäaikaismittauksen.

Mittausten aikana on tärkeää selvittää tapakseen liittyvät sähköjärjestelmän virrat mahdollisimman tarkasti. Tarkka virran selvittäminen voi olla hankalaa, jos virralla on monta kulkureittiä eli johtimet haarautuvat. Tarkasteluissa voikin joutua arvioimaan tarkasteltavassa kohteessa esiintyvät virrat, vaikka tehdään tarkat virtamittaukset.

Virta- ja rakennetietojen avulla voidaan suorittaa magneettikenttälaskenta ja kenttien pienentämistarkastelu. Laskennan perusteella saadaan selvitettyä parhaat pienentämismenetelmät sekä niiden vaikutus magneettikenttään. Erilaisia pienentämismenetelmiä voi tarvittaessa yhdistää, jotta päästään riittävän pieniin magneettikenttiin. (Jolloin esimerkiksi häiriöitä ei enää esiinny.) Pienentämismenetelmän valintaan vaikuttaa myös taloudelliset tekijät, mutta ne on jätetty tämän raportin ulkopuolelle.

Hyvien tulosten saamiseksi kannattaa kuitenkin käyttää kaikkia mahdollisia edullisia keinoja magneettikenttien pienentämiseksi. Kiinteistömuuntamon esimerkkitapauksessa toteutetussa ratkaisussa yhdistettiin lähteen siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteista, vaihevälin

pienentäminen ja vaihejärjestyksen muuttaminen. Näiden toimenpiteiden yhdistäminen oli kannattavaa, koska yksikin näistä muutoksista olisi vaatinut lähes vastaavan suuruisen työn ja yhdistämällä päästään parempaan tulokseen.

Magneettikenttien pienentämisessä ei myöskään voi aina rajoittua tarkastelemaan yksittäistä kenttälähdettä, mikäli pitää saada aikaan suuri pienennys, kuten valokaariuunin tapauksessa. Tällöin pitää ottaa huomioon muutkin kenttälähteet, joiden tarkastelutapa voi olla kokonaan toinen kuin ensimmäiseksi tarkastellun pienentämiskohteen. Tässä tilanteessa, jossa lähteen kenttien pienentäminen ei ole riittävä keino, voi tulla kysymykseen myös kohteen suojaaminen kenttiä vaimentamalla.

8.1 Esimerkkitapaukset

8.1.1 Sähköasema

Sähköaseman magneettikenttä on mahdollista pienentää nostamalla sähköaseman johtojen ja laitteiden ripustuskorkeutta. Korkeuden nostaminen 0,5 metrillä vaikutti noin 10% laskentaesimerkin kytkinkentällä. Muutoksen toteuttaminen valmiilla sähköasemalla olisi kallista, vaikea ja aiheuttaisi pitkän käyttökatkoksen, jolloin jouduttaisiin käyttämään varayhteyksiä. Suunnitteluvaiheessa voitaisiin suunnitella korkeampia sähköasemia, jolloin lisäkustannukset jäisivät muutostöitä alhaisemmaksi. Korkeampien sähköasemien tekeminen saattaisi olla kuitenkin maisemanäkökulmasta huono vaihtoehto

Suurimmat magneettikentät oli esimerkkitapauksessa muuntajan alajännitepuolen alasvientien lähellä, jossa on mahdollista altistua magneettikentille esimerkiksi huoltotöiden yhteydessä. Kenttien pienentämisessä voidaan keskittyä pahimpiin kenttälähteisiin, kuten muuntajan kaapeleihin. Tällöin pienentäminen vaikuttaa paikallisesti eli pelkästään kaapelien lähellä. Esimerkkinä laskettiin pienennysvaikutus kolmion muotoon laitetulle kaapelille ja vaihejohtimien sekoittamiselle, jossa kaapelien vaiheväli oli mahdollisimman pieni. Pienentämiskeinojen vähentämistulokset olivat 36% ja 75%. Kaapelin vaihejärjestyksen muuttamisen toteuttaminen olisi esimerkkitapauksessa mahdollista, koska vaiheet on jaettu valmiiksi kahteen kaapeliin.

Sähköaseman magneettikenttien systemaattiselle pienentämiselle on vaikea löytää perusteluja, koska siellä esiintyvät magneettivuon tiheydet eivät kuitenkaan ylitä esimerkiksi altistumisrajoja. Suurimmat mitatut arvot esimerkkitapauksessa olivat alle 40 μ T. Pienentämisen perusteena tuleekin kysymykseen lähinnä sähköasemalla tehtävien mittausten häiriöiden ehkäisy, jolloin signaalikaapelien sijoittamisen suunnittelussa kannattaisi käyttää laskettuja magneettivuon tiheyksiä apuna. Signaalijohtimet kannattaisi sijoittaa sinne, missä magneettivuon tiheys on pienin.

8.1.2 Kiinteistömuuntamo

Kiinteistömuuntamon esimerkkitapauksessa muutettiin muuntamon rakennetta magneettikenttien pienentämiseksi. Muuntamon alajännitepuolen kiskosilta siirrettiin alkuperäistä alemmaksi ja vaihdettiin kaapeloinniksi, jolloin vaiheväliä voitiin pienentää. Myös kaapelin vaihejärjestys sekoitettiin. Muutetussa rakenteessa kaapelit ovat 0,8 metriä alkuperäistä kiskostoa alempana.

Rakenteen muuttaminen vaikutti magneettikenttiin koko huoneessa. Aivan muuntajan yläpuolella magneettikenttä pieneni jopa 53%. Pienentämisen vaikutus laskettiin myös alumiinikoteloinnille ja tilanteessa, jossa rakennuksessa olisi 5-johdinjärjestelmä. Koteloinnissa 2 mm vahvan ja 40 cm

pitkän alumiinisuojan vaimennuksen vaikutus olisi toimistotilassa suurimmillaan 40%. Rakennuksessa toteutettavan 5-johdinjärjestelmän vaikutus olisi toimistotilassa suurimmillaan 45%.

Toteutetussa pienentämistratkaisussa, jossa kiskosilta laskettiin alemmaksi ja vaihdettiin kaapeliksi oli suurin vaikutus magneettikenttään. Magneettivuon tiheys pieneni mittausten mukaan jopa laskettua enemmän, mutta toimistohuoneessa havaittiin vielä muutostöiden jälkeenkin häiriöitä. Magneettivuon tiheys oli muutostöiden jälkeen noin 1,5 μT mittauspisteessä.

Häiriöitä aiheuttamattomaan magneettikenttien tasoon pääsemiseksi olisi käytettävä vielä muita magneettikenttien pienentämiskeinoja. Esimerkkitapauksessa kyseeseen voisi tulla esimerkiksi vielä suojausten käyttäminen. Tapauksessa tulisi kiinnittää huomiota myös muihin kenttälähteisiin kuin ainoastaan muuntajan ja pääkeskuksen väliseen kaapelointiin, joiden aiheuttama kenttä voi nousta merkittäväksi kenttien pienentämistoimenpiteiden jälkeen. Yksi mahdollinen häiriökenttien lähde ovat lisäksi yliaaltojen virrat, jotka kulkevat summutuneena nollajohtimeen. Esimerkkitapauksen yhteydessä tehdyissä mittauksissa virran spektrissä oli huomattava määrä yliaaltoja, joten niiden suodatuksella voisi myös pienentää magneettikenttiä.

9 YHTEENVETO

Tämän raportin tavoitteena oli selvittää erilaisten magneettikentän pienennysvaihtoehtojen käyttämahdollisuuksia käytännön tilanteissa. Magneettikenttien vähentämistä ja vaimentamista tarkasteltiin sähköaseman, muuntamon ja valokaariuunin esimerkkitapauksissa. Tarkasteluesimerkkien valintaan vaikutti se, että ne saattavat aiheuttaa muualla esiintyviä suurempia magneettikenttiä. Niistä oli saatavissa magneettikentän ja virran mittaustuloksia.

Sähköaseman magneettikenttien pienentämisesimerkkiä varten suoritettiin kartoitusmittaus ja kaksi linjamittaus. Magneettikenttämittaukset tehtiin 0,5 ja 1,0 metrin korkeudella. Myös sähköaseman virta-arvoja talletettiin magneettikenttämittausten ajan. Virran ja sähköaseman rakenteen perusteella laskettiin analyttisellä laskentamenetelmällä magneettivuon tiheys koko sähköasemalla. Laskennan perusteella todettiin suurimpien magneettikenttien olevan muuntajien alajännitepuolien läheisyydessä.

Magneettikentän kartoitus tehtiin sähköaseman toisen muuntajan läheisyydessä. Kartoitusmittauksen ja analyttisen laskentamenetelmän tuloksia vertaamalla todettiin, että ne vastasivat, aivan alajännitepuolen lähialuetta lukuun ottamatta, hyvin toisiaan. Epätarkkuuteen vaikutti mittauspisteiden paikan määrittämisen epätarkkuus, koska niitä ei voitu mitata suoraan muuntamon seinän takana olleista alajännitepuolen johdoista.

Linjamittaukset tehtiin sähköaseman kaksikulotteisista etelä-pohjoinen- ja länsi-itä-poikkileikkauksista. Poikkileikkauksista laskettiin magneettivuon tiheys analyttisellä menetelmällä ja elementtimenetelmällä. Länsi-itä-suunnan mittaus- ja laskentatuloksia verrattaessa analyttisen laskennan tulokset olivat hiukan elementtimenetelmän tuloksia lähempänä. Etelä-pohjoinen-suunnan laskentatulokset poikkesivat toisistaan, koska kaksikulotteisella elementtimenetelmällä voitiin huomioida ainoastaan kokoojakiskosto ja analyttisellä laskentamenetelmällä huomioitiin koko sähköaseman vaikutus magneettivuon tiheyteen. Etelä-pohjoinen-suunnan mittaus- ja laskentatuloksia ei voitu verrata toisiinsa, koska kokoojakiskoston virtaa ei tunnettu riittävän tarkasti.

Sähköaseman magneettikenttien pienentämiskeinoina laskettiin muuntajan alajännitepuolen johtimien asettaminen kolmion muotoon ja sekoitettu vaihejärjestys, jonka vaiheväli oli

mahdollisimman pieni. Kolmion muotoon asetettujen johdinten avulla saatiin magneettivuon tiheys pieneneväksi 36%. Sekoitettujen vaihejärjestyksen ja vaihevälin pienentämisen avulla magneettikenttä pieneni jopa 75%. Myös sähköaseman korkeus vaikuttaa sähköaseman magneettikenttään. Kiskojen, johtojen ja laitteiden nostaminen puoli metriä ylemmäksi vaikuttaa magneettivuon tiheyteen noin 10%.

Muuntamon magneettikenttien pienentämisesimerkkiä varten oli tehty muuntamon päällä olevassa toimistohuoneessa magneettikentän pitkäaikaismittaus. Virta oli mitattu samalta ajalta. Muuntamon rakennetta oli sen jälkeen parannettu ja mittaukset toistettu. Rakennetta parannettiin muuttamalla pienjännitekiskosto kaapeleiksi, joiden vaihejärjestys sekoitettiin. Molemmat tilanteet laskettiin analyttisellä laskentamenetelmällä, jolla päästiin likimain samoihin tuloksiin kuin oli mitattu. Laskennan avulla verrattiin myös kiskoston ympäröimistä alumiinikotelolla ja 5-johdinjärjestelmän käyttämisen vaikutusta, jolloin vaihevirratt summautuvat nollassi. Rakenteen muuttamisen avulla yläpuolella olevan toimistohuoneen magneettikenttä pienenee jopa yli 50%. Alumiinikoteloinnin ja virtojen nollaantumisen vaikutus on noin 40%.

Valokaariuunin magneettikenttien pienentämisesimerkissä käytettiin kahden kartoitusmittauskoesarjan mittaustuloksia. Molemmissa oli mitattu magneettivuon tiheys eri etäisyyksillä ja lisäksi elektrodivirratt. Valokaariuunin kuorimateriaalin vaikutus laskettiin kaksikulotteisella elementtimenetelmällä, jossa ei voitu kuitenkaan huomioida uunin syöttöjohtojen vaikutusta magneettikenttään. Elementtimenetelmän tulokset hyödynnettiin analyttisen laskentamenetelmän laskennassa. Analyttisen laskennan avulla päästiin noin 10% epätarkkuuteen mittaustuloksiin verrattaessa. Laskentaan käytettiin myös likimääräistä laskentakaavaa, jolla magneettikentän laskenta on helppoa ja nopea suorittaa. Likimääräisellä kaavalla laskentatuloksien epätarkkuus oli alle 25%, joten kaavoja voi käyttää uunin magneettivuon tiheyden likimääräiseen arviointiin.

Raportissa esitettyjä pienentämiskeinoja ja niiden laskentaa ei vielä tässä vaiheessa ole testattu kuin muutamissa kohteissa. Tulevaisuudessa analyttisen ja numeerisen laskentamenetelmän yhdistämistä on tarkoitus testata erityisesti muuntamoiden magneettikenttien laskentaan.

LÄHTEET

- /1/ ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists). 1997. Threshold limit values for chemical substances and physical agents. Biological exposure indices. Cincinnati OH, USA. s. 109-110.
- /2/ ANSYS 5.0 user's manual, Volume IV. 1992. Houston, Swanson Analysis System, Inc. 1545 s.
- /3/ Autere, J. 1995. Sähkölaitteiden häiriösuojauksella on kiire. Tekniikka & Talous. No. 12, s. 19.
- /4/ CEC (Commission of the European Communities). 1993. Proposal for a council directive on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents. Official Journal of the European Communities, No C77. s. 12-29.
- /5/ CENELEC: ENV 50166-1. 1995. Human exposure to electromagnetic fields: Low frequency (0 Hz to 10 kHz). 23 s. (Vastaava suomalainen standardi: SFS-ENV

- 50166-1. 1996. Työntekijöiden ja muun väestön altistuminen 0 Hz - 10 kHz taajuisille sähkö- ja magneettikentille. 24 s.)
- /6/ CENELEC/TC111(SEC)61. 1995. Definitions and Methods of Measurement of Low Frequency Magnetic and Electric Fields with Particular Regard to Exposure of Human Beings. Standardiehdotus. 76 s.
- /7/ Chatterton, P.A. & Houlden, M.A. 1996. EMC Electromagnetic Theory to Practical Design. West Sussex: Wiley. 295 s.
- /8/ Cooley, W.W. 1968. Low-Frequency Shielding Effectiveness of Nonuniform Enclosures. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-10, no. 1, March 1968, s. 34-43.
- /9/ DIN (Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE). 1990. Sicherheit bei elektromagnetischen feldern: Grenzwerte für feldstärken zum schutz von personen im frequenzberreich von 0 bis 30 kHz. DIN VDE 0848, Teil 4 A 1, Entwurf.
- /10/ EMC ja rakennusten sähkötekniikka. 1997. Sähkötieto, Espoo.198 s.
- /11/ Euroopan yhteisöjen neuvosto. 1989. Neuvoston direktiivi, sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä (89/336/ETY), Euroopan yhteisöjen virallinen lehti N:o L 139, s. 19-23.
- /12/ Gauger, J.R. 1985. Household appliance magnetic field survey. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-104 No. 9, s. 2436-2444.
- /13/ Hongisto, M. & Valjus, J. 1993. Magneettikenttäaltistus 110-400 kV johtojen läheisyydessä. Vantaa, IVO-A-05/93 tutkimusraportteja. IVO Oy, ympäristönsuojeluyksikkö. 141 s.
- /14/ Hänninen, V. 1996. Pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien mittaussuomenetelmät. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, 85 s.
- /15/ IRPA: International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (IRPA). 1990. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. Health Physics, Vol. 58, No. 1, s 113-122.
- /16/ Isokorpi, J., Keikko, T. & Korpinen, L. 1997. Magneettikenttämittarien kalibrointi. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Raportti 2-97, 85 s.
- /17/ Keikko, T., Isokorpi, J. & Korpinen, L. 1996. Pientaajuisten magneettikenttien mittaaminen. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköenergiajärjestelmät, Raportti 11-96, 80 s.
- /18/ Keikko, T. 1997. Reducing the ELF Magnetic Fields in Working Environment. International Ergonomics Association 13th Triennial Congress, Vol. 3, s. 330-332.
- /19/ Kemppainen R, Korpinen I & Partanen I 1993 Käyttötaajuisille sähkö- ja

magneettikentille altistumisen vähentämiskeinot työ- ja elinympäristössä.
Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät, raportti 6-93. 84 s.

- /20/ Kettunen L. 1989. Staattisen magneettikentän ratkaisemisesta: elementtimenetelmä ja skalaaripotentialit. Lisensiaattityö. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. 95 s.
- /21/ Korpinen, L., Hietanen, M., Jokela, K., Juutilainen, J. & Valjus, J. 1995. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 89. 210 s.
- /22/ Kursi, J. 1995. Sähköjohtojen 50 Hz kenttien laskenta-apuneuvot. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, 120 s.
- /23/ Luomi J. 1990. Kentälaskennan numeeriset menetelmät. Luentomoniste. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. 184 s.
- /24/ NRPB (National Radiation Protection Board). 1993. Board statement on restrictions on human exposure to static and time varying electromagnetic fields and radiation. Documents of the NRPB. Vol. 4, No. 5. 69 s.
- /25/ Partanen, J. 1993. Rakennusten sisäisten verkkojen magneettikentät. Raportissa: Korpinen, L., Pääkkönen, P. & Partanen, J. (toim.): Käyttöraajoitusten sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät. Raportti 5-93.
- /26/ Pääkkönen, R. 1993. Esimerkkejä työympäristön pientaajoitusten magneettikenttien vähentämisestä. Raportissa: Korpinen, L., Pääkkönen, R. & Partanen, J. (toim.): Käyttöraajoitusten sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät. Raportti 5-93.
- /27/ Pääkkönen, R. & Korpinen, L. 1993. Parranajokoneen kenttä suurempi kuin 400 kV johdon - kartoitus pientaajoituksesta sähkö- ja magneettikentistä. Sähkö & Tele 1993;66:7-8.
- /28/ Schweitz, P. 1986. Ein Verfahren zur Berechnung von Dreidimensionalen Magnetfeldern im Nachbereich von Leitungen der Elektrischen Energieversorgung. Elektrizitätswirtschaft, vol. 85, no 21, s. 827-831.
- /29/ Seesvuori, R. 1997. Magneettikentistä aiheutuvia ongelmia ja mittaaminen käytännössä. SLYP koulutuspäivät: Magneettikentät ja niiden mittaaminen, Vantaa, 29.4.1997. 12 s.
- /30/ SFS 5467. 1988. Ammattielektroniikkalaitteiden häiriönsieto; Ympäristöluokitus ja rasitusasteet.
- /31/ SFS-EN 50082-1. 1992. Sähkömagneettinen yhteensopivuus - häiriönsieto, osa 1: kotitaloudet, toimistot ja kevyt teollisuus. 18 s.
- /32/ SFS-EN 50082-2. 1996. Sähkömagneettinen yhteensopivuus - häiriönsieto, osa 2: teollisuus. 24 s.

- /33/ Sicree, R.M. 1993. Comparison of magnetic flux density meter responses over a database of residential measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, s. 607-619.
- /34/ Teknisiä tietoja ja taulukoita. 1990. Vaasa: ABB Strömberg, 2. p. 586 s.
- /35/ Thommesen G & Bjølseth P S. 1992. Statistiske og lavfrekvente magnetfelt i norske smelte- og elektrolyseverk. Rapport 1992:1. Statens Institut for Strålehygiene (SIS), Østerås, Norja. 44 s.
- /36/ Tikkanen J. 1992. Verkkotaajuiset magneettikentät jakelumuuntajan ympäristössä. Diplomityö. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 125 s.
- /37/ Valjus, J. 50 Hz Electric And Magnetic Fields in the Environment: Studies of Health Effects on Man. Depart of Public Health, University of Helsinki, Kansanterveystieteen julkaisuja M 123, 60 s.
- /38/ Vanhala, P. 1993. Muuntamoiden magneettikentät ja niiden vaimentaminen. Raportissa: Korpinen, L., Pääkkönen, R. & Partanen, J. (toim.): Käyttötaajuisien sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät. Raportti 5-93.
- /39/ Voipio, E. 1976. Sähkö- ja magneettikentät. Otakustantamo. 388 s.
- /40/ Väisälä K. 1968. Vektorianalyysi. 6.p. Helsinki, WSOY. 159 s.